

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7
Т34

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области сельского хозяйства в качестве
лабораторного практикума для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности 1-53 01 01-09
Автоматизация технологических процессов и производств
(сельское хозяйство)*

Минск
БГАТУ
2012

Составители:
кандидат технических наук, доцент *Ю. А. Сидоренко*,
ассистент *Е. Е. Мясинник*

Рецензенты:
кафедра автоматизации производственных процессов
и электротехники БГАТУ;
доктор технических наук, заведующий лабораторией
информационно-управляющих систем в сельском хозяйстве
РУП «НТЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
И. И. Гируцкий

Т34 **Теория автоматического управления** : лабораторный практи-
кум / сост. : Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мясинник. – Минск : БГАТУ,
2012. – 104 с.
ISBN 978-985-519-489-8.

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-519-489-8

© БГАТУ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	6
Первый цикл. Математическое описание и характеристики звеньев систем автоматического управления	8
Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ И МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ	16
Лабораторная работа № 2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ	26
Лабораторная работа № 3 ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ГЛАДКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ	33
Лабораторная работа № 4 ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	42
Второй цикл. Исследование типовых линейных законов регулирования	54
Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (П-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ	56
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (И-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ	67
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА СВОЙСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	73
Лабораторная работа № 4 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	77
Третий цикл. Исследование позиционного регулятора и позиционных систем	84
Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА И ДВУХПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ	93
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА И ТРЕХПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ	98
ЛИТЕРАТУРА	103

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый лабораторный практикум содержит теоретический материал для выполнения лабораторных работ и методические указания к лабораторным работам. Целью 1-го цикла лабораторных работ является изучение математического описания и характеристик звеньев систем автоматического управления, целью 2-го цикла — изучение свойств систем автоматического регулирования с типовыми линейными законами регулирования, целью 3-го цикла — изучение свойств и режимов работы позиционных систем автоматического регулирования.

ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Перед лабораторным занятием необходимо изучить цель работы и задание, освоить по материалам лекций и учебно-методическому пособию учебный материал, относящийся к теме работы, ознакомиться с лабораторным оборудованием и порядком выполнения работы. Перед занятием необходимо заготовить титульный лист, листы с целью работы, заданием и другим необходимым материалом согласно порядку выполнения работы (заголовки, таблицы и т. д.). На лабораторных занятиях необходимо иметь калькулятор.

Согласно «СТП БГАТУ 02-96» отчет выполняется на одной стороне листа формата А4 или близкого к нему формата. Допускается выполнение отчета в специальных тетрадях.

Отчет излагается в следующей последовательности: титульный лист, цель работы, задание, пункты работы в соответствии с «Порядком выполнения работы». Каждый пункт нумеруется и озаглавляется в соответствии с «Порядком выполнения работы». В каждом пункте должны быть приведены необходимые эскизы, схемы, таблицы, графики, формулы и зависимости.

Пример оформления титульного листа приведен ниже.

Эскизы и схемы должны быть помещены с соблюдением правил. Под ними должны быть даны номер рисунка, полное название рисунка и, при необходимости, расшифровка обозначений.

Таблицы обозначаются номером, название пишется над таблицей.

Графики выполняются в масштабе, обеспечивающем наглядность и достоверность информации. Оси координат должны быть снабжены обозначениями переменных, размерностью переменных и шкалой. На графике должны быть нанесены точки, по которым он строится. Если в одних координатах строится несколько графиков, то они должны быть обозначены. Под графиками должны быть даны номер рисунка и полные названия графиков.

Формулы и зависимости приводятся в общем виде и с численными значениями параметров и результатом расчета (если он выполняется) с размерностью полученных величин. Под формулой или зависимостью дается расшифровка обозначений, если эти обозначения встречаются в отчете впервые.

Отчет о лабораторной работе представляется преподавателю и работа защищается в конце занятия.

В исключительных случаях допускается защита работы в начале следующего занятия или на консультации.

Пример оформления титульного листа отчета по лабораторной работе

Белорусский государственный аграрный технический университет
Кафедра АСУП
Группа 1эа
Изучение математического описания и методов получения статических и частотных характеристик линейных звеньев
Отчет о лабораторной работе № 1 по дисциплине «Теория автоматического управления»
Исполнитель В.И. Петров 10.09.11
Руководитель Ю.А. Сидоренко 10.09.11

Первый цикл.

Математическое описание и характеристики звеньев систем автоматического управления

Лабораторная установка для выполнения лабораторных работ

Работы выполняются на лабораторной установке (рис. 1.1) или другом, указанном в лабораторной работе оборудовании.

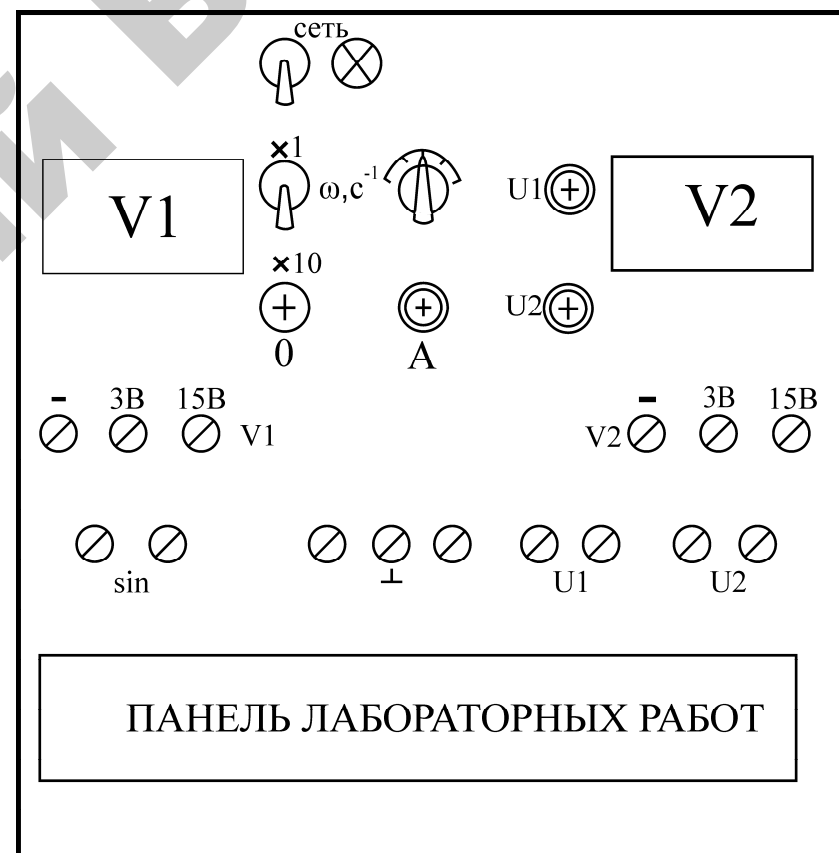


Рис. 1.1. Лабораторная установка

Тумблер «Сеть» предназначен для включения питания лабораторной установки.

Сигнальная лампа «Сеть» предназначена для индикации наличия питания.

На лабораторной установке имеются два регулируемых источника постоянного напряжения с пределами регулирования 12 В относительно общей точки «⊥» лабораторной установки. Ручки регулирования уровней напряжения обозначены для первого источника « U_1 », для второго – « U_2 ». Гнезда выходов первого и второго источников обозначены соответственно « U_1 » и « U_2 ».

На лабораторной установке имеется генератор синусоидального напряжения с дискретным выбором частоты и непрерывным выбором амплитуды. Выбор частоты осуществляется переключателем « ω , с⁻¹». Каждому положению переключателя соответствует указанная частота в рад/с. Частота на выходе генератора может быть увеличена в 10 раз переключением тумблера « ω , с⁻¹» в нижнее положение. Выбор амплитуды осуществляется вращением ручки «А». Гнезда выхода генератора обозначены «Sin». Потенциометр «О» предназначен для регулирования постоянной составляющей выходного напряжения генератора. Напряжение на выходе генератора измеряется относительно общей точки «⊥».

На лабораторной установке также имеются два вольтметра «V1» и «V2» с пределами измерений 15 В или 3 В. Выбор пределов измерений осуществляется выбором соответствующих гнезд «15 В» или «3 В». Гнезда «V1» служат для подключения вольтметра «V1», гнезда «V2» – вольтметра «V2».

Гнезда общей точки обозначены «⊥».

В нижней части лабораторной установки расположена сменная панель лабораторных работ.

Краткие теоретические сведения к циклу лабораторных работ

Одним из этапов разработки системы автоматического управления (САУ) является ее математическое описание. При математическом описании систему разбивают на отдельные звенья направленного действия, передающие воздействия только в одном направле-

нии – со входа на выход. Примерами устройств, которые могут быть представлены в виде звеньев, являются электродвигатель, входное воздействие на который – напряжение, выходная величина – частота вращения или угол поворота его вала, регулирующий вентиль, входное воздействие на который – угол поворота, выходная величина – расход жидкости или газа и т.д.

Иногда вместо терминов «входное воздействие» и «выходная величина» употребляют термины «входной» и «выходной» сигналы.

Математическое описание устройств и соответствующих им звеньев составляют на основании законов той области знаний, к которой относится рассматриваемое устройство.

По математическому описанию звенья (системы) делятся на линейные и нелинейные.

Линейными называются звенья (системы), описываемые линейными дифференциальными уравнениями.

Линейная система состоит только из линейных звеньев.

Нелинейным называется звено, описываемое нелинейным уравнением.

Система, содержащая хотя бы одно нелинейное звено, является нелинейной.

При эксплуатации на системы и их отдельные устройства действуют различные внешние воздействия. Для определенности принято изучать реакцию систем и звеньев на типовые воздействия, которые являются математическими моделями часто встречающихся реальных воздействий.

В качестве типовых рассматривают следующие воздействия.

1. Ступенчатое воздействие:

$$X(t) = \delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1(t) & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $1(t)$ – единичное ступенчатое воздействие;

a – величина ступенчатого воздействия.

2. Импульсное воздействие (дельта-функция):

$$X(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

При этом согласно определению

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (3)$$

Дельта функция связана с единичным ступенчатым воздействием:

$$\delta(t) = 1'(t). \quad (4)$$

3. Гармоническое воздействие

$$X(t) = A_x \sin \omega t, \quad (5)$$

где A_x – амплитуда;

ω – частота.

Иногда используют и другие типовые воздействия, например, линейно растущее воздействие.

При приложении к звену (системе) воздействия из-за инерционности звена (системы) возникает *переходный процесс*, который через некоторое время заканчивается. После окончания переходного процесса звено работает в режиме, который называют *установившимся*. Например, если на электродвигатель подать напряжение питания, то после его разгона (переходного процесса) установится определенная частота ω_d вращения его вала (рисунок 1.2).

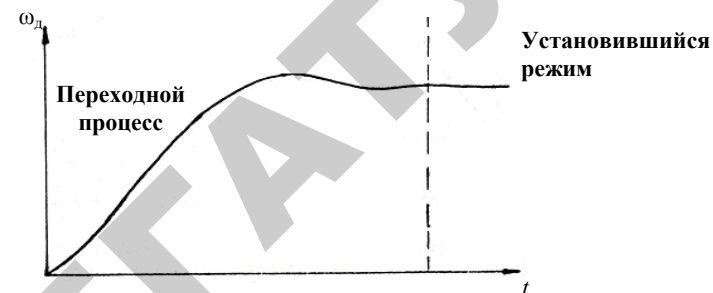


Рис. 1.2. Переходный процесс и установившийся режим работы электродвигателя после подачи на него напряжения питания

Реакцию звена (системы) на постоянное воздействие отражает статическая характеристика.

Статической характеристикой звена (системы) называется зависимость между постоянным входным воздействием и постоянной выходной величиной звена (системы) в установившемся режиме (после окончания переходного процесса).

Например, для электродвигателя постоянного тока статическая зависимость между входным воздействием – напряжением $U_{я}$, подаваемым на якорь, и выходной величиной – частотой ω_d вращения ротора изображена на рисунке 1.3.

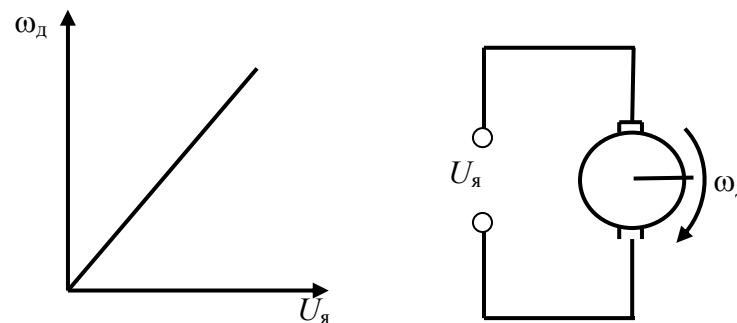


Рис. 1.3. Статическая характеристика электродвигателя и поясняющая схема

Реакция звена (системы) на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях называется *переходной функцией*.

Переходная функция обычно обозначается $h(t)$.

Если ступенчатое входное воздействие не единичное ($1(t) \cdot a$), то для линейных звеньев (систем) ординаты переходной функции увеличиваются в a раз, что следует из принципа суперпозиции для линейных систем и звеньев.

Реакция звена (системы) на импульсное воздействие (δ -функцию) при нулевых начальных условиях называется *импульсной переходной функцией* или *функцией веса*.

Функция веса обычно обозначается $w(t)$.

Переходная функция и функция веса являются временными характеристиками звеньев (систем).

Если на линейное звено (систему) подать гармоническое воздействие $X(t) = A_x \sin(\omega t)$, то после окончания переходного процесса на выходе звена установится гармоническая выходная величина $Y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi)$, где A_y – амплитуда, φ – разность фаз между выходной величиной и входным воздействием (рис. 1.4).

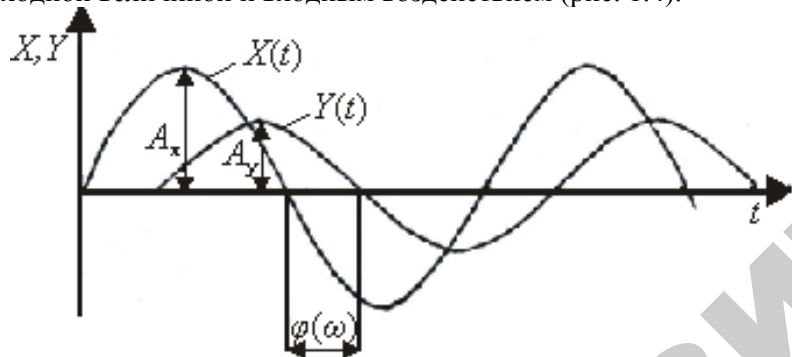


Рис. 1.4. К определению частотных характеристик линейных звеньев (систем)

Физические свойства линейных звеньев (систем) таковы, что частота входного и выходного сигналов одинаковы. Амплитуда выходного сигнала при постоянной амплитуде входного сигнала и разность фаз между выходным и входным сигналами зависят от частоты.

Реакция звена (системы) на гармоническое воздействие характеризуется его частотными характеристиками.

Амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) называется зависимость отношения амплитуд выходного и входного гармонических сигналов от частоты в установившемся режиме:

$$A(\omega) = \frac{A_y(\omega)}{A_x} \quad (6)$$

Фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) называется зависимость разности фаз $\varphi(\omega)$ между выходным и входным сигналами от частоты в установившемся режиме.

Реакцию систем и звеньев на различные воздействия изучают теоретически и экспериментально.

При теоретическом изучении получают дифференциальные уравнения звеньев (систем) и затем ищут их решения при соответствующих воздействиях.

В автоматике принято пользоваться не непосредственно дифференциальными уравнениями линейных звеньев и систем, а их передаточными функциями, что значительно удобнее.

Передаточной функцией называется отношение изображения Лапласа выходной величины к изображению Лапласа входного воздействия при нулевых начальных условиях.

При теоретическом исследовании реакций звеньев и систем на гармонические воздействия удобно пользоваться частотными передаточными функциями.

Частотной передаточной функцией называется отношение изображения Фурье выходной величины к изображению Фурье входного воздействия при нулевых начальных условиях.

Формально для линейных дифференциальных уравнений изображение Лапласа получают заменой в уравнении оператора дифференцирования d/dt на комплексную переменную $p = c + j\omega$, а изображение Фурье – заменой оператора дифференцирования на мнимую переменную $j\omega$.

Частотная передаточная функция является комплексной функцией:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) = A e^{j\varphi(\omega)}, \quad (7)$$

где $Y(j\omega)$ и $X(j\omega)$ – изображения Фурье выходной величины и входного воздействия;

$U(\omega)$ – вещественная часть частотной передаточной функции;

$V(\omega)$ – мнимая часть частотной передаточной функции;

$A(\omega)$ – модуль частотной передаточной функции;

$\varphi(\omega)$ – аргумент частотной передаточной функции.

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad (8)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (9)$$

Удобство пользования частотной передаточной функцией обусловлено тем, что ее модуль $A(\omega)$ является АЧХ звена (системы), а аргумент $\varphi(\omega)$ – ФЧХ звена (системы).

При экспериментальном изучении реакций звеньев (систем) на них подают соответствующие воздействия и измеряют выходную величину. АЧХ рассчитывают, исходя непосредственно из определения АЧХ по выражению (6).

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ И МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ

Количество часов аудиторных занятий – 4.

Цель работы – освоение методики получения математического описания статических и частотных характеристик.

Вопросы для проверки готовности к лабораторному занятию

1. Что такое звено?
2. Что такое линейное звено?
3. Что такое типовое воздействие? Какие типовые воздействия вы знаете?
4. Что такое переходный и установившийся режимы работы звена (системы)?
5. Сформулируйте определение статической характеристики.
6. Какие существуют временные характеристики систем и звеньев? Приведите определения переходной функции и импульсной переходной функции.
7. Что такое частотные характеристики систем и звеньев? Приведите определения АЧХ и ФЧХ.
8. Какая форма представления дифференциальных уравнений в теории автоматического управления?
9. Что такое передаточная и частотная передаточная функции?
10. Приведите общие зависимости для расчета АЧХ и ФЧХ.
11. Как строится АФЧХ?
12. Изложите методику экспериментального получения статических и частотных характеристик линейных звеньев (систем).

Задание

Получить расчетные (теоретические) и экспериментальные статические и частотные характеристики звена (рис. 1.5) на лабораторной установке. Сделать выводы о соответствии их друг другу.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторная установка (см. «Лабораторная установка для выполнения лабораторных работ»). На панели лабораторных работ лабораторной установки расположена схема исследуемого звена (рис. 1.5). Для измерения входного U_1 и выходного U_2 сигналов звена используется двухканальный электронно-лучевой осциллограф. Для коммутации исследуемой схемы с источниками входных сигналов используется комплект шнуров с наконечниками.

