

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

УДК 681.51
ББК 965.73-2
Л17

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Р е ц е н з е н т

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой РВС
С.М. Дзюба

Л17 Теория автоматического управления : лабораторные работы / сост. : Ю.Ф. Мартемьянов, Т.Я. Лазарева, В.Ю. Харченко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 64 с. – 50 экз.

Даны описание и порядок выполнения лабораторных работ по курсу «Теория автоматического управления», которые включают цикл лабораторных работ по линейной теории автоматического управления.

Предназначены для студентов 3 курса дневного и заочного отделений специальностей 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 230104 «Системы автоматизированного проектирования». Курс «Теория автоматического управления» относится к общепрофессиональным дисциплинам, в связи с чем лабораторные работы могут быть использованы студентами других специальностей.

УДК 681.51
ББК 965.73-2

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет (ТГТУ), 2009

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторные работы
для студентов 3 курса дневного и заочного отделений
специальностей 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств», 230104 «Системы автоматизированного проектирования»



Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

Учебное издание

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторные работы

Составители:

МАРТЕМЬЯНОВ Юрий Фёдорович,

ЛАЗАРЕВА Татьяна Яковлевна,

ХАРЧЕНКО Владимир Юрьевич

Редактор Л.В. Комбарова

Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 07.09.2009.

Формат 60 × 84/16. 3,72 усл. печ. л. Тираж 50 экз. Заказ № 328.

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления является основной общеобразовательной дисциплиной направления подготовки дипломированного специалиста «Автоматизированные технологии и производства», специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 230104 «Системы автоматизированного проектирования».

Для более полного усвоения курса и приобретения навыков по вопросам анализа и синтеза систем автоматического управления студенты должны выполнить цикл лабораторных работ. После выполнения лабораторных работ студент должен уметь анализировать типовые звенья, экспериментально определять частотные характеристики, анализировать типовые законы регулирования, определять показатели запаса устойчивости и качества регулирования, проводить параметрический синтез одноконтурной системы автоматического регулирования.

Представленный материал предназначен для выполнения лабораторных работ по линейным системам автоматического управления. Он содержит материалы для изучения студентами основных динамических характеристик, используемых в системах автоматического управления, методику экспериментального определения временных и частотных характеристик, анализа системы на запас устойчивости, а также анализ одноконтурной системы автоматического регулирования с различными типовыми законами регулирования.

Лабораторные работы могут быть использованы при изучении вопросов теории автоматического управления студентами различных специальностей в курсах, связанных с автоматизацией производственных процессов, а также магистрантами и аспирантами.

Лабораторная работа 1

ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ

Цель работы: Изучение типовых элементарных звеньев.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить уравнения движения предложенных типовых звеньев.
2. Изучить передаточные функции этих звеньев.
3. Изучить частотные характеристики этих звеньев.
4. Изучить временные характеристики этих звеньев.
5. Изучить влияние параметров передаточной функции на форму кривой разгона для предложенных типовых звеньев.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Передаточные функции типовых звеньев должны иметь вид простых дробей. Уравнения всех типовых звеньев (кроме звена чистого запаздывания) можно получить из обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка:

$$a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_1 x'(t) + b_0 x(t).$$

Различают следующие звенья: усилительное, интегрирующее, идеальное и реальное дифференцирующее, форсирующее, чистого запаздывания, инерционно-форсирующее, апериодическое первого и второго порядка, колебательное. Все звенья по ряду общих закономерностей можно разделить на три группы:

1. Статические звенья, у которых статическая характеристика отлична от нуля. Эти звенья имеют однозначную связь между входной и выходной переменными в статическом режиме. Передаточная функция представляет собой отношение двух полиномов $W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$. Если эти полиномы имеют один или несколько

нулевых корней, то передаточную функцию удобно записывать в такой форме, чтобы полюса и нули были выделены в явном виде. Если передаточная функция имеет в точке $s = 0$ полюс кратности ν , то её удобно записать в виде $W(s) = kW^*(s)/s^\nu$. Коэффициент k называется передаточным коэффициентом. Для статических звеньев, к которым относят усилительное, апериодическое, колебательное звенья, передаточный коэффициент связан с передаточной функцией соотношением $k = W(s)|_{s=0}$. Кроме того, статические звенья являются фильтрами низкой частоты, исключение составляет усилительное звено.

2. Дифференцирующие звенья, у которых статическая характеристика равна нулю, – это идеальное и реальное дифференцирующие звенья; в их передаточную функцию входит множитель s поэтому $W(s)|_{s=0} = 0$. Дифференцирующие звенья являются фильтрами высокой частоты, они вносят положительные фазовые сдвиги.

3. Астатические звенья – звенья не имеющие статической характеристики, к ним относится интегрирующее звено, в передаточную функцию которого обязательно входит множитель $\frac{1}{s}$, поэтому $W(0) = \infty$. Интегрирующие звенья являются фильтрами низкой частоты.

В лабораторной работе моделируются типовые звенья, численные значения параметров передаточной функции которых задаются студенту преподавателем.

Лабораторная работа выполняется в программе «Lab1.Exe», которая работает в операционной системе Windows 95/NT.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Произвести запуск лабораторной работы. На экране монитора отображается окно программы.
2. Изучить окно программы. В окне программы слева расположены кнопки с названиями различных элементарных звеньев. В центре окна область, в которой отображается график переходной функции. Слева отображается вид передаточной функции звена. Ниже – области для ввода различных коэффициентов. Ещё ниже кнопки «График», «В буфер» и «Выход». В нижней части экрана расположены кнопки «О программе» и «Помощь».
3. Приступить к выполнению лабораторной работы.
4. Выбрать исследуемое звено. Для выбора необходимого звена кликнуть кнопку с названием этого звена.
5. Установить параметры передаточной функции звена, для этого необходимо щёлкнуть по месту ввода параметра и набрать его значение на клавиатуре. Далее следует нажать клавишу «Enter» или «Tab», или щёлкнуть мышью по какому-либо другому элементу. При вводе числа можно ввести число не более 10 000 и оно не может иметь более 2 цифр после запятой. При вводе числа, не соответствующего данным ограничениям, его необходимо привести к описанным выше ограничениям. Для разделения целой и дробной части числа используется как точка («.»), так и запятая («,»).
6. Нажать на клавишу «График», программа автоматически построит график переходной функции для заданного звена с заданными параметрами (рис. 1).
7. Выбрать значение времени интегрирования, соответствующее периоду изменения $y(t)$ ($y'(t) \neq 0$), повторяя пункт 5 – 7.
8. Нажать на клавишу «В буфер». График переходной функции поместится в буфер обмена и может быть использован в других программах.
9. Изменить значение параметра $W(s)$ (коэффициента передаточной функции) и повторить пункты 5 – 8.
10. Сделать вывод о характере влияния данного параметра на форму $h(t)$.
11. Прodelать пункты 5 – 10 для всех звеньев, имеющихся в программе.
12. Для завершения работы с программой нажать кнопку «Выход».

Примечание: для выделения различных элементов, расположенных на экране, можно использовать клавишу «Tab» или щёлкать по ним левой кнопкой мыши.

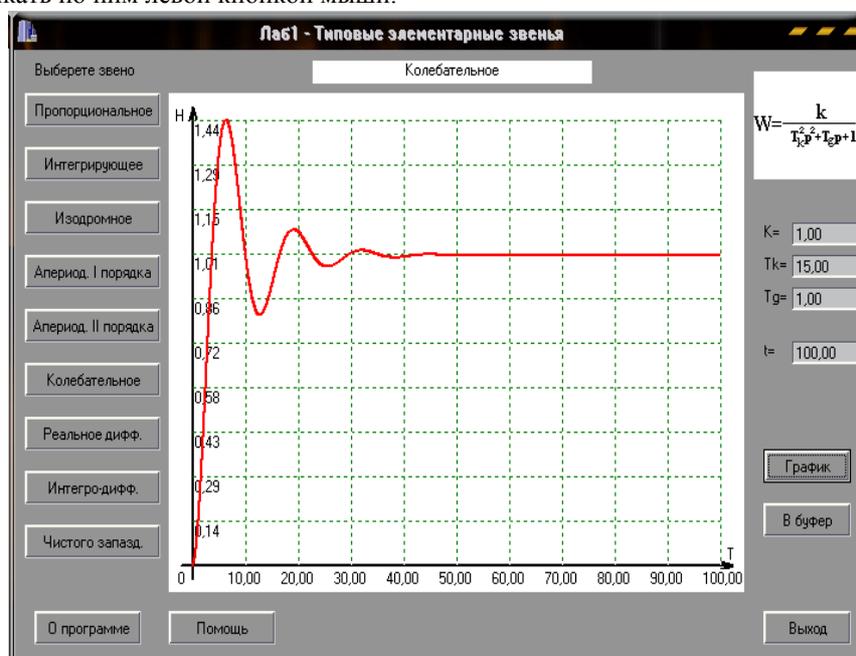


Рис. 1. График переходной функции колебательного звена

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы.
3. Определение типовых звеньев.
4. Описание исследуемого звена: передаточная функция, заданные параметры.
5. График переходной функции исследуемого типового звена, построенного по данным лабораторного исследования.
6. Выводы о влиянии каждого из параметров звена на форму переходной функции.
7. Аналитическое выражение для переходной функции, полученное по заданной передаточной функции звена. График рассчитанной переходной функции.
8. Сравнительный анализ переходных функций, полученных экспериментально и теоретически.
9. В отчёте должны быть представлены все исследуемые звенья.
10. Выводы о работе в целом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое звено относится к группе типовых звеньев?
 2. Какая характеристика называется переходной функцией?
 3. Как экспериментально определить переходную функцию?
 4. Как определить переходную функцию, если известна передаточная функция объекта?
 5. Какие звенья описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями?
- Литература: [1], [2], [3], [4].