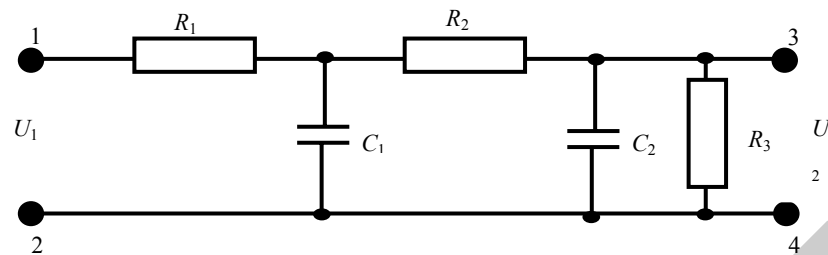


Рис. 1.5. Исследуемая схема: U_1 – входное воздействие; U_2 – выходная величина

Краткие теоретические сведения к лабораторной работе

Теоретические сведения излагаются на конкретном примере (схема на рисунке 1.5).

А. Методика расчета статических и частотных характеристик

1. Вывод уравнения звена

В нашем примере необходимо найти зависимость U_2 от U_1 .

Для этого воспользуемся 2-м законом Кирхгофа для контура, образованного R_1 и C_1 , и контура, образованного C_1 , R_2 , C_2 , R_3 :

$$U_1 = U_{R1} + U_{C1}; \quad (10)$$

$$U_{C1} = R_2 \cdot \left(C_2 \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{U_2}{R_3} \right) + U_2, \quad (11)$$

где U_{R1} и U_{C1} – падение напряжений на сопротивлении R_1 и емкости C_1 .

Выразим U_{R1} через известные сопротивления и емкости цепи:

$$U_{R1} = R_1 \cdot \left(C_1 \cdot \frac{dU_{C1}}{dt} + C_2 \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{U_2}{R_3} \right). \quad (12)$$

Производную dU_{C1}/dt найдем из уравнения (11) системы:

$$\frac{dU_{C1}}{dt} = R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2U_2}{dt^2} + \frac{R_2}{R_3} \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{dU_2}{dt}.$$

После этого получаем уравнение (12) в виде:

$$U_{R1} = R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \frac{d^2U_2}{dt^2} + \left(\frac{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2}{R_3} + R_1 \cdot C_1 + C_2 \cdot R_1 \right) \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{R_1}{R_3} \cdot U_2.$$

Подставим выражения (11) и (12) в (10) и получим искомое уравнение:

$$U_1 = R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \frac{d^2U_2}{dt^2} + \left(\frac{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2}{R_3} + R_1 \cdot C_1 + C_2 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2 \right) \cdot \frac{dU_2}{dt} + \left(\frac{R_1}{R_3} + \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) \cdot U_2. \quad (13)$$

В теории автоматического управления принято в уравнениях входные переменные располагать в левой части, а выходные –

в правой части уравнения. Кроме того, принято преобразовывать уравнение так, чтобы коэффициент при самой выходной величине (в нашем случае U_2) был равен 1.

В рассматриваемом примере:

$$\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{d^2 U}{dt^2} + \frac{R_1 R_2 C_1 + R_1 R_3 C_1 + R_1 R_3 C_2 + R_2 R_3 C_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{dU_2}{dt} + U_2 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_1. \quad (14)$$

Коэффициент при второй производной выходной величины U_2 обозначим T_2^2 , при первой производной – T_1 , коэффициент при входной величине U_1 – k .

Окончательно получаем:

$$T_2^2 \cdot \frac{d^2 U_2}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dU_2}{dt} + U_2 = k \cdot U_1. \quad (15)$$

Коэффициенты (в нашем случае T_1 и T_2) при производных называют *постоянными времени*. Они имеют размерность времени. Коэффициенты при входной величине (в нашем случае k) называют *коэффициентами передачи*.

2. Получение передаточной функции звена

Проведем преобразование Лапласа и Фурье уравнения (15) нашего звена:

$$T_2^2 p^2 \cdot U_2 + T_1 \cdot p \cdot U_2 + U_2 = k \cdot U_1;$$

$$T_2^2 (j\omega)^2 \cdot U_2 + T_1 \cdot j\omega \cdot U_2 + U_2 = k \cdot U_1.$$

Найдем отношение изображений выходного $U_2(p)$, $U_2(j\omega)$ и входного $U_1(p)$, $U_1(j\omega)$ сигналов и получим передаточную и частотную передаточную функции звена:

$$W(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 \cdot p + 1}; \quad (16)$$

$$W(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{k}{T_2^2 \cdot (j\omega)^2 + T_1 \cdot (j\omega) + 1}. \quad (17)$$

3. Расчет статической характеристики звена

В статике U_1 и U_2 постоянны, следовательно, их производные равны 0. При этих условиях статическая характеристика рассматриваемого звена имеет вид:

$$U_2 = k \cdot U_1.$$

Тот же результат можно получить из передаточной функции, приравняв в статике p нулю.

4. Расчет частотных характеристик звена

Для расчета частотных характеристик используется частотная передаточная функция.

Известно, что модуль комплексной дробной функции может быть найден как отношение модуля числителя к модулю знаменателя, аргумент – как разность аргументов числителя и знаменателя. Тогда в рассматриваемом нами случае согласно выражениям (8) и (9):

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega)^2}}; \quad (18)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{T_1 \omega}{1 - T_2^2 \omega^2}. \quad (19)$$

По результатам расчетов строятся графики АЧХ и ФЧХ (рис. 1.6).

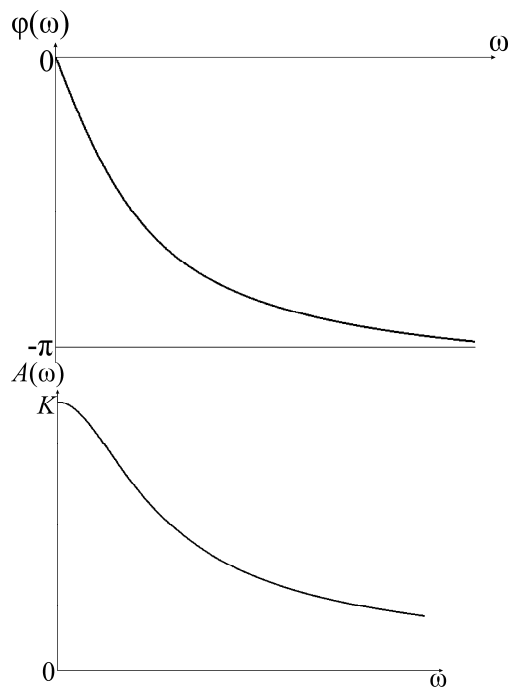


Рис. 1.6. Примерный вид графиков АЧХ и ФЧХ рассматриваемого звена

Кроме того, часто строится совместная амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) в координатах $U(\omega)$ и $jV(\omega)$ непосредственно по выражению

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

Мы при расчетах $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ не выделяли $U(\omega)$ и $jV(\omega)$, поэтому при построении воспользуемся значениями $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.

График АФЧХ звена называется годографом АФЧХ (рис. 1.7). Длина вектора, соединяющего начало координат с годографом, равна АЧХ, а угол поворота от оси U равен ФЧХ звена.

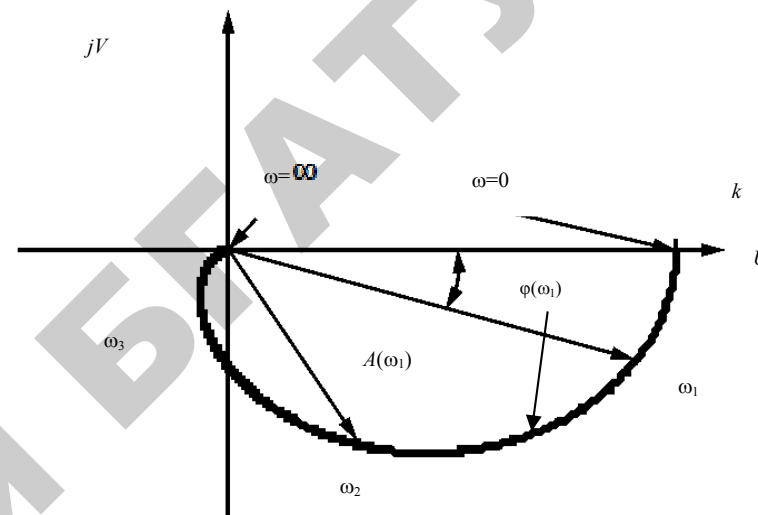


Рис. 1.7. Примерный вид АФЧХ рассматриваемого звена

Б. Методика экспериментального определения статической характеристики

На вход звена подается постоянное воздействие. После окончания переходного процесса измеряется выходная величина. Опыт проводят для ряда характерных значений выходной величины. По результатам опытов строится график.

В. Методика экспериментального определения АЧХ и ФЧХ

На вход звена подается гармоническое воздействие. Измеряются амплитуды входного воздействия A_x , выходной величины A_y и разность фаз $\varphi(\omega)$ между выходной величиной и входным воздействием (см. рис. 1.4 «Кратких теоретических сведений к циклу лабораторных работ»).

Опыт проводят для ряда частот входного воздействия.

Рассчитывают значения $A(\omega) = A_y/A_x$ для различных частот.

По результатам расчета $A(\omega)$ и измерения $\varphi(\omega)$ строят АЧХ, ФЧХ и АФЧХ.

Порядок выполнения работы

А. Получение статической характеристики звена

1. Проводом с наконечниками соединить гнездо U_1 с гнездом 1 исследуемой схемы.

2. Подключить первый канал двухканального осциллографа ко второму гнезду U_1 и гнезду \perp . Второй канал осциллографа подключить к точкам 3 и 4.

3. Включить стенд и осциллограф.

4. Для снятия статической характеристики, вращая ручку U_1 , подавать на схему последовательно напряжения U_1 : -6; -4; -2; 0; +2; +4; +6 В, определяя значение поданных напряжений по экрану осциллографа. После окончания переходного процесса для каждого значения U_1 по экрану осциллографа определить выходные напряжения U_2 . Данные опытов занести в таблицу 1.1.

5. Построить экспериментальную статическую характеристику $U_2 = f(U_1)$ звена. Рассчитать по ней значение коэффициента передачи $k = \Delta U_2 / \Delta U_1$. Его значение занести в таблицу 1.1.

6. Рассчитать на основании уравнения (14) коэффициент передачи звена

$$k_{\text{рас}} = R_3 / (R_1 + R_2 + R_3).$$

Расчетное значение коэффициента $k_{\text{рас}}$ занести в таблицу 1.1.

Рассчитать статическую характеристику $U_{2p} = k_{\text{рас}} \cdot U_1$. Результаты занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений и расчетов для построения экспериментальной и расчетной статической характеристики звена

$U_1, \text{В}$	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+6
$U_2, \text{В}$								
$U_{2p}, \text{В}$								
k								
$k_{\text{рас}}$								

7. В одних координатах с экспериментальной построить расчетную статическую характеристику $U_{2p} = k_{\text{рас}} \cdot U_1$ звена.

Сделать выводы о соответствии экспериментальной и расчетной статистических характеристик друг другу.

Б. Получение частотных характеристик звена

1. Проводом с наконечниками соединить гнездо «sin» с гнездом 1 исследуемой схемы.

2. Подключить первый канал осциллографа ко второму гнезду «sin» и гнезду « \perp ».

3. Для снятия частотных характеристик переключателем « ω , с^{-1} » выбрать частоту. Ручкой «А» выбрать амплитуду входного сигнала $A_x = 4 \dots 6 \text{ В}$. Скорость развертки осциллографа выбрать такую, чтобы на его экране умещалось не менее периода колебаний. По экрану осциллографа измерить амплитуды A_x входного и A_y выходного сигналов. Результаты измерений занести в таблицу 1.2. Одновременно по экрану осциллографа измерить разность фаз $\varphi_n(\omega)$ и период T_n в единицах горизонтальной шкалы экрана (количество делений на шкале). Результаты занести в графы φ_n и T_n таблицы 1.2. Последовательно выбирая частоты переключателем « ω , с^{-1} », провести измерения на всех частотах.

4. Рассчитать АЧХ по формуле $A(\omega) = A_y / A_x$. Результаты расчетов для всех частот занести в таблицу, дополнив их значениями $A(0)$ при $\omega = 0$ и $A(\infty)$ при $\omega = \infty$, полученными по теоретической зависимости (18).

5. Периоду колебаний соответствует разность фаз в радианах, равная 2π . Поэтому разность фаз в опытах можно рассчитать из пропорции $\varphi(\omega) / \varphi_n = 2\pi / T_n$:

$$\varphi(\omega) = \frac{2\pi \cdot \varphi_n}{T_n}.$$

Результат расчетов также занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Результаты измерений и расчетов для построения экспериментальных и расчетных частотных характеристик звена

$\omega, \text{с}^{-1}$	0						∞
A_y, B							
A_x, B							
$A(\omega)$							
$A_p(\omega)$							
T_n							
Φ_n							
$\varphi(\omega)$							
$\varphi_p(\omega)$							

6. Расчет теоретических значений $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ провести по формулам (18) и (19), предварительно рассчитав T_1 , T_2 и k по уравнению (14). Номиналы сопротивлений и емкостей взять по схеме на панели лабораторной работы. Результаты занести в графы $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$.

7. В одних координатах построить экспериментальные и теоретические (расчетные) АЧХ, ФЧХ и АФЧХ. Сделать выводы о соответствии экспериментальных характеристик теоретическим (расчетным).

Содержание отчета

1. Результаты выполнения пункта А работы: результаты эксперимента и расчетов (таблица 1.1); графики экспериментальной и расчетной статических характеристик; вывод о соответствии экспериментальной и расчетной статических характеристик друг другу.

2. Результаты выполнения пункта Б работы: результаты эксперимента и расчетов (таблица 1.2); графики экспериментальных и расчетных (теоретических) АЧХ, ФЧХ и АФЧХ; выводы о соответствии экспериментальных характеристик теоретическим.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения статической характеристики звена, АЧХ и ФЧХ звена.

2. Изложите методику получения статических и частотных характеристик линейных звеньев теоретическим и экспериментальными методами.

Лабораторная работа № 2

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Количество часов аудиторных занятий – 2.

Цель работы – освоение методики приближенной идентификации по виду переходной функции.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Что такое идентификация?
2. Почему возникает задача идентификации?
3. Что такое переходная функция?
4. Изложите методику идентификации по переходной функции.
5. Запишите дифференциальные уравнения, соответствующие передаточным функциям звеньев (таблица 1.4).

Задание

Провести идентификацию объекта по виду переходной функции.

Лабораторная установка

В качестве объекта идентификации используется сушильный шкаф. Лабораторная установка состоит из двух сушильных шкафов 1 и 2, в каждом из которых установлены два термометра сопротивления ТСМ-50М и термopара ТХК-008. Один из термометров сопротивления шкафа используется как датчик температуры в шкафу. Другой термометр сопротивления и термopара установлены для проведения их исследований и в этой лабораторной работе не используются.

Для измерения температуры в шкафах применен милливольтметр типа Ш451/1, к которому и подключены датчики температуры в шкафах.

Включение питания стенда производится автоматическим выключателем QF, включение питания милливольтметра – тумблером SA1. Трехпозиционным тумблером SA4 производится подключение установленных в шкафу 1 или в шкафу 2 датчиков к милливольтметру.

Остальная аппаратура лабораторной установки в данной работе не используется.

Краткие теоретические сведения

Для синтеза и анализа САУ необходимо иметь математические модели объекта управления и средств, входящих в систему (далее – объектов). Теоретически их можно получить путем составления дифференциальных уравнений. Однако в большинстве случаев теоретическое математическое описание объектов весьма затруднительно из-за сложности протекающих в них процессов или недостатка исходной информации. Поэтому на практике часто математические модели получают путем идентификации.

Идентификацией называют получение математических моделей на основании совместного анализа входных и выходных сигналов объекта.

В общем случае идентификация является очень сложным процессом. Однако, если известно, что объект приблизительно линейный, то идентификацию можно провести достаточно просто путем исследования реакции объекта на типовые воздействия, поскольку в этом случае зависимость выходного процесса от вида передаточной функции (дифференциального уравнения) объекта достаточно известна.

Методика идентификации линейных объектов по виду переходной функции

1. На объект подается ступенчатое воздействие и измеряется переходная функция.

2. По виду экспериментальной переходной функции определяется (выбирается) вид звена, теоретическая переходная функция которого наиболее близко соответствует экспериментальной переходной функции.

3. Путем графоаналитической обработки экспериментальной переходной функции определяются оценки численные значений параметров передаточной функции выбранного звена.

4. Для звена с полученной передаточной функцией рассчитывается переходная функция. Если она достаточно точно аппроксимирует экспериментальную переходную функцию, найденная передаточная функция принимается в качестве математической модели объекта. В противном случае необходимо подбирать звено с передаточной функцией, дающей лучшее совпадение расчетной и экспериментальной переходных функций.

Пункты 2, 3 и 4 можно выполнять путем моделирования на ЭВМ. Передаточную функцию можно при этом подбирать, например, путем наращивания порядка дифференциального уравнения, описывающего объект. Параметры передаточной функции определяют путем сравнения расчетной и экспериментальной переходных функций по какому-либо критерию, например, сумме квадратов отклонений экспериментальной переходной функции от теоретической. При оптимальных (наилучших) параметрах этот критерий принимает минимальное значение.

Порядок выполнения работы

А. Снятие экспериментальной переходной функции

Выбрать полностью остывший сушильный шкаф, в котором температура равна температуре в помещении. Закрывать его дверцу.

Трехпозиционным тумблером SA4 подключить датчик выбранного шкафа к милливольтметру Ш451/1.

Включить питание стенда выключателем QF, затем питание милливольтметра тумблером SA1.

Включить тумблером сушильный шкаф. Засечь время и принять его за 0. Измерять нарастание температуры θ в шкафу через каждые 2...4 мин. Результаты измерений заносить в таблицу 1.3. Измерения проводить до тех пор, пока температура в шкафу изменяется.

Таблица 1.3

Данные для построения экспериментальной и расчетной переходной функций

t, c									
$\theta, ^\circ C$									
$\theta_p, ^\circ C$									

Построить графики экспериментальной переходной функции и входного воздействия при $U_{вх} = 220 В$.

Б. Выбор вида звена, которым приблизительно описывается сушильный шкаф, и оценок численных значений параметров передаточной функции этого звена

Сравнивая экспериментальную переходную функцию с теоретическими переходными функциями, приведенными в таблице 1.4, определить, какому звену лучше всего соответствует экспериментальная переходная функция. Записать название этого звена и общий вид его передаточной функции.

Таблица 1.4

<p>Апериодическое звено 1-го порядка</p> $w(p) = \frac{K}{T_p + 1}$ $h(t) = K(1 - e^{-t/T})$	
--	--

Окончание табл. 1.4

<p>Апериодическое звено 1-го порядка с чистым запаздыванием</p> $w(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau p}}{T_p + 1}$ $h(t) = 0 \text{ при } t = \tau$ $h(t) = K(1 - e^{-(t-\tau)/T}) \text{ при } t \geq \tau$	
<p>Апериодическое звено 2-го порядка</p> $w(p) = \frac{K}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}$ $h(t) = \left(1 - \frac{T_3}{T_3 + T_4} \cdot e^{-t/T_3} + \frac{T_3}{T_3 + T_4} \cdot e^{-t/T_4}\right)$ $T_3 > T_4$	

Примечание. Иногда апериодическое звено 2-го порядка приблизительно представляют апериодическим звеном 1-го порядка с чистым запаздыванием. В этом случае время τ чистого запаздывания и постоянную времени T определяют так, как показано на рисунке (обведено тонкой линией). Если T_3 оказалось меньше T_4 , то объект может быть представлен апериодическим звеном 1-го порядка или 2-го порядка с чистым запаздыванием.