Лабораторная работа 2

СНЯТИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Цель работы: Овладение методикой экспериментального снятия частотных характеристик.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить методику экспериментального получения частотных характеристик
2. Провести экспериментальные испытания, необходимые для построения частотных характеристик объекта управления.
3. Построить по экспериментально полученным точкам зависимости:
 - амплитудно-частотную характеристику – $M^3(\omega)$;
 - фазово-частотную характеристику – $\varphi^3(\omega)$;
 - амплитудно-фазовую характеристику – $W^3(i\omega)$.
4. Рассчитать аналитически амплитудно-фазовую характеристику – $W(i\omega)$
5. Вычислить максимальную погрешность:

$$\eta = \frac{|W^3(i\omega) - W(i\omega)|}{W^3(i\omega)} \cdot 100 \%$$

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Важную роль при описании динамики линейных систем играют частотные характеристики. Основной частотной характеристикой является амплитудно-фазовая характеристика (АФХ).

Амплитудно-фазовой характеристикой называется конформное отображение мнимой оси плоскости корней характеристического уравнения на комплексную плоскость амплитудно-фазовой характеристики (рис. 2), осуществляемое функцией $W(s)$.

Амплитудно-фазовая характеристика является комплексной функцией, поэтому как и любую комплексную функцию её можно записать в показательной форме:

$$W(i\omega) = M(\omega)e^{i\varphi(\omega)}$$

или алгебраической форме:

$$W(i\omega) = \operatorname{Re}(\omega) + i \operatorname{Im}(\omega),$$

где $M(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика (ФЧХ); $\operatorname{Re}(\omega)$ – вещественно-частотная характеристика (ВЧХ); $\operatorname{Im}(\omega)$ – мнимая частотная характеристика (МЧХ).

Между этими частотными характеристиками существует связь. Зная одни из них, можно определить другие (рис. 3).

$$M(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)},$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}(\operatorname{Im}(\omega)/\operatorname{Re}(\omega)),$$

$$\operatorname{Re}(\omega) = M(\omega)\cos(\varphi(\omega)),$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = M(\omega)\sin(\varphi(\omega)).$$

На практике частотные характеристики получают по передаточной функции. Механизм записи АФХ по передаточной функции сводится к замене в последней комплексного параметра s на $i\omega$, т.е. $s = i\omega$. Полученное выражение далее преобразуется к показательной форме или алгебраической форме записи амплитудно-фазовой характеристики. Поскольку физически отрицательных частот в природе не существует, все частотные характеристики строятся только для положительных частот. Амплитудно-частотная и вещественно-частотная характеристики являются чётными функциями, а фазово-частотная и мнимая частотная характеристики являются нечётными функциями. В случае необходимости для отрицательных частот, частотные характеристики получают зеркальным отображением относительно действительной оси для чётных характеристик, либо относительно начала координат – для нечётных характеристик. Примеры графиков частотных характеристик представлены на рис. 4.

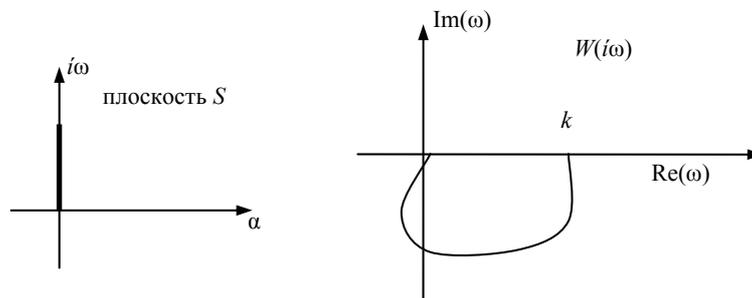


Рис. 2. Определение АФХ через конформное преобразование

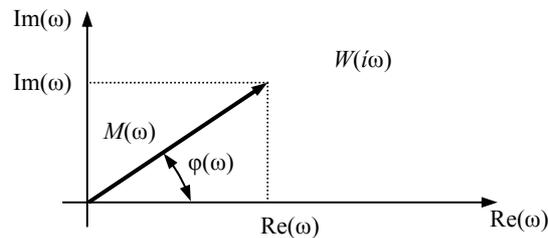


Рис. 3. Связь частотных характеристик

Физический смысл частотных характеристик становится более ясным при их экспериментальном получении.

Если на вход объекта подать гармонический сигнал $x(t) = A\sin(\omega t)$, то на выходе объекта в силу принципа суперпозиции со временем устанавливается также гармонический сигнал $y(t) = B\sin(\omega t + \varphi)$ другой амплитуды и сдвинутый по фазе, но той же самой частоты.

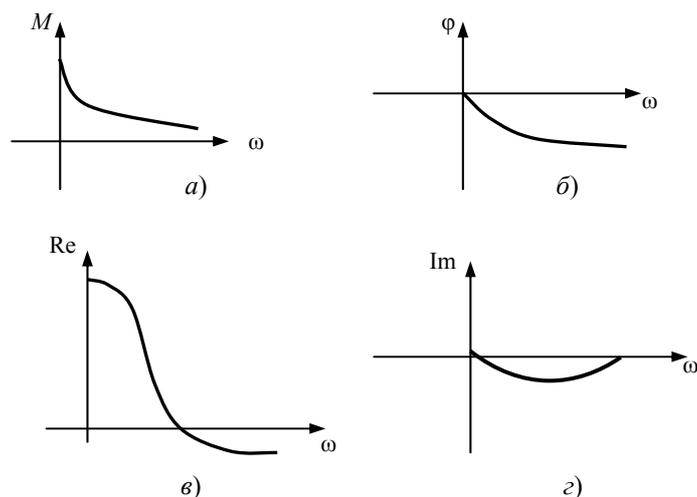


Рис. 4. Частотные характеристики:
a – АЧХ; *б* – ФЧХ; *в* – ВЧХ; *г* – МЧХ

Степень различия между параметрами входного и выходного сигналов не зависит от амплитуды и фазы входного сигнала, а определяются только динамическими свойствами объекта и частотой колебаний.

Для получения частотных характеристик экспериментальным путём проводится ряд экспериментов, при которых на вход объекта подаётся гармонический сигнал заданной амплитуды и частоты. У полученного на выходе гармонического сигнала измеряется амплитуда и сдвиг фаз. В результате проведённых экспериментов с различными значениями частот частотные характеристики определяются следующим образом.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляет собой отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала:

$$M(\omega) = B / A .$$

Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) – это разность фаз выходного и входного сигналов.

$$\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} .$$

Таким образом, амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) определяется как комплексная функция, у которой модулем является АЧХ, а фазой – ФЧХ.

В лабораторной работе моделируется объект с передаточной функцией

$$W_0(s) = \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_9 s^9 + a_8 s^8 + a_7 s^7 + a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} e^{-s\tau} ,$$

где τ – время запаздывания объекта.

Необходимо установить значения составляющих вектора a и b , после чего задать время интегрирования и значение частоты ω . Для того, чтобы на экране отображалось 2–3 периода x и y независимо от ω , перед нажатием кнопки «старт» следует установить значение k_p из расчёта $\omega k_p = 2-3$. Затем на вход этого объекта необходимо подать гармонический сигнал. Исследовать выходной гармонический сигнал следует после того, как прекратится собственная составляющая движения и сохранится только синусоида со своей фазой и амплитудой. Для исключения ошибки в определении $\Delta\varphi$ следует для каждого значения ω провести 2–3 измерения и выбрать совпадающие значения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Осуществить запуск программы (лабораторной работы). На экране монитора отображается окно программы.

2. Изучить окно программы. Окно содержит четыре раздела: параметры объекта, параметры воздействия и управляющие параметры (рис. 5).

Параметры воздействия: A – амплитуда; ω – циклическая частота; φ – начальный сдвиг фаз в градусах; k_p – количество выводимых на экран периодов возмущающего воздействия при $\omega = 1$.

3. Изучить используемые клавиши с дополнительной информацией.

4. Ввести параметры объекта, заданные преподавателем.

5. Нажать на «Пуск» и после окончания собственной составляющей нажать кнопку «Стоп».

6. Нажать кнопку «Увеличить».

7. В открывшемся окне (рис. 6) находится график входного и выходного сигналов, а также значения отношения амплитуд – $M(\omega)$ и разность фаз – $\Delta\varphi(\omega)$, вычисленных по формуле:

$$M(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)};$$

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_{\text{вых}}(\omega) - \varphi_{\text{вх}}(\omega).$$

8. С помощью кнопки «В буфер» скопировать график в память, а с помощью кнопки «Запомнить» – записать полученные данные в память и занести результат в текстовый файл «Laba2.txt».

9. Постепенно увеличивая значения ω так, чтобы интервал в $\Delta\varphi(\omega)$ составлял 20 – 30°, снять результаты 10 – 15 экспериментов (значения интервала частоты будут неравномерными).