Путем графоаналитической обработки экспериментальной переходной функции (как показано в таблице 1.4) определить оценки параметров выбранной передаточной функции. Коэффициент передачи рассчитать как отношение

$$k = \frac{\Delta\theta}{U_{\text{вх}}},$$

где $\Delta\theta$ – полное изменение температуры в переходном процессе;

$U_{\text{вх}} = 220 \text{ В}$ – скачок входного воздействия.

Записать найденные численные значения параметров.

Построить по приведенным в таблице 1.4 выражениям расчетную θ_p переходную функцию выбранного звена на одном графике с экспериментальной переходной функцией. Сравнить их. Если максимальное расхождение кривых не более 5 % от изменения температуры $\Delta\theta$, то считать, что выбор сделан правильно. В противном случае повторить пункты 2, 3, 4.

При расчете и построении теоретической переходной функции следует помнить, что ее нулевому значению соответствует начальная температура в опыте и величина воздействия была равна $1(t) \cdot 220$, поэтому ординаты для выражений в таблице 1.4 следует увеличить в 220 раз.

Расчетные значения переходной функции для характерных точек привести в таблице 1.3 в графе θ_p , °С.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения пункта А работы: результаты эксперимента (таблица 1.3); график экспериментальной переходной функции.

2. Результаты выполнения пункта Б работы: передаточная функция звена, переходная функция которого лучше всего соответствует экспериментальной переходной функции; найденные параметры этой передаточной функции; расчетная переходная функция найденного звена, построенная на одном графике с экспериментальной переходной функцией (расчетные точки для построения привести в таблице 1.3).

3. Выводы. В выводах указать наименование звена, которым описывается сушильный шкаф, численные значения параметров

передаточной функции, степень соответствия экспериментальной и теоретической переходных функций в выбранном для оценки сечении (показать на графике) в %, дифференциальное уравнение, которым описывается сушильный шкаф.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение идентификации.
2. Изложите методику идентификации линейных объектов по переходной функции.
3. Запишите дифференциальное уравнение, которым описывается исследуемый сушильный шкаф.

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ГЛАДКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Количество часов аудиторных занятий – 2.

Цель работы – освоение методики линеаризации гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации на примере моста как устройства сравнения.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Изложите сущность линеаризации непрерывнодифференцируемых (гладких) характеристик элементов автоматики.
2. Изложите сущность методов линеаризации гладких нелинейных характеристик.
3. Назовите функциональное назначение элемента сравнения в САР.
4. Объясните работу моста как элемента сравнения.

Задание

Провести линеаризацию статической характеристики моста как элемента сравнения САР при заданном значении регулируемой величины Y . Статическая характеристика датчика системы приведена на рисунке 1.8. Значение регулируемой величины задается преподавателем.

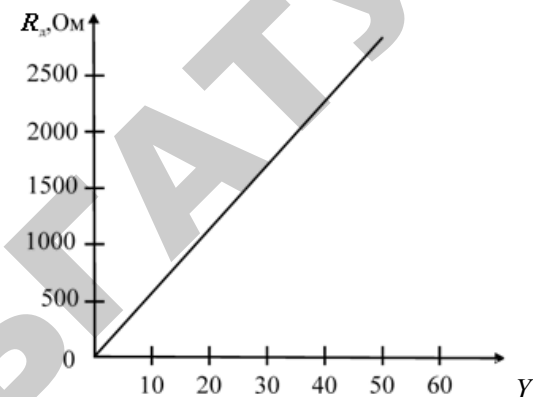


Рис. 1.8. Статическая характеристика датчика системы

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторная установка (см. «Лабораторную установку для выполнения лабораторных работ»). На панели лабораторных работ лабораторной установки расположена схема (рис. 1.9). Для имитации датчика (R_d) и задатчика ($R_{зад}$) системы используются магазины сопротивлений. Для коммутации магазинов сопротивлений в мост и соединения моста с вольтметрами стенда используются шнуры с наконечниками.

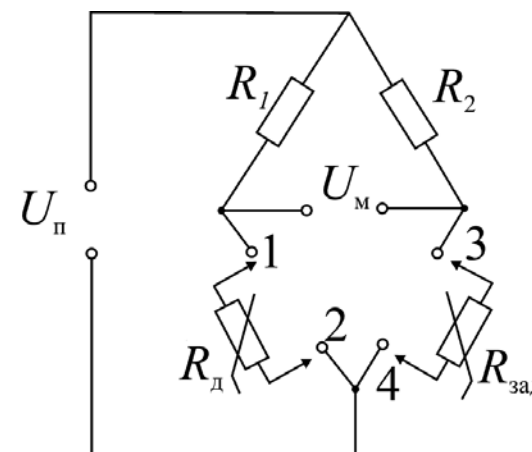


Рис. 1.9. Схема исследуемого моста

Краткие теоретические сведения

1. Линеаризация

Уравнения элементов систем автоматизации часто оказываются нелинейными. Методы исследования нелинейных систем сложнее методов исследования линейных систем, поэтому, если это возможно, их стремятся линеаризовать. В лабораторной работе рассматривается метод линеаризации непрерывно дифференцируемых (гладких) характеристик элементов. Идея метода заключается в замене исходной нелинейной характеристики $Y = f(X)$ линейной в окрестностях некоторой точки с координатами X_0, Y_0 (рис. 1.10). При этом линейная характеристика является касательной к исходной нелинейной в этой точке.

Очевидно, что при малых отклонениях переменных от точки, в которой проведена такая замена, линейная характеристика довольно точно соответствует исходной нелинейной. Для упрощения линейной характеристики ее уравнение записывается в координатах с центром в точке замены. Тогда уравнение полученной линейной характеристики имеет вид

$$Y - Y_0 = k \cdot (X - X_0) \quad \text{или} \quad \Delta Y = k \cdot \Delta X.$$

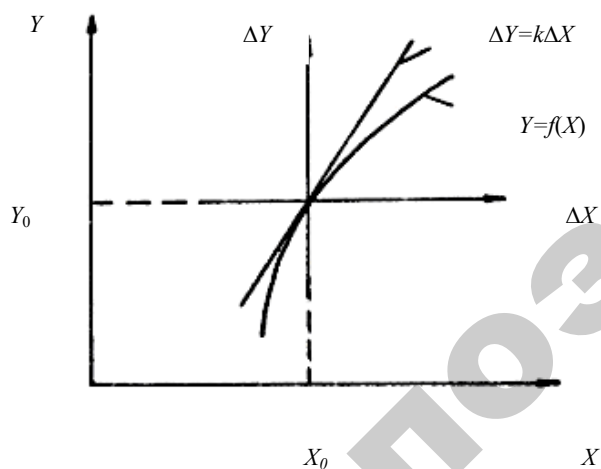


Рис. 1.10

Теоретической основой линеаризации является разложение функции в ряд Тейлора в окрестностях точки с координатами X_0, Y_0 :

$$Y(X) = Y(X_0) + Y'(X_0) \cdot (X - X_0) + \frac{Y''(X_0)}{2!} \cdot (X - X_0)^2 + \dots$$

Если ограничиться небольшой окрестностью точки разложения, то можно учитывать только линейные члены, а остальными пренебречь:

$$Y(X) = Y(X_0) + Y'(X_0) \cdot (X - X_0).$$

Перенеся начало координат в точку с координатами X_0, Y_0 и обозначив $Y'(X_0) = k$, получаем уравнение $\Delta Y = k \cdot \Delta X$.

В общем случае уравнение нелинейного звена имеет вид:

$$f(X, X', X'', \dots, Y, Y', Y'', \dots) = 0. \quad (*)$$

Разложив эту функцию в ряд Тейлора в окрестностях точки с координатами X_0, Y_0 и перенеся начало координат в точку разложения, получаем линеаризованное уравнение звена:

$$\frac{\partial f}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial f}{\partial X'} \Delta X' + \frac{\partial f}{\partial X''} \Delta X'' + \dots + \frac{\partial f}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial f}{\partial Y'} \Delta Y' + \frac{\partial f}{\partial Y''} \Delta Y'' + \dots = 0,$$

где все частные производные функции (*) вычисляются для точки с координатами X_0, Y_0 .

Разделим в полученном уравнении все члены на $\partial f / \partial Y$. Обозначив коэффициенты при производных выходной величины Y как постоянные времени, коэффициенты при входном воздействии X и его производных как коэффициенты передачи, получим линеаризованное уравнение звена. Обычно знак « Δ » приращения опускается, поскольку заранее известно, что линеаризованные уравнения записываются в отклонениях. Окончательно получаем линеаризованное уравнение и передаточную функцию звена общего вида:

$$T_n^n \cdot \frac{d^n Y}{dt^n} + T_{n-1}^{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + T_1 \cdot \frac{dY}{dt} + Y = k_0 \cdot X + k_1 \cdot \frac{dx}{dt} + k_2 \cdot \frac{d^2 X}{dt^2} + \dots + k_m \cdot \frac{d^m x_m}{dt^m};$$

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_0 + k_1 \cdot p + k_2 \cdot p^2 + \dots + k_m p^m}{T_n^n \cdot p^n + T_{n-1}^{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + T_1 \cdot p + 1}.$$

Возможность исследования нелинейных систем путем исследования их линеаризованных уравнений основана на следующем. Как правило, САР осуществляют процесс регулирования при сравнительно небольших отклонениях от требуемого установившегося режима. Например, системы стабилизации должны стабилизировать регулируемую величину. При этом все элементы системы также работают с небольшими отклонениями от своего установившегося режима, обусловленного заданными значениями регулируемой величины и номинальным возмущающим воздействием. Если для рассматриваемого элемента системы установившийся режим соответствует точке (X_0, Y_0) , то линеаризацию следует проводить в этой точке.

Линеаризация может быть проведена двумя методами: аналитически и путем графоаналитической обработки экспериментально полученной нелинейной характеристики.

При аналитической линеаризации уравнение исходной нелинейной характеристики дифференцируется по требуемой переменной. Коэффициент передачи находится путем вычисления производной в точке линеаризации.

При использовании второго метода экспериментально снимается нелинейная характеристика элемента. Коэффициент передачи находится как отношение $\Delta Y / \Delta X$ для касательной в точке линеаризации. Метод применяется при линеаризации гладких нелинейных статических характеристик.

2. Мост как элемент сравнения

В системах с управлением по отклонению регулируемой величины от ее заданного значения (по ошибке) элемент сравнения

формирует сигнал, пропорциональный ошибке. Мост часто используется в САР как элемент сравнения, если в системе применяется омический датчик регулируемой величины. Датчик (R_d) (рисунок 1.9) включается в одно из плеч моста. В качестве задатчика регулируемой величины используется одно из сопротивлений, образующих мост ($R_{зад}$), которое выполняется переменным. Отсутствию ошибки соответствует состояние баланса моста, когда напряжение на выходе моста равно нулю.

Уравнение моста:

$$U_M = U_{\Pi} \cdot \frac{R_d \cdot R_2 - R_1 \cdot R_{зад}}{(R_1 + R_d) \cdot (R_1 + R_{зад})},$$

где U_M – напряжение на выходе моста;

U_{Π} – напряжение питания моста;

$R_d, R_2, R_1, R_{зад}$ – сопротивления, образующие мост.

Линеаризуем уравнение моста относительно сопротивления R_d датчика:

$$\frac{dU_M}{dR_d} = U_{\Pi} \cdot \frac{R_1}{(R_1 + R_d)^2}; \quad k_M = U_{\Pi} \cdot \frac{R_1}{(R_1 + R_{до})^2}, \quad (20)$$

где k_M – коэффициент передачи моста;

$R_{до}$ – сопротивление датчика, при котором линеаризуется мост.

Линеаризованное уравнение моста:

$$\Delta U_M = k_M \cdot \Delta R_d.$$

Поскольку при использовании моста как элемента сравнения нулевому отклонению регулируемой величины от заданного значения, а, следовательно, нулевому отклонению сопротивления датчика от его сопротивления $R_{до}$ при заданном значении регулируемой величины должен соответствовать нулевой сигнал элемента сравнения, то мост линеаризуется при $U_M = U_{M0} = 0$ в точке баланса моста. При этом линеаризованное уравнение имеет вид:

$$U_M = k_M \cdot \Delta R_d$$

или

$$U_M = k_M \cdot k_d \Delta Y = k_c \Delta Y,$$

где $k_d = \Delta R_d / \Delta Y$ – коэффициент передачи датчика;

k_c – коэффициент передачи моста совместно с датчиком;

ΔY – отклонение регулируемой величины от заданного значения.

Связь между сопротивлением задатчика и заданным значением регулируемой величины определяется условием равновесия моста:

$$R_{до} \cdot R_2 - R_1 \cdot R_{зад} = 0,$$

тогда

$$R_{зад} = R_2 \cdot R_{до} / R_1, \quad (21)$$

где $R_{до}$ – сопротивление датчика при заданном значении регулируемой величины.

В регулирующих блоках шкала задатчика градуируется непосредственно в единицах регулируемой величины.

Порядок выполнения работы

1. Определение значения сопротивления $R_{до}$ датчика, при котором проводится линеаризация

По статической характеристике $R_d(Y)$ датчика (рис. 1.8) определить сопротивление $R_{до}$ датчика, при котором будет проводиться линеаризация (значение регулируемой величины, при котором проводится линеаризация, указывается преподавателем). Записать значение $R_{до}$.

2. Линеаризация моста аналитическим методом

Провести линеаризацию характеристики моста аналитическим методом. Для этого включить стенд и измерить U_n (рис. 1.9) моста с помощью вольтметра стенда. Рассчитать коэффициент передачи k_M моста по формуле (20). Выключить стенд. Записать линеаризованное уравнение моста.

3. Линеаризация моста по экспериментальным данным

3.1. Подсоединить к схеме на панели лабораторных работ магазины, имитирующие датчик и задатчик (рис. 1.9). Подсоединить выход моста (U_M) к вольтметру стенда. Установить на соответствующем магазине сопротивление $R_{до}$.

3.2. Включить питание лабораторной установки и сбалансировать мост магазином, имитирующим задатчик. Убедиться, что мост балансируется при соответствующем сопротивлении задатчика. Для этого необходимо рассчитать $R_{зад}$ по формуле (21) при $R_d(Y) = R_{до}$. Совпадение результатов подтвердит то, что задатчик действительно задает соответствующее значение регулируемой величины.

3.3. Изменяя сопротивление R_d датчика от 0 до 4 кОм через 200 Ом и от 4 кОм до 9 кОм через 1 кОм, снять зависимость $U_M(R_d)$. Результаты занести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Экспериментальная зависимость напряжения на выходе моста от изменения сопротивления датчика

R_d , Ом	
U_M , В	

Построить график этой зависимости. Провести касательную в точке баланса моста. Перенести координаты в точку линеаризации. Рассчитать коэффициент k_M моста как отношение $k_M = \Delta U_M / \Delta R_d$ для касательной. Записать линеаризованное уравнение моста.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения пункта 1 работы: график (рис.1.8), на котором показать значение сопротивления датчика $R_{до}$, соответствующее значению регулируемой величины Y , заданному преподавателем. Записать численное значение $R_{до}$.

2. Результаты выполнения пункта 2 работы: расчет коэффициента передачи моста; линеаризованное уравнение моста.

3. Результаты выполнения пункта 3 работы: расчет $R_{зад}$ при $R_d(Y) = R_{до}$; таблица 1.5 с экспериментальными данными; график

зависимости напряжения на входе моста от сопротивления датчика по данным таблицы 1.5 и соответствующими построениями; расчет коэффициента k_m моста; линеаризованное уравнение моста.

4. Выводы. Построить на полученном выше графике зависимость, полученную аналитически.

Сделать выводы о соответствии линеаризованных зависимостей, полученных аналитическим методом и на основании экспериментальных данных.

Пользуясь статической характеристикой датчика (рис. 1.8), рассчитать k_d как отношение $\Delta R_d / \Delta Y$. Записать и построить зависимость напряжения на выходе моста от отклонения ΔY регулируемой величины от заданного значения:

$$U_m = k_m \cdot k_d \cdot \Delta Y = k_c \cdot \Delta Y.$$

На основании полученной зависимости записать вывод о возможности использования моста как сравнивающего устройства.

Контрольные вопросы

1. Изложите порядок линеаризации аналитическим методом.
2. Изложите порядок линеаризации путем графоаналитической обработки экспериментально полученной нелинейной характеристики.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Количество часов аудиторных занятий – 2.

Цель работы – изучение классификации нелинейных звеньев и типовых нелинейных звеньев, получение навыков экспериментального определения статических характеристик нелинейных элементов.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Сформулируйте понятие звена, понятие нелинейного звена.
2. Сформулируйте определения статического и динамического звеньев.
3. Перечислите типовые нелинейные звенья.

Задание

Изучить по данным методическим указаниям виды нелинейных звеньев, классификацию статических нелинейных звеньев и типовые нелинейные звенья.

Снять экспериментально статические характеристики усилителя и поляризованного реле и определить, какими звеньями описываются эти элементы.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторная установка (см. «Лабораторная установка для выполнения лабо-

раторных работ»). На панели лабораторных работ лабораторной установки смонтированы (рис. 1.11) исследуемые усилитель и полярное реле, потенциометр «U» для регулирования напряжения U источника питания панели, схемы с гнездами для подключения усилителя и поляризованного реле к источнику питания «=U», а также к вольтметрам V_1 и V_2 и источникам питания U_1 и U_2 лабораторной установки. Для коммутации схем используется комплект шнуров с наконечниками.

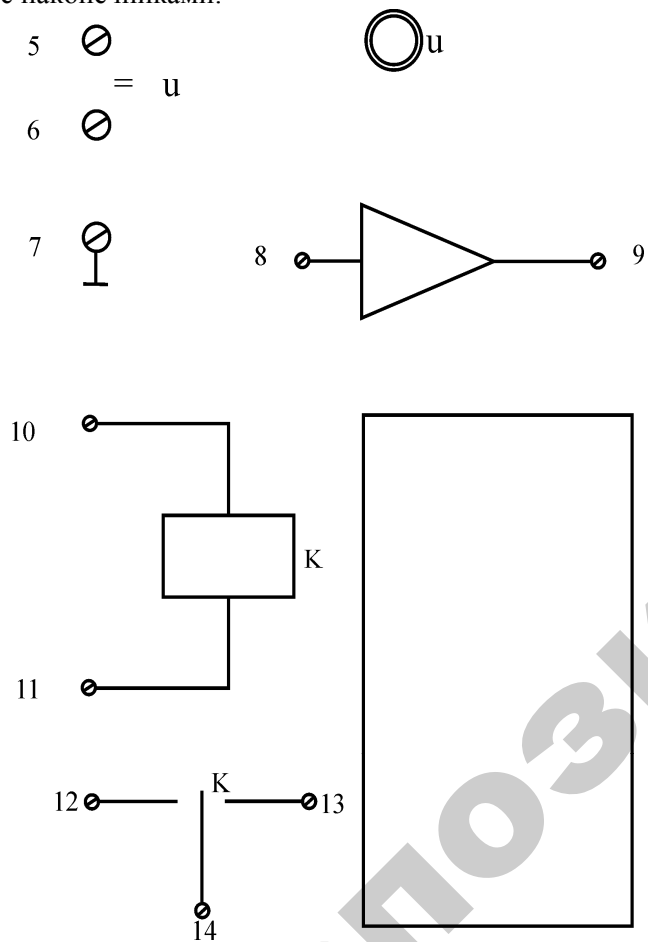


Рис. 1.11. Исследуемая схема

Краткие теоретические сведения

1. Виды нелинейных элементов (звеньев)

Многие элементы автоматики имеют нелинейные характеристики, которые могут быть представлены в виде нелинейных звеньев.