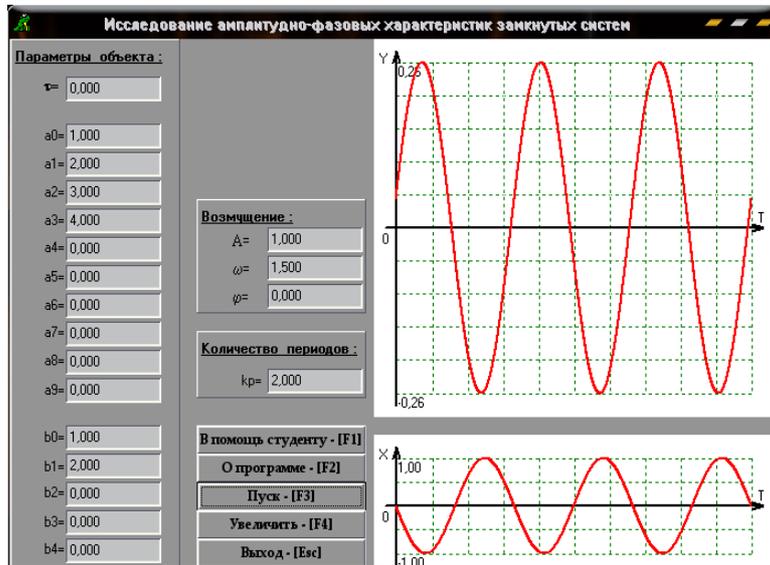


Рис. 5. Диалоговое окно задания параметров

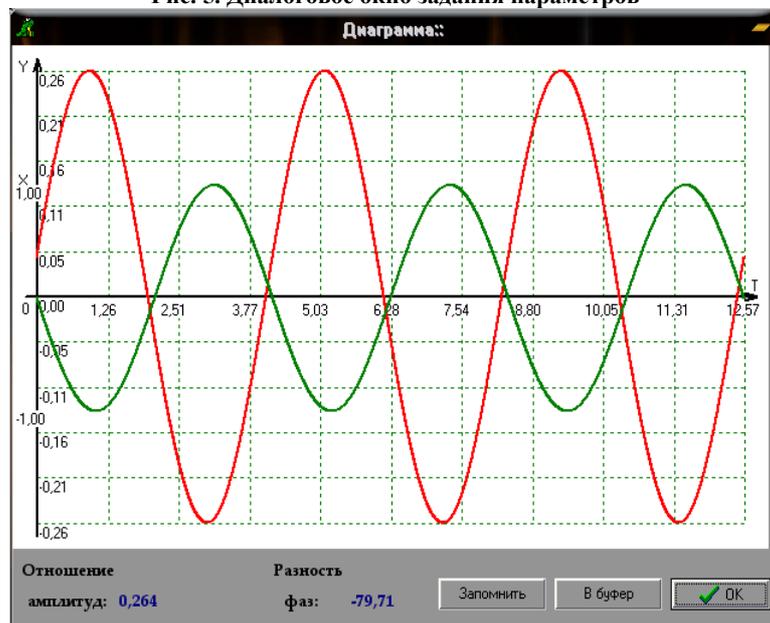


Рис. 6. Установившиеся колебания

10. Занести результаты машинного эксперимента в табл. 1.

Таблица 1

№	ω	$M(\omega)$	$\Delta\varphi(\omega)$
1			
2			
...			
10			

Примечание: При каждом значении частоты необходимо провести несколько экспериментов, добиваясь получения истинного значения разности фаз (необходимо добиться совпадения 3–4 результатов по каждому значению частоты).

11. По полученным данным, взятым из файла «Laba2.txt», построить графики АЧХ, ФЧХ, АФХ на миллиметровой бумаге или бумаге в клетку.

12. По заданной передаточной функции моделируемого объекта вывести, а затем построить графики частотных характеристик: АЧХ, ФЧХ и АФХ (можно с применением ПК).

13. Сравнить выведенные теоретически и полученные экспериментальным путём частотные характеристики. Определить погрешность экспериментальных данных.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы.
3. Определение частотных характеристик: АЧХ, ФЧХ, АФХ.
4. Аналитическое выражение передаточной функции объекта управления с численными значениями коэффициентов.
5. Таблицу полученных экспериментальных данных.
6. Графики АЧХ, ФЧХ, АФХ, построенные по данным таблицы.
7. Аналитический вывод частотных характеристик по заданной передаточной функции.
8. Графики АЧХ, ФЧХ, АФХ, построенные аналитически.
9. Определение погрешности данных, полученных экспериментально по сравнению с расчётными данными.
10. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое отображение называется конформным отображением?
2. Какая характеристика называется амплитудно-фазовой?
3. Как экспериментально определить амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики?
4. Какая связь имеется между передаточной функцией и амплитудно-фазовой характеристикой?
5. Какая из частотных характеристик является основной и какова взаимосвязь между различными частотными характеристиками?

Литература: [1], [2], [3].

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И АСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: Исследование статических и астатических систем регулирования с точки зрения качества регулирования.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить простейшие и промышленные законы регулирования: пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-дифференциальный (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).

2. Изучить динамические характеристики основных законов регулирования: передаточную функцию, переходную функцию, импульсно-весовую функцию, частотные характеристики (амплитудно-фазовую, амплитудно-частотную, фазово-частотную).

3. Познакомиться с простейшими системами автоматического управления: статическими и астатическими.

4. Выбрать объект управления, типы регуляторов, подлежащих исследованию, значения настроечных параметров этих регуляторов.

5. Исследовать одноконтурную систему автоматического регулирования, состоящую из выбранного объекта и выбранного типа регулятора. Для этого, кликнув соответствующую кнопку, получить графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.

6. Для каждого типа регулятора получить экспериментальное значение статической ошибки регулирования.
7. Рассчитать статическую ошибку регулирования для каждого типа регулятора.
8. Рассчитать относительную погрешность определения статической ошибки регулирования.
9. На основе проведённых исследований сделать выводы относительно свойств статических и астатических систем регулирования.
10. Провести для статических систем анализ влияния настроек на статическую ошибку регулирования.
11. Провести сравнительный анализ законов регулирования с точки зрения наличия статической ошибки регулирования.
12. Сделать рекомендации о применимости типовых и промышленных законов регулирования.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В лабораторной работе исследуется одноконтурная замкнутая система автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 7.

Одноконтурная система автоматического регулирования состоит из объекта с передаточной функцией $W_{об}(s)$ и регулятора с передаточной функцией $W_p(s)$. Одним из свойств управляемого объекта является самовыравнивание.

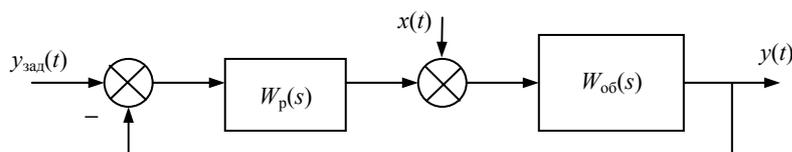


Рис. 7. Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления

Самовыравниванием называется свойство устойчивого управляемого объекта самостоятельно восстанавливать нарушенное равновесие процесса после возмущения. Значение управляемой величины после окончания самовыравнивания называется установившимся, его значение постоянно для каждой нагрузки данного стационарного объекта.

Самовыравнивание является следствием внутренней отрицательной обратной связи в устойчивом объекте. Чем больше величина самовыравнивания, тем меньше отклонение управляемого параметра от состояния равновесия, существовавшего до приложения возмущающего воздействия. Самовыравнивание способствует стабилизации управляемой величины в объекте и таким образом облегчает работу управляющего устройства.

Объект, обладающий самовыравниванием, называется устойчивым или *статическим*.

В объекте, не обладающем самовыравниванием, после приложения возмущающего воздействия управляемая величина свободно изменяется (если нет управляющего воздействия), неограниченно возрастающая или уменьшаясь до нуля.

Управляемые объекты, не обладающие самовыравниванием, называются нейтральными или *астатическими*. При отсутствии возмущающего воздействия нейтральный объект может находиться в состоянии равновесия при любых значениях управляемой величины. При нарушении равновесия процесса скорость изменения управляемой величины пропорциональна величине возмущающего воздействия. Отсутствие самовыравнивания ухудшает управляемость объекта.

В устойчивых промышленных объектах происходит демпфирование и запаздывание сигнала, т.е. уменьшение амплитуды и отставание по фазе выходной величины по сравнению с входной величиной. Задача регулятора компенсировать эти явления, т.е. усилить сигнал, поступающий с выхода объекта, на величину обратно пропорциональную демпфированию и придавать ему опережение по фазе.

Регулятор обрабатывает один из типовых законов регулирования:

– Пропорциональный (П-закон) – $W(s) = -S_1$;

– Интегральный (И-закон) – $W(s) = -S_0/s$;

– Пропорционально-интегральный (ПИ-закон) –

$$W(s) = -S_0/s - S_1;$$

– Пропорционально-дифференциальный (ПД-закон) –

$$W(s) = -S_1 - S_2 s;$$

– Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-закон) –

$$W(s) = -S_0/s - S_1 - S_2 s,$$

где S_0, S_1, S_2 – настройки регуляторов, которые подлежат расчёту или подбору.

П- и ПД-законы регулирования относятся к статическим законам регулирования, а И-, ПИ-, ПИД-законы относятся к астатическим.

Системы с П- и ПД-регуляторами называются статическими, а с И-, ПИ-, ПИД-регуляторами – астатическими.

Назначение любой автоматической системы управления – изменение выходной величины $y(t)$ в соответствии с изменением задающего воздействия $y_{зад}(t)$. В большинстве случаев эта задача системы заключается в поддержании равенства $y(t) = y_{зад}(t)$ при любых изменениях задающего и возмущающих воздействий.

При анализе точности управления различают две функции системы: воспроизведение задающего воздействия и подавление (компенсация) возмущений. Из-за инерционности объекта и регулятора обе эти функции выполняются любой системой с погрешностью: в каждый момент времени после внешнего воздействия существует разность

$$\varepsilon(t) = y_{зад}(t) - y(t),$$

характеризующая точность системы. Чем меньше мгновенные значения сигнала ошибки $\varepsilon(t)$, тем больше точность системы.

В типовой системе управления сигнал ошибки $\varepsilon(t)$ содержит составляющую $\varepsilon_{зад}(t)$, которая характеризует точность выполнения системой функции воспроизведения задающего воздействия, и несколько составляющих, которые в сумме характеризуют точность выполнения функции подавления возмущений.