Нелинейным называется звено, описываемое нелинейным алгебраическим или дифференциальным уравнением. Нелинейные звенья подразделяются на *статические (безынерционные)* и *динамические*. Статическое нелинейное звено описывается алгебраическим уравнением

$$Z_{\text{ВЫХ}} = Z(X_{\text{ВХ}}),$$

т. е. полностью определяется своей нелинейной статической характеристикой. Динамическое звено описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$Z_{\text{ВЫХ}} = F\left(X_{\text{ВХ}}, \frac{dX_{\text{ВХ}}}{dt}, \frac{d^2X_{\text{ВХ}}}{dt^2} + \dots\right).$$

В данной работе рассматриваются статические нелинейные звенья.

2. Классификация статических нелинейных звеньев

Нелинейные звенья классифицируются по признакам симметрии, гладкости и однозначности характеристик.

2.1. Симметрия

Если характеристика $Z(X)$ звена удовлетворяет условию $Z(X) = Z(-X)$, то она называется симметричной относительно оси ординат, или *четно-симметричной* (рис. 1.12, а). Если характеристика $Z(X)$ удовлетворяет условию $Z(X) = -Z(-X)$, то она называется симметричной относительно начала координат, или *нечетно-симметричной* (рис. 1.12, в). Характеристика, не удовлетворяющая ни одному из указанных условий, называется *несимметричной* (рис. 1.12, в).

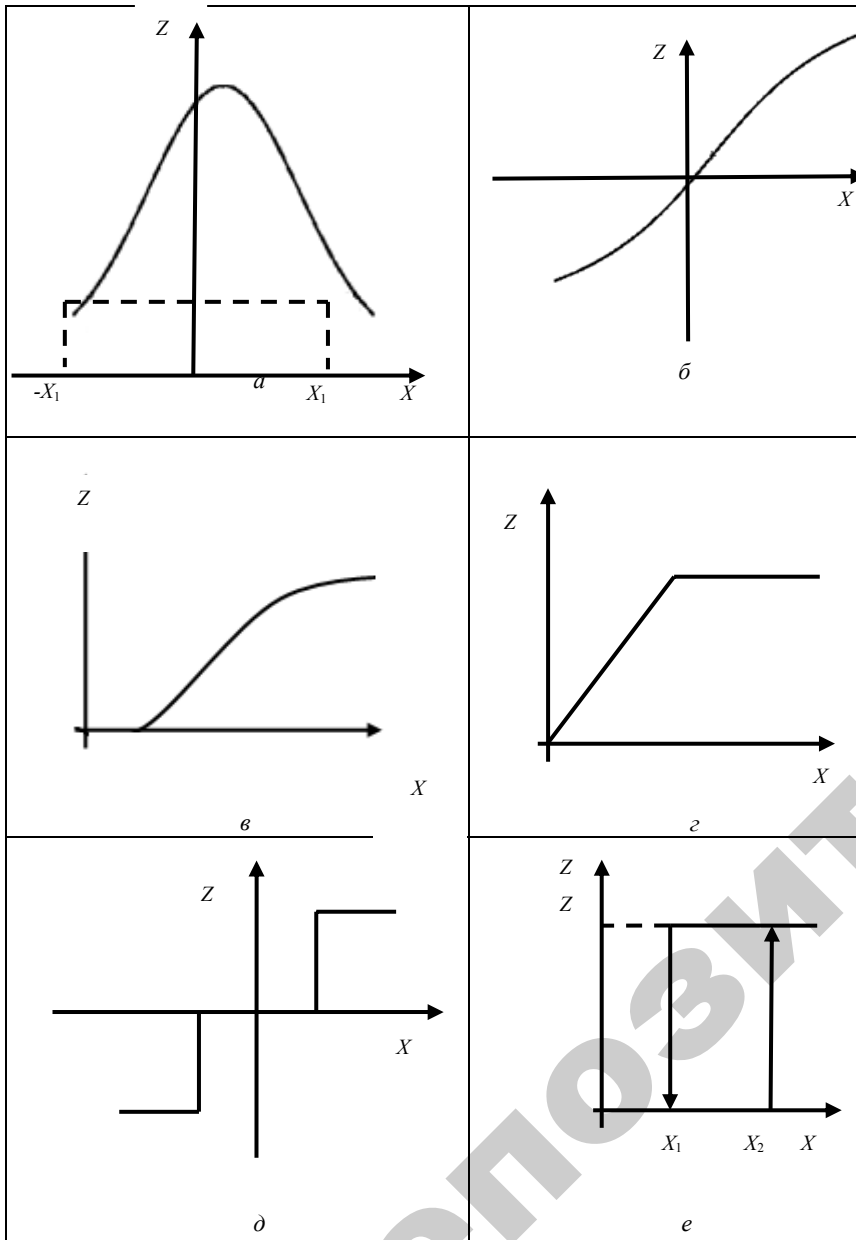


Рис. 1.12. Классификация нелинейных характеристик

2.2. Гладкость

Характеристика $Z(X)$ называется несущественно нелинейной (гладкой), если она имеет непрерывную первую производную dZ/dX (является непрерывнодифференцируемой). Характеристика с изломами, в которых производная dZ/dX имеет разрывы, называется существенно нелинейной. Из существенно нелинейных характеристик наиболее распространены кусочно-линейные характеристики, состоящие из отрезков прямых линий. Кусочно-линейные характеристики разделяются на непрерывные (рис. 1.12, г) и разрывные (рис. 1.12, е, д). Разрывные ступенчатые характеристики (рисунок 1.12, е, д) называются также релейными. В звеньях с релейными характеристиками при определенных значениях входного сигнала выходной сигнал изменяется скачкообразно.

2.3. Однозначность

Нелинейная характеристика $Z = Z(X)$ называется однозначной, если каждому значению X соответствует одно определенное значение Z (рис. 1.12, а-д). Если некоторым значениям X соответствует несколько значений Z в зависимости от режима, предшествовавшего рассматриваемому моменту времени, то характеристика, для которой в пределах изменения X от X_1 до X_2 выходная величина Z может принимать два различных значения (0 или Z_H) в зависимости от предшествовавшего состояния элемента.

3. Типовые нелинейные звенья

Типовые нелинейные звенья используются для приближенного описания наиболее распространенных реальных нелинейных элементов.

3.1. Звено типа зона нечувствительности (рис. 1.13, а)

Такой характеристикой обладают многие датчики, а также ряд схем электронных, магнитных, пневматических и гидравлических усилителей в области малых входных сигналов. Характеристика реального элемента на рис. 1.13, а показана штриховой линией. Характеристика типового звена описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq X_a; \\ k(X - X_a) & \text{при } X > X_a; \\ k(X + X_a) & \text{при } X < -X_a. \end{cases}$$

3.2. Звено типа ограничение (или насыщение) (рис. 1.13, б)

Подобными характеристиками обладают практически все реальные усилители (электронные, магнитные, пневматические, гидравлические), ограниченные по выходной мощности в области больших входных сигналов. Характеристика реального элемента на рис. 1.13, б показана штриховой линией. Характеристика типового звена описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} kX & \text{при } |X| \leq X_6; \\ Z_6 \text{sign} X & \text{при } |X| > X_6. \end{cases}$$

3.3. Звено типа ограничение с зоной нечувствительности (рис. 1.13, в)

Эта характеристика объединяет две предыдущие и описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq X_a; \\ k(X - X_a) & \text{при } X_a < X \leq X_6; \\ k(X + X_a) & \text{при } -X_a > X \geq -X_6; \\ Z \cdot \text{sign} X & \text{при } |X| > X_6. \end{cases}$$

3.4. Звено типа двухпозиционное реле с зоной неоднозначности (с гистерезисом) (рис. 1.13, г)

Характеристика двухзначна в области петли гистерезиса. На этом участке значение выходной величины зависит от предшествующего состояния элемента. Подобными характеристиками обладают электромагнитные реле, электронные реле и промышленные двухпозиционные регуляторы. Величина $2a$ называется шириной зоны неоднозначности.

3.5. Звено типа двухпозиционное реле без зоны неоднозначности (или идеальное двухпозиционное реле) (рис. 1.13, д)

Характеристика этого звена является предельным случаем предыдущей при отсутствии гистерезиса и описывается уравнением

$$Z = Z_n \text{sign} X.$$

3.6. Звено типа трехпозиционное реле с зонами неоднозначности d (рис. 1.13, е)

Такой характеристикой обладают трехпозиционные поляризованные реле, некоторые гидравлические распределители, промышленные трехпозиционные регуляторы. Величину $2a$ называют зоной нечувствительности, d называют также дифференциалами.

3.7. Звено типа трехпозиционное реле без зон неоднозначности (или идеальное трехпозиционное реле) (рис. 1.13, ж)

Характеристика этого звена является предельным случаем предыдущей при отсутствии (или пренебрежении) зонами неоднозначности и описывается уравнениями:

$$Z = \begin{cases} 0 & \text{при } |X| \leq X_a; \\ Z_n \cdot \text{sign} X & \text{при } |X| > X_a. \end{cases}$$

3.8. Звено типа люфт (рис. 1.13, з)

Наиболее часто встречающаяся нелинейность в механических системах, связанная с наличием зазоров в передачах. Зависимость между положениями X ведущего и Z ведомого элементов многозначна. Каждому положению ведомого элемента соответствует множество положений ведущего элемента в пределах зоны люфта.

Характеристики реальных элементов могут быть смещены относительно начала координат, однако это не влияет на их принадлежность к соответствующим типовым звеньям.

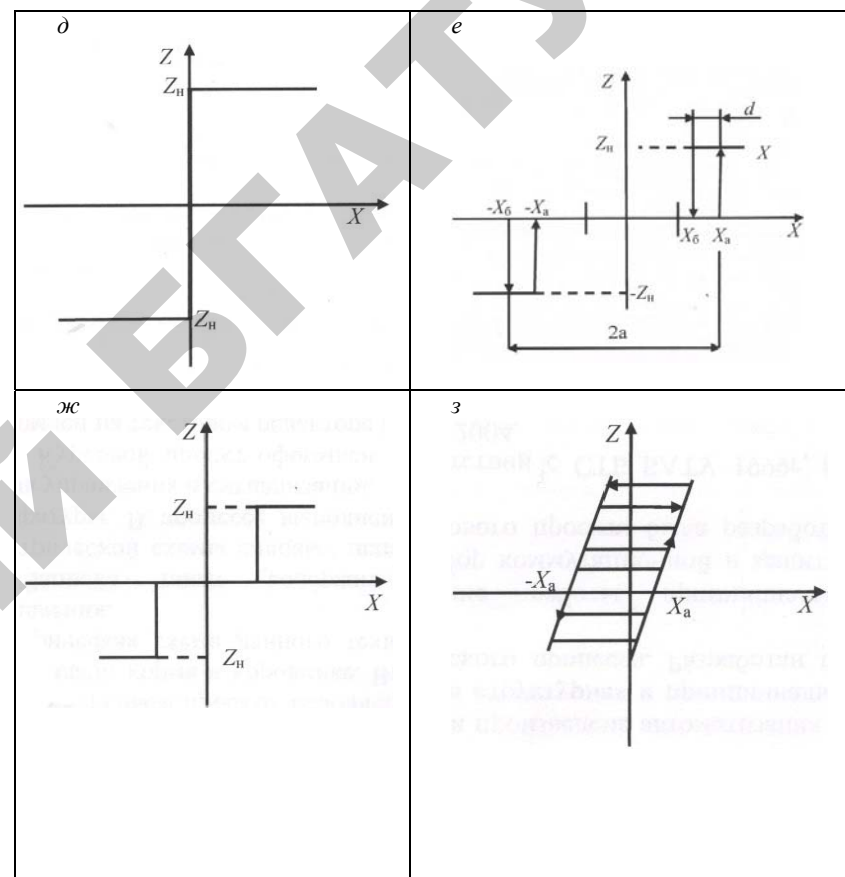
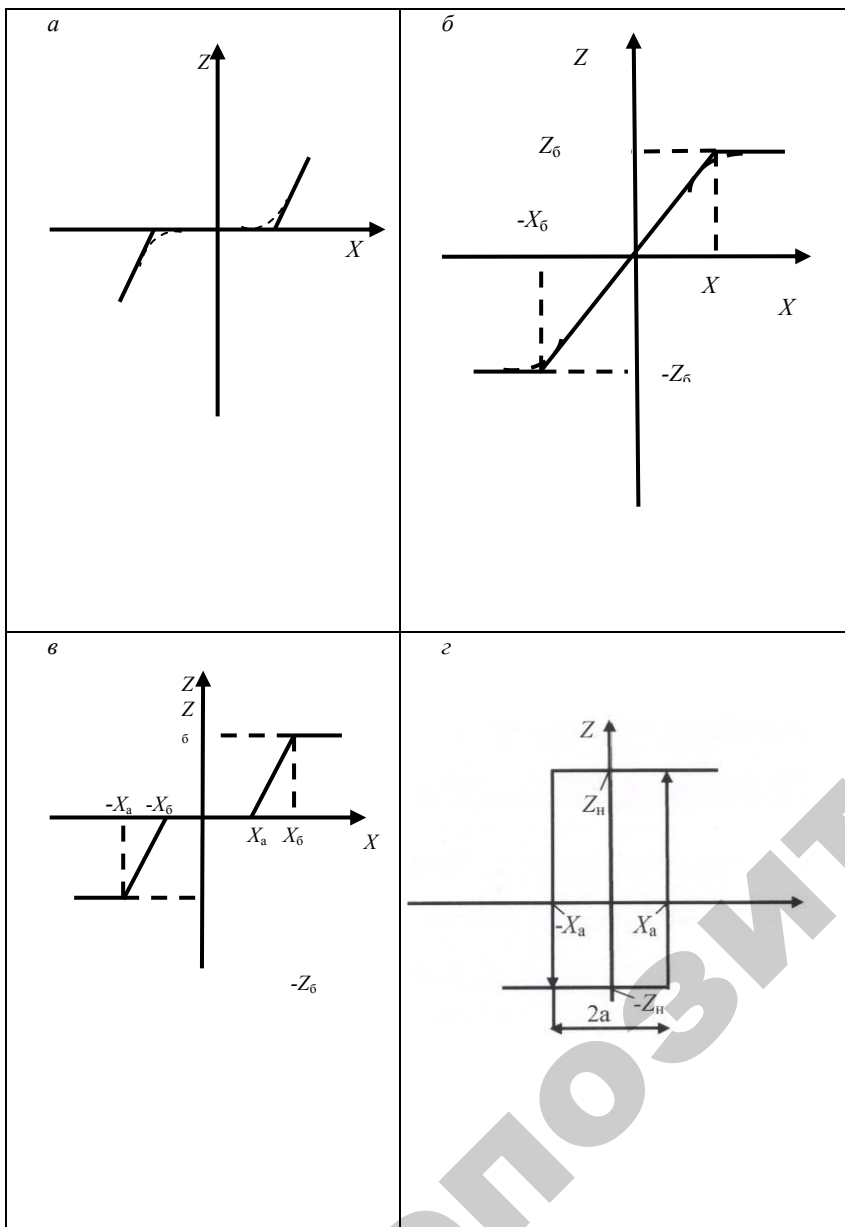


Рис. 1.13. Типовые нелинейные звенья

Порядок выполнения работы

1. Исследование усилителя

1.1. Подсоединить источник питания « $=U$ » к вольтметру $V1$ лабораторной установки (пределы измерения 3 В). Для этого шнуром соединить гнездо 5 с гнездом «ЗВ» $V1$ и гнездо « \perp » $V1$ – с гнездом « \perp » лабораторной установки. Установить ручкой « U » напряжение $U = 0$.

1.2. Подключить источник питания «=U» ко входу усилителя, соединив гнездо 6 с гнездом 8.

1.3. Подключить выход усилителя к вольтметру V2 (предел измерения 15 В). Для этого соединить гнездо 9 с гнездом «15В» V2 и гнездо «⊥» вольтметра V2 – с гнездом «⊥» лабораторной установки.

1.4. Снять статическую характеристику усилителя. Для этого изменять напряжение $U_{вх}$ на входе усилителя через 0,1 В (вольтметр V1) и одновременно измерять напряжение U_y на выходе усилителя (вольтметр V2) до тех пор, пока оно не будет оставаться постоянным. Опыт проделать для положительных и отрицательных значений напряжения $U_{вх}$. Данные опыта занести в таблицу 1.6.

Таблица 1.6

Зависимость напряжения U_y на выходе усилителя от напряжения $U_{вх}$ на входе усилителя

$U_{вх}, В$	0	0,1	-0,1
$U_y, В$	0				

Построить график зависимости выходного напряжения U_y усилителя от входного напряжения $U_{вх}$ (статическую характеристику усилителя).

1.5. Сделать вывод о том, каким типовым звеном описывается исследованный усилитель.

2. Исследование поляризованного реле

Подсоединить источник питания «=U» к вольтметру V1 лабораторной установки (пределы измерения 3 В). Для этого шнуром соединить гнездо 5 с гнездом «3В» V1 и гнездо «⊥» V1 – с гнездом «⊥» лабораторной установки. Установить ручкой «U» напряжение $U=0$.

2.2. Подключить источник питания «=U» к катушке К поляризованного реле. Для этого соединить гнездо 6 с гнездом 10 и гнездо 7 «⊥» – с гнездом 11.

2.3. Подать разнополярные напряжения на контакты 12 и 13 поляризованного реле. Для этого соединить источник питания « U_1 » стенда – с гнездом 12, источник питания « U_2 » стенда – с гнездом 13. Ручками « U_1 » и « U_2 » стенда установить примерно одинаковые разнополярные напряжения U_1 и U_2 , например, близкие к максимальным (вращением ручек в разных направлениях).

2.4. Подключить выход поляризованного реле к вольтметру V2 (предел измерения 15 В). Для этого гнездо 14 соединить с гнездом «15В» V2 и гнездо «⊥» V2 – с гнездом «⊥» стенда.

2.5. Снять статическую характеристику поляризованного реле. Для этого зафиксировать начальное напряжение $U_{вх} = 0$ на катушке реле (вольтметр V1) и начальное выходное напряжение U_p на контактах реле (вольтметр V2). Изменяя напряжение $U_{вх}$ через 0,1 В в направлении +3 В, затем в направлении -3 В, после этого возвращая его к плюсовым значениям, зафиксировать напряжение $U_{вх}$ и U_p в моменты переключений контактов. Моменты переключений соответствуют скачкообразному изменению U_p . Опыт заканчивается, когда U_p при увеличении $U_{вх}$ в направлении от -3 В к плюсовым значениям примет начальное значение. Все результаты опыта занести в таблицу 1.7.