Одно из важнейших правил теории автоматического управления гласит: *в типовой одноконтурной системе, состоящей из объекта $W_{об}(s)$ и регулятора $W_p(s)$, полная ошибка регулирования $\varepsilon(t)$ и ее составляющие и в статике, и в динамике обратно пропорциональны выражению $-(1 + W_{об}(s) \times W_p(s))$, т.е. точность регулирования тем выше, чем больше усилительные свойства регулятора.*

Точность системы принято оценивать по значениям ошибки $\varepsilon(t)$ в статическом и установившемся динамическом режимах работы системы, поэтому различают статическую и динамическую точности.

В статическом режиме ошибки возникают только в статической системе, в астатической системе они равны нулю.

Статической системой управления называется система, объект и регулятор которой являются статическими элементами, т.е.

$$W_{об}(0) = k_{об}, W_p(0) = k_p.$$

Учитывая полученное выражение, можно записать уравнение статики статической системы: для управляемой переменной

$$y = y_{зад} \frac{k_p k_{об}}{1 + k_p k_{об}} + y_{воз} \frac{k_{об}}{1 + k_p k_{об}},$$

для сигнала ошибки

$$\varepsilon = y_{зад} \frac{1}{1 + k_p k_{об}} + y_{воз} \frac{-k_{об}}{1 + k_p k_{об}},$$

где первое слагаемое характеризует статическую ошибку по задающему воздействию, второе – статическую ошибку по возмущению. Обе эти ошибки тем больше, чем больше внешние воздействия, и тем меньше, чем больше знаменатель $(1 + k_p k_{об})$. Следовательно, *точность статической системы тем лучше, чем больше передаточный коэффициент разомкнутого контура.*

Точность статической системы принято оценивать *коэффициентом статизма*

$$S = \frac{\Delta y_{зад}}{\Delta y_{рег}},$$

где $\Delta y_{зад}$ – отклонение управляемой величины, создаваемое возмущением $x_{в0}$ в замкнутой системе, $\Delta y_{рег}$ – отклонение управляемой величины от заданного значения, создаваемого возмущением $x_{в0}$. Коэффициент статизма показывает, во сколько раз отклонение выходной величины управляемого объекта меньше отклонения выходной величины неуправляемого объекта (при одном и том же значении возмущающего воздействия). Коэффициент статизма определяется как

$$S = (1 + k_p k_{об})^{-1} = (1 + k)^{-1}.$$

Точность статической системы считается удовлетворительной, если $S = 0,1 - 0,01$, а $k = 10 - 100$.

Динамическая точность систем оценивается по величине сигнала ошибки в установившемся динамическом режиме. Как известно, установившийся динамический режим наступает после окончания переходного процесса. В этом режиме управляемая величина и сигнал ошибки имеют только вынужденную составляющую.

В зависимости от свойств системы и от точности приложения внешнего воздействия вынужденная составляющая сигнала ошибки либо равна постоянной величине, либо неограниченно возрастает. Постоянную вынужденную составляющую можно определить при помощи теоремы о конечном значении оригинала. Возрастающую вынужденную составляющую находят при помощи метода коэффициентов ошибок.

Определение постоянной составляющей сигнала ошибки складывается из следующих этапов:

- определение установившегося значения сигнала ошибки типовой одноконтурной системы управления при изменении внешнего воздействия $y_{\text{зад}}(t)$ или $x_{\text{воз}}(t)$ по закону ступенчатой функции $y_{\text{зад}}(t) = a_0 1(t)$ и по закону степенной функции $y_{\text{зад}}(t) = a_q t^q 1(t)$, ($q = 1; 2; \dots$);
- рассматриваются передаточные функции объекта

$$W_{\text{об}}(s) = k_{\text{об}} W_{\text{об}}^*(s) / s^{\nu_{\text{об}}},$$

регулятора

$$W_{\text{р}}(s) = k_{\text{р}} W_{\text{р}}^*(s) / s^{\nu_{\text{р}}},$$

где множители $W_{\text{об}}^*(s)$ и $W_{\text{р}}^*(s)$ при $s \rightarrow 0$ стремятся к единице. Показатели $\nu_{\text{р}}$ и $\nu_{\text{об}}$ характеризуют порядок астатизма регулятора и объекта;

- записывается передаточная функция разомкнутого контура

$$W(s) = kW^*(s) / s^{\nu},$$

где $k = k_{\text{об}} k_{\text{р}}$ – передаточный коэффициент разомкнутого контура, $\nu = \nu_{\text{об}} \nu_{\text{р}}$ – порядок астатизма контура, множитель $W^*(s) = W_{\text{об}}^*(s) W_{\text{р}}^*(s)$ стремится к единице при $s \rightarrow 0$.

Типовая система автоматического управления называется астатической ν -го порядка, если её регулятор обладает астатизмом ν -го порядка, т.е. содержит ν интегрирующих звеньев.