Таблица 1.7

Зависимость напряжения U_p на выходе контактов реле от напряжения $U_{вх}$ на катушке реле

$U_{вх}, В$	
$U_p, В$	

Построить график зависимости напряжения U_p на контактах (на выходе) реле от напряжения $U_{вх}$ на катушке (на входе) реле (статическую характеристику реле).

2.6. Сделать вывод о том, каким типовым звеном описывается исследованное реле.

Содержание отчета

1. Результат выполнения пункта 1 работы: таблица 1.6 с экспериментальными данными; графики зависимости U_y на выходе усилителя от напряжения $U_{вх}$ на входе усилителя (статическая характеристика усилителя); вывод о том, каким типовым звеном описывается исследованный усилитель.

2. Результаты выполнения пункта 2 работы: таблица 1.7 с экспериментальными данными; график зависимости U_p на контактах на выходе реле от напряжения $U_{вх}$ на катушке реле (статическая характеристика реле); вывод о том, каким типовым звеном описывается исследованное реле.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются статические нелинейные звенья?
2. Назовите типовые нелинейные звенья и изобразите их характеристики.

Второй цикл.

Исследование типовых линейных законов регулирования

Аппаратное и программное обеспечение цикла лабораторных работ

Работы выполняются на персональных ЭВМ.

Для выполнения лабораторных работ разработана специальная программа SUA-SAR2 для моделирования систем автоматического регулирования со следующей структурой (рис. 2.1).

Принятая структура модели позволяет исследовать работу систем с пропорциональным (П), интегральным (И), пропорционально-интегральным (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) и пропорционально-дифференциальным (ПД) законами регулирования.

Для выбора закона регулирования задаются соответствующие значения коэффициентов k_p , k_i и k_d . Например, если значения k_i и k_d принимаем равными 0, а k_p задаем желаемое значение, то получаем систему с пропорциональным законом регулирования.

Имя файла для построения графиков задающего воздействия – X_3 , имя файла для построения регулируемой величины – Y . Для построения графиков используется система «grafit». Программа позволяет изменять значения задающего воздействия X_3 , возмущающего воздействия F и всех параметров системы без выхода из программы, переходить непосредственно из программы в систему «grafit» и обратно возвращаться в программу.

Вся необходимая информация для работы с программой выводится на экран дисплея. Максимальное возможное число шагов моделирования – 5000.

На рисунке 2.1: X_3 – задающее (управляющее) воздействие на систему; k_i – коэффициент передачи интегрального канала закона регулирования; k_d – коэффициент передачи дифференци-

ального канала закона управления; X_y – управляющее воздействие на объект; F – возмущающее воздействие; T_1 и T_2 – постоянные времени объекта управления; k_0 – коэффициент передачи объекта управления по управляющему воздействию; Y – регулируемая величина.

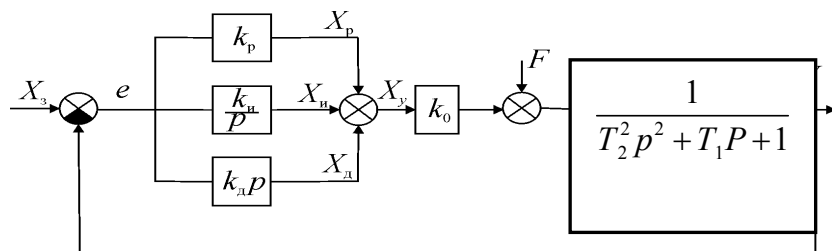


Рис. 2.1. Структурная схема моделируемой системы

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (П-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ

Количество часов аудиторных занятий – 4.

Цель работы – изучение свойств систем с П-законом регулирования, получение простейших навыков синтеза параметров закона регулирования путем моделирования на ЭВМ.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Что называют законом регулирования? Какой закон называют П-законом регулирования?
2. Какую систему называют статической? Какую систему называют астатической? Покажите, что система, исследуемая в этой работе, является статической.
3. Что такое статическая ошибка системы? Запишите для исследуемой системы передаточные функции для ошибок по управляющему и возмущающему воздействиям и покажите, как можно вычислить статические ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям.
4. Что такое переходная функция системы по управляющему воздействию? Что такое переходная функция системы по возмущающему воздействию?
5. Покажите, как определяются прямые показатели качества регулирования по переходным функциям.

6. Можно ли по переходной функции системы судить об ее устойчивости? Какие признаки говорят об устойчивости, границе устойчивости и неустойчивости системы?

7. Что такое анализ и синтез системы? Что понимают под оптимальной системой? Как ставится задача синтеза оптимальной системы?

Задание

1. Изучить, каким образом изменяются прямые показатели качества регулирования: время регулирования, перерегулирование, статическая ошибка, при изменении коэффициента передачи регулятора k_p на основании анализа переходных функций по управляющему воздействию.

Параметры объекта управления k_o , T_1 и T_2 задаются преподавателем. Значения k_p , при которых проводится исследование, задаются преподавателем с целью обеспечения наглядности результатов и сокращения времени исследования.

При оценке времени регулирования считать переходный процесс закончившимся, если регулируемая величина вошла в 5 % интервал от своего установившегося значения.

2. Синтезировать систему с максимальным быстродействием, П-законом регулирования, перерегулированием не более 30 %, статической ошибкой не более 10 % от заданного значения регулируемой величины. Начальные условия принять нулевыми. Условия окончания переходного процесса при оценке времени регулирования принять такими же, как и при выполнении 1-го пункта задания.

3. Оценить прямые показатели качества регулирования полученной во втором пункте оптимальной системы по возмущающему воздействию. Условия окончания переходного процесса при оценке времени регулирования принять такими же, как и при выполнении 1-го пункта задания.

Краткие теоретические сведения к лабораторной работе

Законом регулирования называют математическую зависимость, в соответствии с которой управляющее воздействие на объект управления формировалось бы безинерционным регулятором в функции от ошибки системы.

Пропорциональным законом регулирования называют такой закон, когда управляющее воздействие на объект управления формируется пропорционально ошибке системы:

$$X_y = k_p \cdot e.$$

Целью рассмотрения системы автоматического регулирования (САР) может быть решение одной из двух задач – задачи анализа системы или задачи ее синтеза. В первом случае дается система, включая значения параметров, и требуется определить ее свойства. Во втором случае задаются свойства, которыми должна обладать система, т.е. требования к ней, и необходимо создать систему, отвечающую этим требованиям.

При выполнении *первого пункта* «Задания» проводится анализ системы при различных значениях коэффициентов k_p регулятора системы с целью изучения изменения свойств (качества управления) системы с П-законом регулирования при изменении коэффициента передачи регулятора k_p .

Качество переходных процессов в линейных системах обычно оценивают по переходным функциям.

Переходной функцией $h(t)$ (в нашем случае регулируемая величина обозначена Y , поэтому $h(t) = Y(t)$ системы называют график изменения во времени регулируемой величины системы при подаче на систему единичного управляющего или возмущающего воздействия.

Показатели качества управления, определяемые непосредственно по переходным функциям, называют прямыми показателями качества управления (регулирования).

Для линейных систем переходную функцию по какому-либо воздействию обычно получают при равенстве 0 всех остальных воздействий. Это позволяет оценивать качество регулирования раздельно для каждого воздействия, что более удобно.

Оцениваются основные показатели качества регулирования следующим образом (рис. 2.2 и рис. 2.3).

1. *Отклонение регулируемой величины от своего установившегося значения* характеризуется следующими показателями.

Для переходной функции по управляющему воздействию определяется перерегулирование:

$$\sigma = \frac{Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100 \%,$$

где $Y_{\max 1}$ – максимальное значение регулируемой величины в переходном процессе;

$Y_{\text{уст}}$ – установившееся значение регулируемой величины.

Перерегулирование также характеризует запас устойчивости системы. При $\sigma < 30 \%$ в большинстве случаев запас устойчивости достаточен. Поэтому, если нет специальных требований к отклонению регулируемой величины от своего установившегося значения в переходных процессах, то нормальным считается перерегулирование $\sigma < 30 \%$.

Для переходных процессов по возмущающему воздействию определяется отношение максимального отклонения регулируемой величины от установившегося значения к величине возмущающего воздействия:

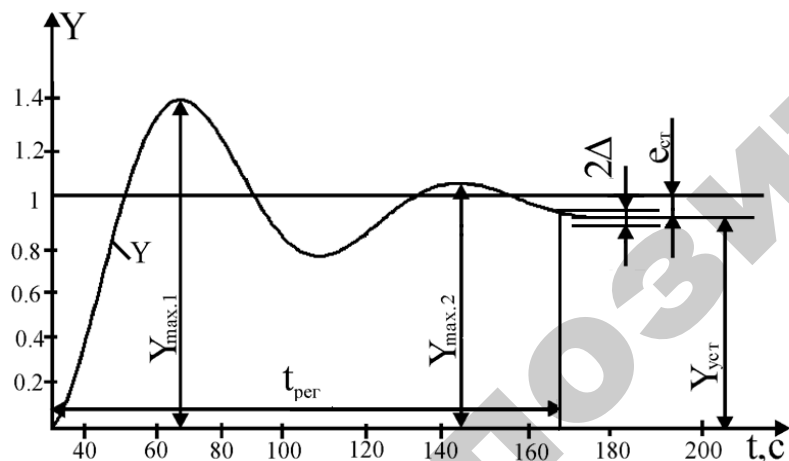


Рис. 2.2. Переходная функция по управляющему воздействию

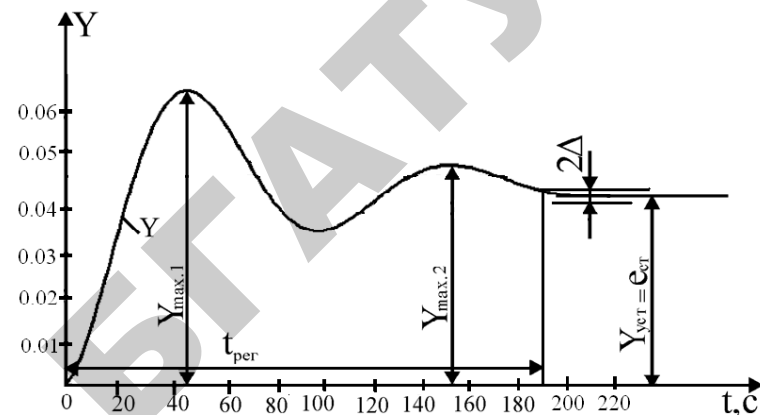


Рис. 2.3. Переходная функция по возмущающему воздействию

$$\sigma_F = \frac{Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}}{F(t)}. \quad (1.3)$$

2. *Быстродействие* системы оценивается временем регулирования. Время регулирования $t_{\text{пер}}$ определяется как интервал времени от начала переходной функции до момента, когда отклонение регулируемой величины от ее нового установившегося значения становится меньше определенной достаточно малой величины Δ :

$$|Y(t) - Y_{\text{уст}}| \leq \Delta.$$

Обычно в качестве Δ берут от 1 % до 5 % нового установившегося значения регулируемой величины для переходной функции по управляющему воздействию, или от 1 % до 5 % от максимального отклонения регулируемой величины от начального значения для переходной функции по возмущающему воздействию.

3. *Колебательность* переходного процесса определяется числом N перерегулирований для переходной функции по управляющему воздействию или числом N колебаний для переходной функции по возмущающему воздействию за время переходного процесса.

Обычно приемлемым числом колебаний считается $N \leq 2 \dots 3$.

Колебательность также оценивается отношением соседних отклонений регулируемой величины от установившегося значения (рис. 2.2 и 2.3):

$$C = (Y_{\max 2} - Y_{\text{уст}}) / (Y_{\max 1} - Y_{\text{уст}}).$$

Эта величина так и называется колебательностью. Чем меньше колебательность, тем лучше качество управления.

Иногда колебательность также оценивается декрементом затухания $d = \ln(1/C)$. Применяются также другие оценки декремента затухания, например, отношение соседних отклонений от $Y_{\text{уст}}$.

Перерегулирование и максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения также служат оценкой колебательности.

4. Кроме вышеприведенных оценок качества переходных процессов, по виду переходной функции можно судить об *устойчивости системы*.

Если переходная функция затухает (стремится к какому-либо установившемуся значению), то система устойчива. Если амплитуда колебаний возрастает – система неустойчива. Границе устойчивости соответствуют незатухающие колебания с невозрастающей амплитудой.

5. После того, как переходная функция практически полностью закончится (рис. 2.2 и 2.3) может быть определена статическая ошибка $e_{\text{ст}}$ системы как разность между заданным Y_3 и установившимся $Y_{\text{уст}}$ значениями регулируемой величины:

$$e_{\text{ст}} = Y_3 - Y_{\text{уст}}.$$

Во втором пункте задания ставится задача провести простейший синтез системы.

Задача синтеза, как правило, всегда ставится как задача создания оптимальной системы.

Оптимальной называют систему, которая выполняет свои функции в определенном смысле наилучшим образом.

Задача синтеза оптимальной системы ставится следующим образом.

Выбирается наиболее важный показатель качества системы. Этот показатель по мере улучшения качества системы должен стремиться к минимуму или максимуму. Такой показатель называют *критерием оптимальности системы*. Критерий оптимальности может объединять в себе несколько показателей качества управления или характеризовать качество управления в среднем. В общем случае критерий оптимальности должен быть обоснован экономически.

В нашем примере критерием оптимальности является быстродействие, которое характеризуется временем регулирования $t_{\text{пер}}$. Время регулирования должно быть как можно меньше.

Однако все требования к системе, как правило, не удается задать в критерии оптимальности. Требования, неучтенные в критерии оптимальности, задаются в виде *ограничений*.

В нашем случае ограничениями являются значения перерегулирования $\sigma \leq 30\%$ и статической ошибки $e_{\text{ст}} \leq 0,1$ (поскольку $Y_3 = 1$). К ограничениям в нашем случае следует отнести П-закон регулирования, поскольку мы не выбираем закон регулирования, он задан в нашем учебном задании. Это значит, что мы решаем задачу синтеза в рамках использования заранее заданного закона регулирования и находим только оптимальные параметры настройки регулятора. Такой синтез называют *параметрическим*.

Кроме того, должны быть заданы *граничные условия* – условия, определяющие начальное и конечное состояние системы. В нашем случае начальное состояние системы определяется нулевыми условиями – значениями $Y = 0, dY/dt = 0$ при $t = 0$. Конечное состояние определяется временем $t_{\text{пер}}$. Это условие должно быть нами определено в процессе моделирования, поскольку заранее мы этого не знаем.

Порядок выполнения работы

1. Изучение изменения показателей качества регулирования при изменении коэффициента передачи регулятора

Изобразить структурную схему исследуемой системы с П-законом регулирования. Для этого из структурной схемы на рисунке 2.1 должны быть изъяты звенья с передаточными функциями $K_{\text{и}}/p$ и $K_{\text{д}}p$, образующие интегральный и дифференциальный каналы регулирования. Сумматор сигналов $X_{\text{р}}$, $X_{\text{и}}$ и $X_{\text{д}}$ каналов регулирования также должен быть изъят.

Задать в программе SUA-SAR2 параметры объекта управления k_0, T_1 и T_2 . Задать наименьшее значение $k_{\text{р}}$, задать нулевые значения $K_{\text{и}}$ и $K_{\text{д}}$. Задать управляющее воздействие на систему $X_3 = 1$ и возмущающее воздействие $F = 0$. Задать начальное значение регулируемой величины $Y_0 = 0$. Задать начальное значение сигнала

$X_{и0} = 0$ интегрального канала регулирования (начальное значение интегральной составляющей $X_{и}$).

Задать шаг Δt моделирования. Шаг моделирования можно выбрать равным одной десятой минимальной постоянной времени в системе. Для гарантии его можно уменьшить в 2–4 раза. Опыт показывает, что в этом случае погрешность моделирования составляет менее 1 % установившегося значения регулируемой величины.

Задать время моделирования. Время моделирования должно быть выбрано экспериментально. За время моделирования переходная функция должна практически полностью закончиться (регулируемая величина должна перестать изменяться). Это необходимо для оценки статической ошибки.

Промоделировать работу системы. Построить с помощью системы графики задающего воздействия $X_3(t)$ и переходной функции $Y(t)$ с координатной сеткой.

Оценить значения показателей σ , $t_{рег}$ и $e_{ст}$ по графику переходной функции. Занести значения показателей в таблицу 2.1.

Повторить опыты для всех остальных значений k_p в порядке их возрастания (в программе менять *только значения k_p и при необходимости время моделирования*).

Таблица 2.2

k_p	σ , %	$t_{рег}$, °C	$e_{ст}$

После окончания всех опытов сделать выводы о характере изменения качества регулирования (перерегулирования, быстродействия и статической ошибки) при возрастании коэффициента передачи k_p регулятора (следовательно, при возрастании коэффициента передачи разомкнутой системы).

Примечание. При больших значениях k_p переходная функция слабо затухает (система приближается к границе устойчивости), поэтому определить время регулирования и статическую ошибку становится практически невозможно из-за большой длительности переходного процесса. Поэтому делать это в этих случаях не следует.

2. Синтез системы с максимальным быстродействием

Мы уже провели серию опытов, поэтому их результаты можно использовать при выполнении этого пункта.

Из таблицы 2.1 выбрать вариант с минимальным временем регулирования $t_{рег}$, перерегулирования не более 30 % и статической ошибкой не более 10 % от заданного значения регулируемой величины. При необходимости уточнить значение k_p с целью увеличения быстродействия при сохранении ограничения на перерегулирование.

Оценить качество регулирования полученной системы. Для этого построить с помощью системы «grafit» переходную функцию полученной системы с координатной сеткой. Построить эту функцию в отчете с нанесением всех параметров (как показано на рис. 2.2). Рассчитать в отчете перерегулирование σ и колебательность S .

Сделать вывод по пункту.

В выводе указать, что синтезирована оптимальная по быстродействию система с пропорциональным законом регулирования, перерегулирования $\sigma \leq 30\%$ и статической ошибкой $e_{ст} \leq 10\%$ от заданного значения регулируемой величины. Далее указать коэффициент k_p передачи регулятора полученной системы. Указать также все полученные показатели качества регулирования.

3. Оценка качества регулирования полученной оптимальной системы по возмущающему воздействию

В программе SUA-SAR2 задать управляющее воздействие на систему $X_3 = 0$, возмущающее воздействие на систему $F = 1$ (или $F = -1$).

Остальные параметры оставить без изменения.

Промоделировать работу системы. Построить с помощью системы «grafit» график переходной функции $Y(t)$ по возмущающему воздействию с координатной сеткой. Построить эту функцию в отчете с нанесением всех параметров (как показано на рис. 2.3). Рассчитать и представить в отчете σ_F и колебательность S .

Сделать вывод по пункту.

В выводе перечислить все полученные показатели качества регулирования по возмущающему воздействию с указанием численных значений этих показателей.

Содержание отчета

1. **Результаты выполнения 1-го пункта работы:** структурная схема исследуемой системы с П-законом регулирования с численными значениями коэффициента передачи k_o объекта, постоянными времени объекта T_1 и T_2 , выбранный шаг Δt моделирования, таблица 2.1 с результатами эксперимента, вывод о характере изменения показателей качества регулирования при возрастании коэффициента передачи k_p регулятора (следовательно, при возрастании коэффициента передачи разомкнутой системы).

2. **Результаты выполнения 2-го пункта работы:** переходная функция оптимальной системы по управляющему воздействию с нанесением на график всех показателей, необходимых для оценки качества регулирования; расчет перерегулирования σ и колебательности C ; вывод о том что синтезирована оптимальная по быстрдействию система с П-законом регулирования с минимальным временем $t_{рег}$ регулирования (указать численное значение $t_{рег}$) с перерегулированием $\sigma \leq 30\%$ (указать численное значение σ) и статической ошибкой $e_{ст} \leq 10\%$ (указать численное значение ошибки), колебательностью C (указать численное значение C).

3. **Результаты выполнения 3-го пункта работы:** переходная функция оптимальной системы по возмущающему воздействию с нанесением на графике всех показателей, необходимых для оценки качества регулирования; расчет перерегулирования σ_F и колебательности C ; вывод по пункту с указанием численных значений показателей качества регулирования оптимальной системы по возму-

щающему воздействию – времени регулирования $t_{рег}$, перерегулирования σ_F , колебательности C , статической ошибки $e_{ст}$.

Контрольные вопросы

1. Как изменяются показатели качества регулирования при изменении (например, увеличении) коэффициента передачи регулятора k_p ?
2. Что можно предпринять для уменьшения перерегулирования в готовой системе с П-законом регулирования? Какие отрицательные последствия это будет иметь?

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (И-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ

Количество часов аудиторных занятий – 4.

Цель работы – изучение свойств систем с И-законом регулирования, получение опыта синтеза систем путем моделирования на ЭВМ.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Какой закон регулирования называют И-законом регулирования?
2. Покажите, что система, исследуемая в этой работе, является астатической.
3. Запишите для исследуемой системы передаточные функции для ошибок по управляющему и возмущающему воздействиям и докажите, что в рассматриваемой системе отсутствуют статические ошибки.

Задание

1. Изучить, каким образом изменяются прямые показатели качества регулирования: время регулирования и перерегулирование при изменении коэффициента передачи регулятора $k_{и}$ на основании анализа переходных функций по управляющему воздействию. Определить значение $k_{и}$, соответствующее границе устойчивости системы.

Параметры объекта управления k_o , T_1 и T_2 принять такими же, как и в работе № 1 (с целью сравнения качества регулирования,

обеспечиваемого системами с П-законом и И-законом регулирования). Значения $k_{и}$, при которых проводятся исследования, задаются преподавателем с целью обеспечения наглядности результатов и сокращения времени исследования.

При оценке времени регулирования считать переходный процесс закончившимся, если регулируемая величина вошла в интервал 5 % от своего установившегося значения.

2. Синтезировать систему с максимальным быстродействием, И-законом регулирования и перерегулированием не более $\sigma \leq 30\%$. Начальные условия принять нулевыми. Условие окончания переходного процесса при оценке времени регулирования принять таким же, как и при выполнении 1-го пункта задания.

3. Оценить прямые показатели качества регулирования полученной во 2-м пункте оптимальной системы по возмущающему воздействию. Условие окончания переходного процесса при оценке времени регулирования принять таким же, как и при выполнении 1-го пункта задания.

4. Сравнить показатели качества регулирования, обеспечиваемые системами с П-законом и И-законом регулирования.

Краткие теоретические сведения к лабораторной работе

Интегральным законом регулирования называют такой закон, когда управляющее воздействие на объект управления формируется пропорционально интегралу ошибки системы:

$$X_y = k_{и} \int_0^t e \cdot dt = \frac{1}{T_{и}} \int_0^t e \cdot dt,$$

где $T_{и}$ – постоянная интегрирования регулятора.

При выполнении этой работы используются теоретические сведения, приведенные в предыдущей работе.

Задача синтеза в работе ставится следующим образом.

Критерием оптимальности является быстродействие системы, которое оценивается временем регулирования $t_{пер}$. Время $t_{пер}$ должно быть минимальным.

Ограничением является перерегулирование $\sigma \leq 30\%$. К ограничению следует отнести и решение задачи в рамках И-закона регулирования.

Граничные условия определяются нулевыми начальными условиями и условием окончания переходного процесса при определении времени регулирования.

Порядок выполнения работы

1. Изучение изменения показателей качества регулирования при изменении коэффициента передачи регулятора

Изобразить структурную схему исследуемой системы с И-законом регулирования. Для этого из структурной схемы на рисунке 2.1 должны быть изъяты звенья с передаточными функциями k_p и $k_d p$, образующие пропорциональный и дифференциальный каналы регулирования. Сумматор сигналов X_p , X_i и X_d каналов регулирования также должен быть изъят.

Задать в программе SUA-SAR2 параметры объекта управления k_o , T_1 и T_2 . Задать наименьшее значение k_i , задать нулевые значения k_p и k_d . Задать управляющее воздействие на систему $X_3 = 1$ и возмущающее воздействие $F = 0$. Задать начальное значение сигнала $X_{i,0} = 0$ интегрального канала регулирования (начальное значение интегральной составляющей X_i).

Задать шаг Δt моделирования. Шаг моделирования выбираем так же, как и в предыдущей работе.

Задать время моделирования. Время моделирования должно быть выбрано экспериментально из условия окончания переходного процесса при определении времени регулирования.

Промоделировать работу системы. Построить с помощью системы «grafit» графики задающего воздействия $X_3(t)$ и переходной функции $Y(t)$ с координатной сеткой.

Оценить значения показателей σ и $t_{\text{пер}}$ по графику переходной функции. Занести значения показателей в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

k_i	$\sigma, \%$	$t_{\text{пер}}, \text{с}$

Повторить опыты для всех остальных значений k_i в порядке их возрастания (в программе менять только значения k_i и, при необходимости, время моделирования).

Примечание. При больших значениях k_i переходная функция слабо затухает, поскольку система приближается к границе устойчивости, потом систем становится неустойчивой. В этих условиях определение времени регулирования становится практически невозможным и делать этого не следует.

Определить значение k_i , соответствующее границе устойчивости системы.

После окончания всех опытов сделать выводы о характере изменения качества регулирования (перерегулирования и быстродействия) при возрастании коэффициента передачи k_i регулятора. Указать на то, что система при больших k_i становится неустойчивой и указать численное значение k_i на границе устойчивости.

2. Синтез системы с максимальным быстродействием

Для выполнения пункта воспользуемся результатами опытов, проведенных в 1-м пункте работы.

Из таблицы 2.2 выбрать вариант с минимальным временем $t_{\text{пер}}$ при перерегулировании не более 30 %. Затем, при необходимости можно уточнить значение k_i с целью увеличения быстродействия при сохранении ограничения на перерегулирование.

Оценить качество регулирования полученной системы. Для этого построить с помощью «grafit» переходную функцию полученной системы с координатной сеткой. Построить эту функцию в отчете с нанесением всех параметров, как показано на рисунке 2.2, за исключением статической ошибки, поскольку для исследуемой системы она отсутствует. Рассчитать в отчете перерегулирование σ и колебательность S .

Сделать выводы по пункту.

В выводах указать, что синтезирована оптимальная по быстродействию система с интегральным законом регулирования и перерегулирования $\sigma \leq 30 \%$. Далее указать коэффициент k_i передачи регулятора полученной системы. Указать также все полученные показатели качества регулирования.

3. Оценка качества регулирования полученной оптимальной системы по возмущающему воздействию

В программе SUA-SAR2 задать управляющее воздействие на систему $X_3=0$, возмущающее воздействие на систему $F = 1$ (или $F = -1$). Остальные параметры оставить без изменений.

Промоделировать работу системы. Построить с помощью системы «grafit» график переходной функции $Y(t)$ по возмущающему воздействию

с координатной сеткой. Построить эту функцию в отчете с нанесением всех параметров, как показано на рисунке 2.3, за исключением статической ошибки. Рассчитать в отчете σ_F и колебательность C .

Сделать вывод по пункту.

В выводе перечислить полученные показатели качества регулирования по возмущающему воздействию с указанием численных значений этих показателей.

4. Сравнение показателей качества регулирования, обеспечиваемых системами с П-законом и И-законом регулирования

Воспользовавшись данными таблицы 2.1. и 2.2, а также показателями качества регулирования оптимальных систем, сравнить качество регулирования, обеспечиваемое системами с пропорциональным и интегральным законами. Сделать вывод о преимуществах и недостатках изученных систем.

Выводы должны быть аргументированы. Поэтому в отчете необходимо привести и сравнить численные значения времени регулирования при близких перерегулированиях для 2-х или 3-х случаев из таблиц 2.1 и 2.2.

Сравнить показатели – время регулирования, перерегулирование, колебательность для оптимальных систем по управляющему и возмущающему воздействиям.

Сделать вывод о статической точности этих систем (о наличии статических ошибок), исходя из теоретических соображений, подтвержденных результатами моделирования.

После этого записать общие выводы о преимуществе той или иной системы по этим показателям.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения 1-го пункта работы: структурная схема системы с И-законом регулирования с численными значениями коэффициента передачи k_o объекта, постоянными времени T_1 и T_2 ; выбранный шаг Δt моделирования; таблица 2.2 с результатами эксперимента; вывод о характере изменения показателей качества регулирования при возрастании коэффициента интегрирования $k_{и}$

(уменьшении постоянной интегрирования $T_{и}$) регулятора; численное значение $k_{и}(T_{и})$ на границе устойчивости.

2. Результаты выполнения 2-го пункта работы: переходная функция оптимальной системы по управляющему воздействию с нанесением на графике всех показателей, необходимых для оценки качества регулирования; расчет перерегулирования σ и колебательности C ; вывод о том, что синтезирована оптимальная по быстродействию система с И-законом регулирования с минимальным временем $t_{пер}$ регулирования (указать численное значение $t_{пер}$) с перерегулированием $\sigma \leq 30\%$ с указанием численного значения σ и колебательности C (указать численное значение C).

3. Результаты выполнения 3-го пункта работы: переходная функция оптимальной системы по возмущающему воздействию с нанесением на графике всех показателей, необходимых для оценки качества регулирования; расчет перерегулирования σ_F и колебательности C ; вывод по пункту с указанием численных значений показателей качества регулирования оптимальной системы по возмущающему воздействию: время регулирования $t_{пер}$, перерегулирование σ_F , колебательности C .

4. Результаты выполнения 4-го пункта работы: выводы, в которых необходимо сравнить качество регулирования систем с П-законом регулирования и И-законом регулирования, оценить достоинство и недостатки этих систем.

Контрольные вопросы

1. Как изменяются показатели качества регулирования при изменении коэффициента интегрирования регулятора?
2. Какое преимущество обеспечивает И-закон регулирования по сравнению с П-законом регулирования?
3. Каковы недостатки систем с И-законом регулирования?

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА СВОЙСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Количество часов аудиторных занятий – 4.

Цель работы – изучение влияния дифференциальной составляющей закона регулирования на свойства систем автоматического регулирования.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Что понимают под дифференциальной составляющей закона регулирования?
2. Сформулируйте определение ПД-закона регулирования?
3. Сформулируйте определение ПИД-закона регулирования?
4. Почему не используют дифференциальную (Д) составляющую самостоятельно, а только в составе ПД и ПИД-законов регулирования?

Задание

Изучить влияние введения дифференциальной составляющей на показатели качества регулирования.

Параметры объекта управления k_0 , T_1 и T_2 принять такими же, как и в работе №1. Значения k_p и k_d , при которых проводятся исследования, задаются преподавателем с целью обеспечения наглядности результатов и сокращения времени исследования.

При оценке времени регулирования считать переходный процесс закончившимся, если регулируемая величина вошла в интервал 5 % от своего установившегося значения.

Краткие теоретические сведения к лабораторной работе

Дифференциальная составляющая позволяет обеспечить изменение управляющего воздействия на объект в зависимости от производной ошибки de/dt . Очевидно, что при постоянном значении ошибки e , составляющая управляющего воздействия на объект по дифференциальному каналу регулирования равна 0. Это не позволяет использовать дифференциальный канал регулирования самостоятельно. Однако такой канал используется в составе пропорционально-дифференциального закона (ПД-закона) и пропорционально-интегрально-дифференциального закона (ПИД-закона) регулирования для улучшения качества процесса регулирования.

Пропорционально-дифференциальным законом регулирования называют такой закон, при котором управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально производной ошибке системы:

$$X_y = k_p \cdot e + k_d \frac{de}{dt} = k_p \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right),$$

где k_d – коэффициент передачи дифференциального канала регулирования;

T_d – постоянная дифференцирования регулятора.

Пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования называют такой закон, при котором управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке, пропорционально интегралу ошибки и пропорционально производной ошибки:

$$X_y = k_p e + k_i \int_0^t e \cdot dt + k_d \frac{de}{dt} = k_p e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt + T_d \frac{de}{dt}.$$

В лабораторной работе влияние дифференциальной составляющей будем изучать на примере ПД-закона регулирования.

Порядок выполнения работы

Изобразить структурную схему исследуемой системы с ПД-законом регулирования. Для этого из структурной схемы на рисунке 2.1 должно быть изъято звено с передаточной функцией k_n/p , образующее интегральный канал регулирования.

Задать в программе SUA-SAR2 параметры объекта управления k_0 , T_1 и T_2 . Задать нулевое значение k_n , задать управляющее воздействие на систему $Y_3 = 1$ и возмущающее воздействие $F = 0$. Задать начальное значение регулируемой величины $Y_0 = 0$. Задать начальное значение сигнала $X_n = 0$ интегрального канала регулирования (начальное значение интегральной составляющей X_n).

Задать шаг Δt моделирования. Шаг моделирования выбрать не более одной десятой минимальной постоянной времени в системе. Для гарантии уменьшить его не менее чем в 10 раз.

Задать время моделирования. Время моделирования должно быть выбрано экспериментально. За время моделирования переходная функция должна почти полностью закончиться.

1. Промоделировать работу системы с заданным преподавателем постоянным значением коэффициента k_p передачи пропорционального канала регулирования и заданными преподавателем коэффициентами k_d дифференциального канала регулирования. Заполнить таблицу 2.3 с данными о численных значениях показателей качества регулирования: перерегулирования σ ; время регулирования $t_{пер}$; квадратичным интегральным критерием качества I_2 ; статической ошибкой $e_{ст}$.

Таблица 2.3

Номер опыта	k_p	k_d	$\sigma, \%$	$t_{пер}, \text{°C}$	I_2	$e_{ст}$
1						
2						
...						

На основании анализа данных таблицы 2.3 сделать выводы о влиянии коэффициента передачи k_d (его изменения) на динамические показатели качества регулирования.

2. Промоделировать работу системы с заданными преподавателем постоянным значением коэффициента k_p (примерно в 2 раза больше чем в 1-ом пункте) и заданными преподавателем коэффи-

циентами k_d дифференциального канала регулирования. Заполнить таблицу 2.4 с данными численных значений показателей качества регулирования.

Таблица 2.4

Номер опыта	k_p	k_d	$\sigma, \%$	$t_{пер}, \text{°C}$	I_2	$e_{ст}$
1						
2						
...						

На основании анализа данных таблицы 2.4 сделать выводы о том, что дифференциальная составляющая позволяет существенно увеличить значение k_p и за счет этого уменьшить статическую ошибку и улучшить динамические показатели качества регулирования.

Содержание отчета

Структурная схема исследуемой системы с заданными значениями k_0 , T_1 и T_2 , выбранный шаг моделирования.

1. Результаты выполнения пункта 1 работы с таблицей 2.3 и выводами.
2. Результаты вычисления пункта 2 работы с таблицей 2.4 и выводами.

Контрольные вопросы

1. Каково общее влияние введения дифференциального канала регулирования на динамические показатели качества регулирования?
2. Почему введение дифференциального канала регулирования позволяет уменьшить статическую ошибку системы с ПД-законом регулирования?
3. Почему не применяют дифференциальный закон регулирования самостоятельно?

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы – получение навыков выбора закона регулирования и оптимальных параметров регулятора путем моделирования на ЭВМ.

Вопросы для проверки готовности студентов к лабораторному занятию

1. Приведите определение каждого из типовых законов регулирования.
2. Приведите сравнительную характеристику свойств систем с типовыми законами регулирования.
3. Запишите выражение для интегрального квадратичного критерия качества и поясните смысл использования этого критерия.
4. Изложите общий порядок синтеза систем путем моделирования на ЭВМ (в рамках материала этой работы).

Задание

1. Синтезировать систему автоматического регулирования по интегральному квадратичному критерию качества регулирования с наиболее простым из возможных линейным законом регулирования при ограничениях на время регулирования $t_{\text{пер}} \leq t_{\text{пер.max}}$ перерегулирование ($\sigma \leq 30\%$), коэффициент передачи пропорционального канала регулирования ($k_p \leq 5$) и статическую ошибку, равную нулю. Начальные условия принять нулевыми.

Параметры объекта управления k_0 , T_1 и T_2 принять такими же, как и в работах 1 и 2.

Максимальное допустимое время регулирования $t_{\text{пер.max}}$ задается преподавателем.

Условия оценки времени регулирования принять такими же, как и в предыдущих работах.

2. Сравнить показатели качества регулирования полученной оптимальной системы и оптимальных систем с П-законом регулирования и И-законом регулирования.

Краткие теоретические сведения к лабораторной работе

Наиболее часто используют следующие линейные законы регулирования, которые иногда называют типовыми линейными законами регулирования.

Пропорциональный (П-закон), когда управляющее воздействие X_y на объект формируется пропорционально ошибке e :

$$X_y = k_p \cdot e.$$

Интегральный закон (И-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально интегралу ошибки:

$$X_y = k_i \int_0^t e \cdot dt = \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt.$$

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально интегралу ошибки:

$$X_y = k_p \cdot e + k_i \int_0^t e \cdot dt = k_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt \right).$$

Пропорционально дифференциальный закон (ПД-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально производной ошибки:

$$X_y = k_p \cdot e + k_d \frac{de}{dt} = k_p \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right),$$

где $T_{д1} = T_d / k_p$; T_d – постоянная дифференцирования.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке, пропорционально интегралу ошибки и пропорционально производной ошибки:

$$X_y = k_p \cdot e + k_i \int_0^t e \cdot dt + k_d \frac{de}{dt} = k_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt + T_d \frac{de}{dt} \right).$$

Промышленностью выпускаются регулирующие блоки (регуляторы), которые позволяют реализовать эти законы регулирования (как правило, в приближенном виде).

Широкое применение получили также наиболее простые нелинейные законы регулирования – *позиционные законы регулирования*, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд дискретных значений в зависимости от ошибки системы. Промышленностью выпускаются двух и трехпозиционные регулирующие блоки (регуляторы), позволяющие в зависимости от ошибки формировать на объект управления два постоянных по величине управляющих воздействия с помощью двухпозиционного регулятора и три постоянных по величине управляющих воздействия с помощью трехпозиционного регулятора.

В предыдущих работах мы рассмотрели системы с П-законом, И-законом и ПД-законом регулирования и убедились, что свойства систем во многом зависят от используемых законов, что подтверждается и теорией и результатами моделирования.

П-закон обеспечивает хорошее быстродействие, но при статическом объекте управления система работает со статической ошибкой.

И-закон позволяет избавиться от статической ошибки по управляющему воздействию и при статическом объекте – от статической ошибки по возмущающему воздействию, но быстродействие системы невысокое.

ПИ-закон сочетает положительные свойства систем с П-законом и И-законом, поэтому он обеспечивает хорошее быстродействие и отсутствие статических ошибок.

Введение регулирования по производной в ПД-законе повышает быстродействие системы и подавляет ее колебательность, однако не позволяет избавиться полностью от статических ошибок.

ПИД-закон сочетает положительные свойства, обеспечиваемые рассмотренными выше законами. Системы с ПИД-законом по сравнению с системами с другими типовыми законами обладают повышенным быстродействием, меньшей колебательностью и отсутствием статических ошибок.

Знание свойств систем с различными законами регулирования позволяет выдвинуть рабочую гипотезу о том, какой закон регулирования можно использовать, исходя из требований к системе. Путем моделирования оптимизировать параметры закона регулирования и проанализировать качество полученной системы, таким образом, подтвердить или опровергнуть гипотезу. В случае, если гипотеза не подтвердилась, следует перейти к закону, который может обеспечить лучшее качество регулирования.

При более подробном исследовании моделирование позволяет учесть особенности реализации закона регулирования (приближенной реализации). При этом достоверность результатов существенно повышается.

Критерии оптимальности систем могут быть различными. В предыдущих работах в качестве примера мы использовали быстродействие ($t_{пер}$). Наиболее часто, если нет специальных требований, используют интегральный квадратичный критерий качества регулирования:

$$I_2 = \int_0^{\infty} (Y_{уст} - Y)^2 \cdot dt \rightarrow \min.$$

Очевидно, чем меньше I_2 , тем переходный процесс системы в среднем за время регулирования ближе к идеальному переходному процессу (когда разность $Y_{уст} - Y(t)$ вообще бы отсутствовала).

Недостатком систем, синтезированных по критерию I_2 , является повышенное перерегулирование. Однако этот недостаток можно обойти путем введения ограничения на перерегулирование, что у нас и сделано в «задании».

Порядок выполнения работы

1. Синтез системы автоматического регулирования

1. Опровергнуть гипотезу о возможности применения П-закона регулирования. Это можно сделать теоретически на том основании,

что в нашем случае система с П-законом обладала бы статической ошибкой. В отчете это надо доказать, приведя для рассматриваемой системы выражения для ошибок.

2. Опровергнуть гипотезу о возможности применения И-закона регулирования. Теоретически это сделать затруднительно. Зато у нас есть результаты 3-ей работы, которые и надо рассмотреть в отчете к этой работе.

3. Сформулировать рабочую гипотезу о возможности применения ПИ-закона регулирования и оптимизировать значение параметров k_p и $k_{ин}$ закона регулирования.

В рассматриваемом случае два параметра. Найти их оптимальное сочетание более сложная задача, чем найти оптимальное значение одного параметра, как было в 1-ой и 2-ой работах. В этом случае есть все основания обратиться к теории планирования эксперимента. Изучение теории планирования эксперимента в нашу задачу не входит, поэтому воспользуемся наиболее простым методом, который называют методом сканирования. Согласно этому методу значение одного из параметров фиксируют, а другой изменяют с выбранным шагом. Затем опыты повторяют с другим фиксированным значением 1-го параметра. Таким образом, в итоге находят оптимальное сочетание значений параметров. В нашем случае это сочетание должно обеспечить минимальное значение I_2 при соблюдении всех ограничений.

Матрица (таблица) плана эксперимента приведена ниже.

В верхней горизонтальной строке таблицы записаны значения коэффициента k_p ($k_{p,1} \dots k_{p,i} = 5$) с выбранным шагом.

В левом вертикальном столбце записаны значения $k_{ин}$ ($k_{ин,1} \dots k_{ин,n}$) с выбранным шагом.

В столбцах необходимо записывать значения I_2 , полученные в каждом опыте при соответствующих сочетаниях k_p и $k_{ин}$.

В каждом столбце опыты проводятся до тех пор, пока I_2 убывает, перерегулирование не превышает 30 % и время регулирования не превышает $t_{пер.макс}$. Рядом с такими значениями I_2 необходимо сделать пометку, почему прекращены опыты с данным k_p .

Матрица плана эксперимента

k_p	k_{pi}	$k_{pi} = 5$
$k_{и1}$	I_2		I_2
.			
.			
.			
.			
$k_{ин}$			

Программа SUA-SAR2 обеспечивает расчет I_2 и вывод его значения на экран дисплея. *Строить каждый раз переходные процессы не обязательно.* Вам на это не хватит времени.

С целью наглядности результатов и сокращения времени исследования значения k_p и $k_{ин}$ в строке и столбце таблицы может задать преподаватель.

Шаг моделирования выбрать такой же, как в предыдущих работах. Время моделирования выбрать экспериментально и как можно большим так, чтобы переходной процесс практически заканчивался при самых маленьких значениях k_p и $k_{ин}$.

После окончания всех опытов выбираем результат с наименьшим значением I_2 при перерегулировании $\delta \leq 30\%$ и времени $t_{пер} \leq t_{пер.макс}$.

Это и есть наши оптимальные значения параметров k_p и $k_{ин}$ с точностью до шага изменения k_p и $k_{ин}$ (если результат достигнут в рамках ПИ-закона). В лабораторной работе об этом позаботился преподаватель, задав вам $t_{пер.макс}$ и параметры объекта. На практике это вовсе не обязательно и вполне возможно пришлось бы формировать следующую рабочую гипотезу.

Построить переходные процессы полученной оптимальной системы по управляющему и возмущающему воздействиям на экране дисплея и затем в отчете. Время построения переходного процесса выбрать таким, чтобы переходный процесс был виден в хорошем масштабе для определения всех показателей качества регулирования.

Показать на графиках все параметры (как на рис. 2.2 и 2.3), считать σ , σ_F , C и C_F .

Сделать выводы. В выводах указать закон регулирования оптимальной системы, изобразить структурную схему полученной системы, привести численные значения оптимальных параметров и все показатели качества регулирования.

2. Сравнение показателей качества регулирования полученной оптимальной системы с оптимальными системами с П-законом и И-законом регулирования

В этом пункте сравнить все показатели качества регулирования, указав, в какой системе они лучше, и сделать общий вывод о том, какая система обеспечивает лучшее качество регулирования.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения пункта 1 работы.
2. Результаты выполнения пункта 2 работы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение типовым законам регулирования.
2. Опишите свойства систем с типовыми линейными законами регулирования.

Третий цикл. Исследование позиционного регулятора и позиционных систем

Краткие теоретические сведения к циклу лабораторных работ

Позиционной называют систему, в которой управляющее воздействие на объект ступенчато изменяется в зависимости от уровня ошибки.

Соответственно, *позиционным* называют закон регулирования, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд постоянных дискретных значений (изменяется ступенчато) в зависимости от ошибки системы.

Позиционные системы относятся к наиболее простым и распространенным *релейным системам*.

Двухпозиционной САР называется система, в которой управляющее воздействие на объект приобретает два значения.

Трехпозиционной САР называется система, в которой управляющее воздействие на объект приобретает три значения.

Существуют также четырехпозиционные системы и т.д.

Примерами позиционных систем являются системы регулирования температуры в холодильнике, температуры подошвы утюга. Эти системы являются двухпозиционными, поскольку управляющее воздействие на объект принимает два значения. Например, при пониженной температуре подошвы утюга питание нагревательного элемента включается, при повышенной температуре — выключается.

В сельском хозяйстве позиционное регулирование применяется в системах регулирования микроклимата животноводческих помещений, регулирования температуры инкубаторов, температуры теплоносителя зерновых сушилок и т.д.

Рассмотрим работу позиционных систем на примерах САР температуры сушильной камеры с одним нагревательным элементом ЕК (двухпозиционная) и с двумя — ЕК₁ и ЕК₂ (трехпозиционная).

Принципиальная схема двухпозиционной САР изображена на рисунке 3.1, ее структурная схема изображена на рисунке 3.2.

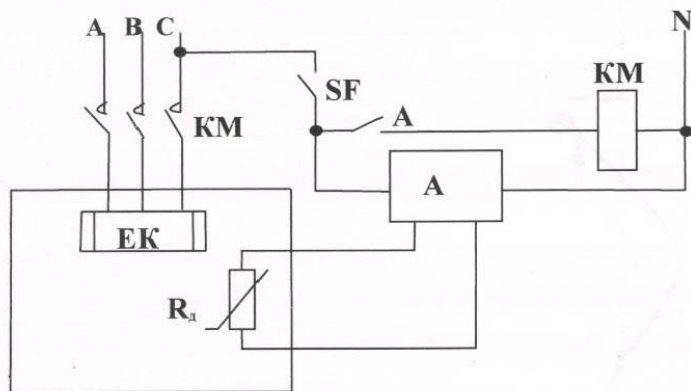


Рис. 3.1. Принципиальная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры: ЕК – нагревательный элемент; А – регулирующий блок; R_d – датчик (термометр сопротивления); А – контакт выходного реле регулирующего блока

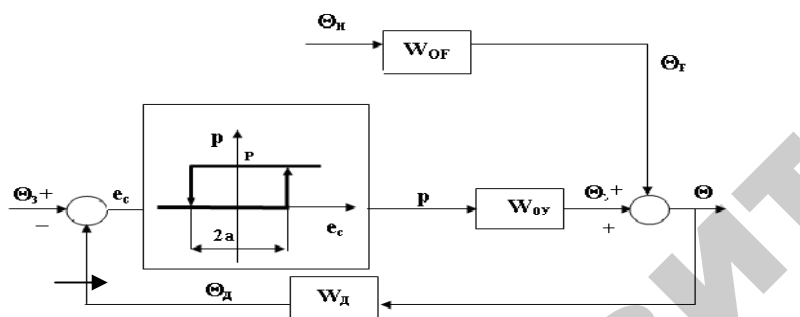


Рис. 3.2. Структурная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры: Θ_3 – заданная температура; e_c – сигнал ошибки; P – мощность нагревателя; Θ_H – температура наружного воздуха (возмущающее воздействие); Θ_F – приращение температуры в камере от изменения наружной температуры; Θ_Y – приращение температуры в камере от работы нагревателя; Θ – температура в камере; Θ_d – сигнал датчика; $2a$ – ширина зоны неоднозначности регулятора; W_{oy} – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию; W_{of} – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию; W_d – передаточная функция датчика

При составлении структурной схемы нагреватель ЕК отнесен к объекту управления. Коэффициент передачи датчика перенесен в релейную характеристику регулирующего блока, поэтому сигнал e_c ошибки имеет размерность температуры.

Воздух в сушильной камере нагревается элементом ЕК. Температура воздуха Θ регулируется двухпозиционным регулятором А. При включении системы температура в камере меньше заданной, ошибка положительна и превышает половину зоны неоднозначности a . Реле на выходе регулирующего блока А включается, и его замыкающий контакт А включает магнитный пускатель КМ, который своими контактами запитывает нагревательный элемент ЕК. Начинается нагрев камеры. При повышении температуры до заданной Θ_3 плюс половина зоны неоднозначности a , когда сигнал e_c ошибки станет равен $-a$, реле на выходе регулирующего блока выключится, контакт А разомкнется, магнитный пускатель КМ выключится и обесточит нагревательный элемент ЕК. В результате температура в сушильной камере начинает снижаться. Реле снова включится, когда сигнал ошибки станет равен $+a$.

Процесс нагрева и охлаждения воздуха в сушильной камере повторяется. В сушильной камере устанавливается режим периодического нагрева и охлаждения.

Такие установившиеся режимы работы называют автоколебательными. Автоколебательные режимы часто возникают в нелинейных системах. В частности, они характерны для позиционных систем. На рисунке 3.3 изображен процесс регулирования температуры в сушильной камере после включения системы.

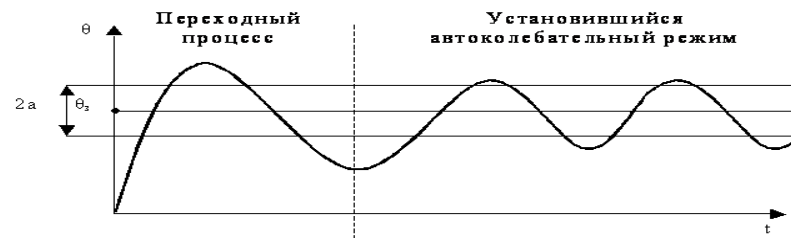


Рис. 3.3. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый двухпозиционной системой

Размах автоколебаний больше ширины зоны неоднозначности $2a$, что обусловлено инерционностью датчика и объекта управления. В нашем примере за счет инерционности датчика сигнал ошибки отстает от температуры в камере, поэтому реле срабатывает позже. Кроме того, снижение (повышение) температуры начинается не сразу, а после того как нагревательный элемент несколько охладится (нагреется).

При увеличении возмущающего воздействия (в нашем случае температуры наружного воздуха) автоколебания несколько смещаются вверх, при снижении — вниз.

Показателями качества регулирования для двухпозиционных систем являются отклонение регулируемой величины от заданного значения (в нашем случае от заданной температуры Θ_3) и частота автоколебаний. Быстродействие системы определяется временем установления автоколебаний.

Параметрами настройки регулятора являются заданное значение регулируемой величины (в нашем случае Θ_3) и ширина зоны неоднозначности $2a$.

Исследование режимов работы позиционных систем проводится методами припасовывания, гармонического баланса и фазовой плоскости. Наиболее точным, удобным и наименее трудоемким методом исследования является моделирование на ЭВМ. В процессе таких исследований и определяются параметры настройки регулятора.

Рассмотрим пример устройства, структуру и режимы работы трехпозиционных систем. Принципиальная схема трехпозиционной САР изображена на рисунке 3.4, ее структурная схема изображена на рисунке 3.5.

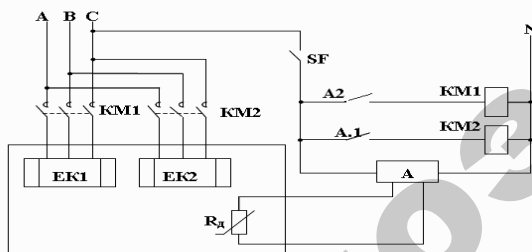


Рис. 3.4. Принципиальная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры: EK1 и EK2 – нагревательные элементы; А – регулирующий блок; R_d – датчик температуры (термометр сопротивления); А.1 и А.2 – контакты выходных реле регулирующего блока

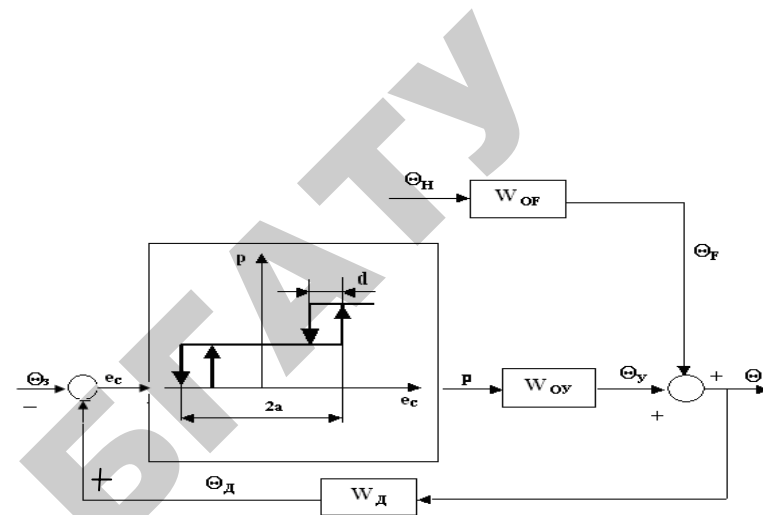


Рис. 3.5. Структурная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:

Θ_3 – заданная температура; e_c – сигнал ошибки; P – мощность нагревателя; Θ_n – температура наружного воздуха; Θ_F – приращение температуры в камере от изменения температуры наружного воздуха; Θ_y – приращение температуры в камере от работы нагревателей; Θ – температура в камере; Θ_d – сигнал датчика; $2a$ – ширина зоны нечувствительности; d – зоны неоднозначности (дифференциалы); W_{oy} – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию; W_F – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию; W_d – передаточная функция датчика

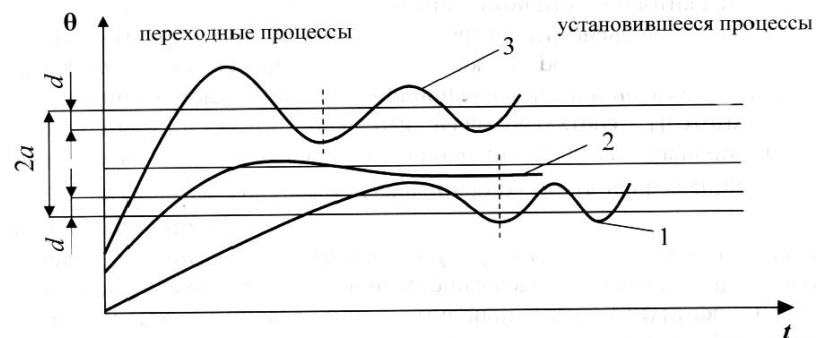


Рис. 3.6. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый трехпозиционной системой:

1 – режим автоколебаний около нижней зоны неоднозначности d ; 2 – статический установившийся режим; 3 – режим автоколебаний около верхней зоны неоднозначности d

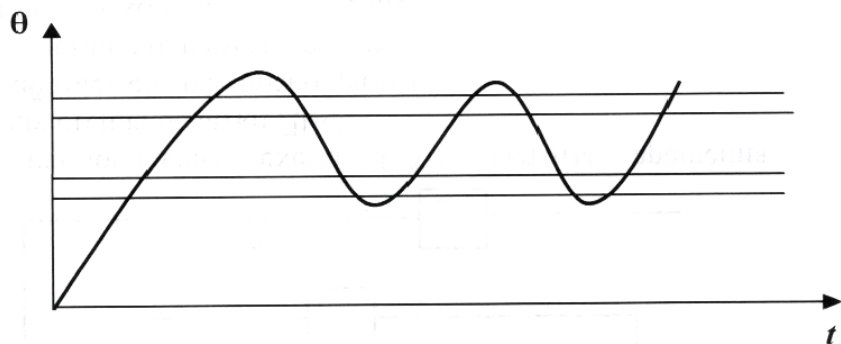


Рис. 3.7. Режим трехпозиционных автоколебаний в трехпозиционной системе

После включения системы срабатывают оба реле регулирующего блока А, поэтому пускатели КМ1 и КМ2 запитывают оба нагревателя ЕК1 и ЕК2. Температура в сушильной камере быстро растет. Когда температура входит в зону нечувствительности $2a$ плюс дифференциал d , ошибка становится меньше $a-d$ и первое реле отключается, пускатель КМ1 обесточивает нагревательный элемент ЕК1. Далее возможны три варианта работы системы.

1. Если мощности второго нагревательного элемента ЕК2 не хватает для дальнейшего повышения температуры или удержания ее в зоне нечувствительности, температура начинает снижаться. После выхода температура из зоны нечувствительности нагревательный элемент ЕК1 опять включится и температура начнет подниматься. В результате возникают автоколебания около нижней зоны неоднозначности d (рис. 3.6, график 1).

2. Если мощности второго нагревательного элемента ЕК2 хватает для удержания температуры в зоне нечувствительности, то в системе устанавливается статический установившийся режим (рис. 3.6, график 2).

3. Если мощности второго нагревателя хватает для дальнейшего повышения температуры, то после выхода температуры из зоны нечувствительности срабатывает второе реле, размыкается контакт А.2 и пускатель КМ2 обесточивает нагревательный элемент ЕК2. Температура начинает понижаться. После входа температуры в зону нечувствительности, когда ошибка становится меньше $a-d$, второе реле выключается, контакт А.2 замыкается, пускатель запитывает нагревательный элемент ЕК2, температура начинает повышаться.

В работающей системе переход из одного режима в другой происходит при изменении возмущающего воздействия (в нашем примере при изменении температуры наружного воздуха). При повышении температуры автоколебания смещаются вверх, при понижении температуры — вниз.

Если система неправильно разработана или настроена, например, при установке слишком узкой зоны нечувствительности, в трехпозиционной системе могут возникать трехпозиционные автоколебания (рис. 3.7). При этом режим работы сходен с режимом работы двухпозиционной системы. Как правило, такая работа системы неприемлема с технологической точки зрения. Например, в системах управления температурой животноводческих помещений это приведет к недопустимой разнице между температурой подаваемого в помещение воздуха и температурой воздуха в помещении. Кроме того, повышается амплитуда колебаний температуры. Многопозиционное регулирование применяют, в основном по технологическим соображениям.

Параметрами настройки регулятора трехпозиционной системы являются заданное значение регулируемой величины (в нашем случае Θ_3) и ширина зоны нечувствительности $2a$. В некоторых современных регуляторах можно также изменять дифференциалы d .

Параметрами качества регулирования являются отклонения регулируемой величины от заданного значения, частота и амплитуда автоколебаний. Быстродействие системы определяется временем перехода системы в установившийся режим работы.

Аппаратное и программное обеспечение лабораторных работ

Лабораторная установка выполнена на базе цифрового измерителя-регулятора МТ2141, предназначенного для измерения и регулирования температуры, магазина сопротивлений, имитирующего датчик температуры – термометр сопротивления и ПЭВМ для моделирования режимов работы позиционных систем.

Регулятор позволяет реализовать двух-, трехпозиционные законы регулирования и ПИД-закон регулирования в нелинейной приближенной реализации. Для этого регулятор снабжен двумя программируемыми каналами регулирования с релейными выходами К1, К2.

К регулятору в качестве датчика могут быть подключены платиновые и медные термометры сопротивления 100П и 100М с номинальным сопротивлением при 0 °С 100 Ом, термопары, токовые и потенциальные датчики. Перечень датчиков и их параметры приведены в инструкции по эксплуатации.

В данной работе регулятор запрограммирован на термометр сопротивления 100М ($W_{100} = 1,426$). Это значит, что его сопротивление при 100 °С составляет 142,6 Ом.

Для моделирования систем на ПЭВМ используется программа AVT3.

Общая структурная схема программа AVT3 изображена на рисунке 3.8.

Программа AVT3 предназначена для моделирования двух- и трехпозиционных систем и может быть использована для моделирования многопозиционных систем.

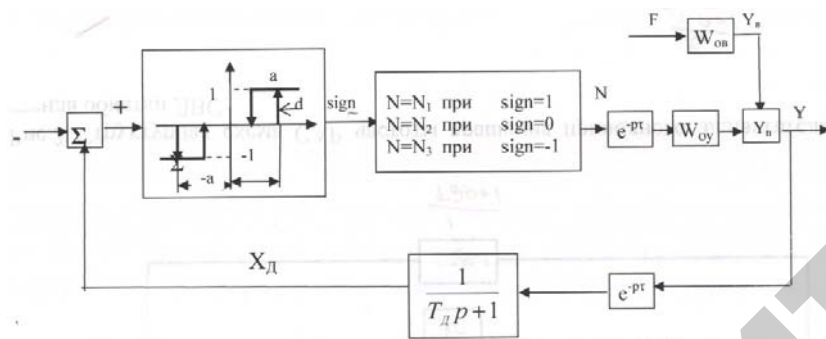


Рис. 3.8. Общая структура программы AVT3

Структура объекта управления по управляющему воздействию W_{oy} может быть выбрана различной в зависимости от сигнала позиционного элемента (1; 0; -1):

$$W_{oy} = \frac{K_y}{T_{1y}p + 1} \quad \text{или} \quad W_{oy} = \frac{K_y}{T_{2y}^2 p^2 + T_{1y}p + 1}.$$

Структура объекта управления по возмущающему воздействию с передаточной функцией W_{ov} может быть выбрана также из 2-х вариантов:

$$W_{of} = \frac{K_F}{T_{1F}p + 1} \quad \text{или} \quad W_{of} = \frac{K_F}{T_{2F}^2 p^2 + T_{1F}p + 1}.$$

Программа имеет главное меню:

- структура системы;
- параметры объекта управления;
- параметры закона управления;
- параметры датчика;
- состояние объекта, воздействия.

Нижняя строка экрана содержит подсказки для работы с программой.

Структура системы, ее параметры, управляющее воздействие, начальное состояние объекта управления задаются при работе с соответствующими пунктами меню, где они могут быть заданы и изменены в любой последовательности.

Изменения могут быть внесены и после построения графиков с использованием системы «Grafit».

Для этого предусмотрен вход в «Grafit» без выхода из программы. Моделирование двухпозиционной системы осуществляется заданием $d = 2a$ и $N_2 = 0$ в пункте меню «Параметры закона управления».

Программа AVT3 может быть заменена на другое программное обеспечение. В этом случае к методическим указаниям будет приложена специальная инструкция по использованию этого программного обеспечения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА И ДВУХПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ

Количество часов аудиторных занятий – 4.

Цель работы – исследование двухпозиционного регулятора на примере регулятора температуры и режимов работы двухпозиционных систем, на примере САР температуры сушильной камеры.

Вопросы для проверки готовности к лабораторному занятию

1. Сформулируйте определения позиционных законов регулирования.
2. Сформулируйте определение 2-х позиционного закона регулирования.
3. Перечислите режимы работы двухпозиционных систем автоматического регулирования.

Задание

1. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 на двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры. Заданную температуру Θ_3 , ширину зоны неоднозначности 2а задает преподаватель.
2. Снять статическую характеристику регулятора в функции сопротивления датчика. По снятой характеристике рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.
3. Промоделировать работу САР, постепенно повышая температуру наружного воздуха (возмущающего воздействия) с увеличени-

ем возмущающего воздействия от 0 до Θ_3 с шагом, заданным преподавателем.

Структурная схема заданной САР изображена на рисунке 2. На структурной схеме: $W_{oy} = \frac{K_y}{T_{1y}p+1} e^{-p\tau}$; $W_d = \frac{1}{T_d p+1}$; $W_{of} = \frac{K_F}{T_{1F}p+1}$.

Параметры K_y , T_{1y} , τ , T_d , K_F , T_{1F} , P_3 задаются преподавателем.

Порядок выполнения работы

1. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

У прибора имеются три уровня программирования: конфигурационный, параметрический и рабочий. Переход от одного уровня ко второму осуществляется при нажатом состоянии операторной кнопки \blacklozenge .

1.1. Для задания параметров на конфигурационном уровне программирования Conf необходимо на панели регулятора нажать кнопку \blacklozenge и удерживать до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Conf.

Программируемые параметры \blacktriangledown появляются последовательно при нажатии операторной кнопки \blacktriangledown .

На данном уровне необходимо задать положение десятичной точки Pnt - x1. Выбор разряда производится нажатием кнопки \blacklozenge .

Выбранные значения подтверждаются одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \blacktriangledown$, причем первой нажимается кнопка \blacklozenge .

Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок $\blacktriangledown + \blacktriangle$.

1.2. Для задания параметров на параметрическом уровне программирования Par необходимо на панели регулятора нажать кнопку \blacklozenge и удерживать до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Par.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки ∇ .

На данном уровне программирования задаем значения ширины зоны неоднозначности 2а для выхода К1 (HYS1). Для этого нажимаем операторную кнопку ∇ , пока на индикаторе прибора не появится сообщение HYS1, затем выбор численного значения ширины зоны нечувствительности производится нажатием операторной кнопки \blacklozenge . Выбранное значение подтверждается одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \nabla$, причем первой нажимается кнопка \blacklozenge .

Далее выбираем направление регулирования. Для этого нажимаем операторную кнопку ∇ , пока на индикаторе не появится сообщение dir. С помощью операторной кнопки \blacklozenge выбираем направление регулирования (нагрев) и выбор подтверждаем одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \nabla$, причем первой нажимается кнопка \blacklozenge .

Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок $\nabla + \blacktriangle$.

1.3. На рабочем уровне задаем значение температуры Θ_3 (центр ширины зоны неоднозначности 2а).

Для этого нажимаем операторную кнопку \blacktriangle и не отпуская ее нажимаем операторную кнопку \blacklozenge , с помощью операторной кнопки \blacktriangle выбираем заданное значение и затем фиксируем одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \blacktriangle$.

Аналогичным образом задается центр неоднозначности для выхода К2. Разница заключается в том, что вместо кнопки \blacktriangle нажимается кнопка ∇ .

Аналогичным образом задаем центр неоднозначности для реле К2. Следует иметь в виду, что центр срабатывания реле К2 должен отстоять достаточно далеко от центра срабатывания реле К1, чтобы реле К2 не срабатывало при работе заданной двухпозиционной системы.

2. Снятие статической характеристики регулятора

В данной лабораторной работе выбран и заранее запрограммирован датчик 100М ($W_{100} = 1,426$). Это значит, что датчик при тем-

пературе 0 °С имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при температуре 100 °С имеет номинальное сопротивление 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика:

$$R_d = 100 + 0,426 \Theta,$$

где R_d – сопротивление датчика; Θ – температура, °С.

2.1. С помощью магазина сопротивления увеличивать значение сопротивления через 0,1 Ом и зафиксировать значения R и Θ , при которых происходит отключение реле К1. Затем уменьшать значение сопротивления магазина через 0,1 Ом и зафиксировать значение сопротивления R_d и Θ , при которых происходит включение реле К1.

2.2. Данные внести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$R_d, \text{ Ом}$												
$\theta_s, \text{ }^\circ\text{C}$												
$\theta_p, \text{ }^\circ\text{C}$												

2.3. Построить статическую характеристику в функции сопротивления датчика для регулирующего выхода К1, на ней показать ширину зоны неоднозначности.

2.4. Рассчитать по экспериментальной характеристике при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика. Сравнить полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания ($\Theta_3 \pm a$).

2.5. Сделать выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

3. Моделирование работы САР

3.1. Открыть программу AVT3.

3.2. Набрать модель системы с заданной структурой, параметрами и возмущающими воздействиями, указанными преподавателем.

3.3. Промоделировать работу системы после ее включения с различными возмущающими воздействиями, изменяя их с заданным преподавателем шагом. Построить в отчете не менее 2-х графиков поведения системы при различных возмущающих воздействиях.

3.4. Сделать выводы о переходных и установившемся режимах работы двухпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать название работы, цель, задание, статическую характеристику в функции сопротивления датчика, результаты расчетов, графики и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называют двухпозиционным законом регулирования и двухпозиционной системой регулирования?
2. В каком установившемся режиме работают двухпозиционные системы?
3. Что является параметрами настройки двухпозиционных систем?
4. Как изменяются режимы работы двухпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?
5. Как оценивается быстродействие и точность двухпозиционных систем? Какие еще параметры регулирования являются важными при оценке качества регулирования, обеспечиваемого двухпозиционной системой?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА И ТРЕХПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ

Количество часов аудиторных занятий – 4.

Цель работы – исследование трехпозиционного регулятора на примере регулятора температуры и режимов работы трехпозиционных систем, на примере САР температуры сушильной камеры.

Вопросы для проверки готовности к лабораторному занятию

1. Сформулируйте определения позиционных законов регулирования.
2. Сформулируйте определение 3-х позиционного закона регулирования.
3. Опишите режимы работы трехпозиционных систем автоматического регулирования.

Задание

1. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры. Заданную температуру Θ_3 , ширину зоны нечувствительности $2a$ и ширину зоны неоднозначности (дифференциал) d задает преподаватель.
2. Снять статическую характеристику регулятора в функции сопротивления датчика. По снятой характеристике рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.
3. Промоделировать работу САР, постепенно повышая температуру наружного воздуха (возмущающее воздействие) от 0 до Θ_3 с шагом, заданным преподавателем.

Структурная схема заданной САР изображена на рисунке 5. На структурной схеме: $W_{oy} = \frac{K_y}{T_{1y}p+1} e^{-p\tau}$; $W_d = \frac{1}{T_d p+1}$; $W_{of} = \frac{K_F}{T_{1F}p+1}$.

Параметры K_y , T_{1y} , τ , T_d , K_F , T_{1F} , P_3 задаются преподавателем.

Порядок выполнения работы

1. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Трехпозиционный закон регулирования задается настройкой зон неоднозначности и их центров для реле К1 и К2. При этом ширина зоны нечувствительности получается равной разности Θ_3 – для реле К1 и К2 плюс ширина зоны неоднозначности (дифференциал) этих реле.

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

У прибора имеются три уровня программирования: конфигурационный, параметрический и рабочий. Переход от одного уровня ко второму осуществляется при нажатом состоянии операторной кнопки \blacklozenge .

1.1. Для задания параметров на конфигурационном уровне программирования Conf необходимо на панели регулятора нажать кнопку \blacklozenge и удерживать до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Conf.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки \blacktriangledown .

На данном уровне необходимо задать положение десятичной точки Pnt - x1. Выбор разряда производится нажатием кнопки \blacklozenge .

Выбранные значения подтверждаются одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \blacktriangledown$, причем первой нажимается кнопка \blacklozenge .

Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок $\blacktriangledown + \blacktriangle$.

1.2. Для задания параметров на параметрическом уровне программирования Par необходимо на панели регулятора нажать кнопку \blacklozenge и удерживать до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Par.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки \blacktriangledown .

На данном уровне программирования задаем значения ширины зон неоднозначности (дифференциал) для реле К1 и К2. Для этого нажимаем операторную кнопку \blacktriangledown , пока на индикаторе прибора не появится сообщение (HYS1), выбор численного значения ширины зоны неоднозначности для реле К1 производится нажатием операторной кнопки \blacklozenge . Выбранное значение подтверждается одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \blacktriangledown$, причем первой нажимается кнопка \blacklozenge . Таким же образом задаем ширину зоны неоднозначности (HYS2) для реле К2.

Далее выбираем направление регулирования для регуляторов К1 и К2. Для этого нажимаем операторную кнопку \blacktriangledown до тех пор, пока на индикаторе не появится сообщение dir1. С помощью операторной кнопки \blacklozenge выбираем направление регулирования для реле К1 (нагрев) и выбор подтверждаем одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \blacktriangledown$, причем первой нажимается кнопка \blacklozenge . Таким же образом выбираем направление регулирования dir2 для реле К2 (нагрев). Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок $\blacktriangledown + \blacktriangle$.

1.3. На рабочем уровне задаем значение температуры Θ_3 (центр ширины зоны неоднозначности 2а) для выхода К1. Для этого нажимаем операторную кнопку \blacktriangle и, не отпуская ее, нажимаем операторную кнопку \blacklozenge , с помощью операторной кнопки \blacktriangle выбираем заданное значение и затем фиксируем одновременным нажатием операторных кнопок $\blacklozenge + \blacktriangle$.

Аналогичным образом задается центр неоднозначности для выхода К2. Разница заключается в том, что вместо кнопки \blacktriangle нажимается кнопка \blacktriangledown .

Численные значения программируемых параметров задаются преподавателем.

2. Снятие статической характеристики регулятора

В данной лабораторной работе выбран и заранее запрограммирован датчик 100М ($W_{100} = 1,426$). Это значит, что датчик при температуре 0 °С имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при

температуре 100 °С имеет номинальное сопротивление 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика:

$$R_d = 100 + 0,426 \Theta,$$

где R_d – сопротивление датчика, Θ – температура в °С.

2.1. С помощью магазина сопротивления увеличивать значение сопротивления через 0,1 Ом, зафиксировать значения $R_1, R_2, \Theta_1, \Theta_2$, при которых происходит выключение реле К1 и К2. Затем уменьшать сопротивление магазина через 0,1 Ом зафиксировать R_d и Θ_1, Θ_2 , при которых происходит включение реле К1 и К2.

2.2 Данные внести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

R_d , Ом										
θ , °С										
θ_p , °С										

2.3. Построить статическую характеристику в функции сопротивления датчика для регулирующих выходов К1 и К2, на ней показать ширину зон нечувствительности и неоднозначности (дифференциалы d).

2.3. Рассчитать по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика. Сравнить полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания ($\Theta, \pm a$).

2.4. Сделать выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

3. Моделирование работы САР

3.1. Открыть программу AVT3.

3.2. Набрать модель системы с заданной структурой, параметрами и возмущающими воздействиями, указанными преподавателем.

3.3. Промоделировать работу системы после ее включения с различными возмущающими воздействиями (изменяя их с заданным преподавателем шагом). Построить в отчете график автоколе-

бательного процесса около нижней границы срабатывания регулятора, график установившегося режима в зоне нечувствительности и график автоколебательного процесса около верхней границы срабатывания регулятора.

3.4. Сделать выводы о переходном и установившемся режимах работы трехпозиционных систем и изменениями этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать название работы, цель, задание, статическую характеристику в функции сопротивления датчика, результаты расчетов, построенные графики и выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называют трехпозиционным законом регулирования и трехпозиционной системой регулирования?
2. В каком установившемся режиме работают трехпозиционные системы?
3. Что является параметрами настройки трехпозиционных систем?
4. Как изменяются режимы работы трехпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?
5. Как оцениваются быстродействие и точность трехпозиционных систем? Какие еще параметры регулирования являются важными при оценке качества регулирования, обеспечиваемого трехпозиционной системой?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анхимюк, В. А.* Теория автоматического управления : учеб. пособие / В. А. Анхимюк, О. Ф. Онейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Изд-во «Дизайн» ПРО, 2000. – 352 с.

2. *Сидоренко, Ю. А.* Теория автоматического управления : учеб. пособие / Ю. А. Сидоренко. – Минск: БГАТУ, 2007. – 124 с.

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторный практикум

Составители:

Сидоренко Юрий Александрович,
Мякинник Елена Евгеньевна

Ответственный за выпуск *О. Ч. Ролич*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *А. И. Стебули*

Подписано в печать 09.01.2012 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 4,72. Тираж 100 экз. Заказ 12.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.