Астатическими системами являются системы с И-, ПИ-, ПИД-регуляторами, как правило, $\nu = 1$ или $\nu = 2$;

- рассчитывается сигнал ошибки типовой системы

$$\varepsilon(s) = y_{\text{зад}}(s) \frac{s^{\nu}}{s^{\nu} + kW^*(s)} + y_{\text{воз}}(s) \frac{s^{\nu_{\text{р}}} k_{\text{об}} W_{\text{об}}^*(s)}{s^{\nu} + kW^*(s)}.$$

Из выражения следует, что составляющая ошибки $\varepsilon_{\text{зад}}$, обусловленная изменением задающего воздействия $y_{\text{зад}}(t)$, зависит от общего порядка астатизма ν , а составляющая $\varepsilon_{\text{воз}}$, обусловленная изменением возмущающего воздействия $x_{\text{воз}}(t)$, зависит только от порядка астатизма регулятора;

- рассчитывается установившееся значение сигнала ошибки по предельной теореме

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \varepsilon(s);$$

- определить установившиеся значения составляющих $\varepsilon_{\text{зад}}$ и $\varepsilon_{\text{воз}}$ при изображении задающего сигнала в виде ступенчатой функции

$$y_{\text{зад}}(s) = x_{\text{воз}}(s) = a_0 / s$$

или степенной функции

$$y_{\text{зад}}(s) = x_{\text{воз}}(s) = a_0 q! / s^{q+1}.$$

Для ряда распространённых случаев ($q = 0; 1; 2$ и $\nu = 0; 1; 2$) установившиеся значения составляющих приведены в табл. 2.

Таблица 2

Составляющая сигнала ошибки	Порядок астатизма	Вид воздействия		
		$a_0 1(t)$	$a_1 t 1(t)$	$a_2 t^2 1(t)$
$\varepsilon_{\text{зад}}$	$\nu = 0$	$a_0 / (1 + k)$	∞	∞
	$\nu = 1$	0	a_1 / k	∞
	$\nu = 2$	0	0	$2a_2 / k$
$\varepsilon_{\text{воз}}$	$\nu_{\text{р}} = 0$	$a_0 k_{\text{об}} / (1 + k)$	∞	∞
	$\nu_{\text{об}} = 0$			
	$\nu_{\text{р}} = 0$	$a_0 / k_{\text{р}}$	∞	∞
	$\nu_{\text{об}} = 1$			
	$\nu_{\text{р}} = 1$	0	$a_1 / k_{\text{р}}$	∞
	$\nu_{\text{об}} = 0$			

$v_p = 1$	0	a_1 / k_p	∞
$v_{об} = 1$			
$v_p = 2$	0	0	$2a_2 / k_p$
$v_{об} = 0$			

На основании полученных результатов, которые приведены в табл. 2, формулируются общие правила анализа статических и астатических систем автоматического управления:

1. Если суммарный порядок астатизма v типовой системы равен показателю q степенного задающего воздействия, то система в установившемся режиме имеет ошибку воспроизведения

$$\varepsilon_{зад}(\infty) = a_q q! / k = \text{const},$$

которая тем меньше, чем больше передаточный коэффициент разомкнутого контура системы.

2. Постоянная ошибка подавления $\varepsilon_{зад}(\infty)$, возникающая в установившемся режиме при $q = v_p$, обратно пропорциональна передаточному коэффициенту регулятора.

3. Если порядок астатизма регулятора v_p больше показателя q воздействия, то установившиеся значения ошибок $\varepsilon_{зад}(\infty) = 0$ и $\varepsilon_{воз}(\infty) = 0$.

4. Если порядок астатизма v меньше показателя q , то $\varepsilon_{зад}(\infty) = \infty$ и $\varepsilon_{воз}(\infty) = \infty$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лабораторной работе моделируется замкнутая система автоматического регулирования. На вход системы подаётся единичное ступенчатое возмущение. Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Осуществить запуск программы (лабораторной работы). На экране монитора отображается окно программы.

2. Изучить окно программы. Окно содержит три раздела: параметры объекта, параметры регулятора, время регулирования (рис. 9).

3. Изучить используемые кнопки.

4. Ввести параметры объекта – коэффициенты a_i , b_j в соответствии с вариантом лабораторной работы, заданным преподавателем.

5. Задать время регулирования.

6. Исследовать П-закон регулирования. Для этого задать настройку регулятора S_1 . Запустить расчёт переходного процесса, кликнув кнопку «Расчёт». На панели появятся графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения. Повторить всю процедуру, взяв настройки П-регулятора больше и меньше первоначальной. Записать статическую ошибку регулирования, которая появится в окне при нажатии кнопки «Увеличить». Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведённым формулам в соответствии с заданными параметрами объекта и настройками регулятора. Сделать вывод о влиянии настройки S_1 на статическую ошибку регулирования. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки больше и меньше первоначальной.

$$\varepsilon(\infty) = \text{const}; \quad \varepsilon(t) \rightarrow \infty; \quad v = 0.$$

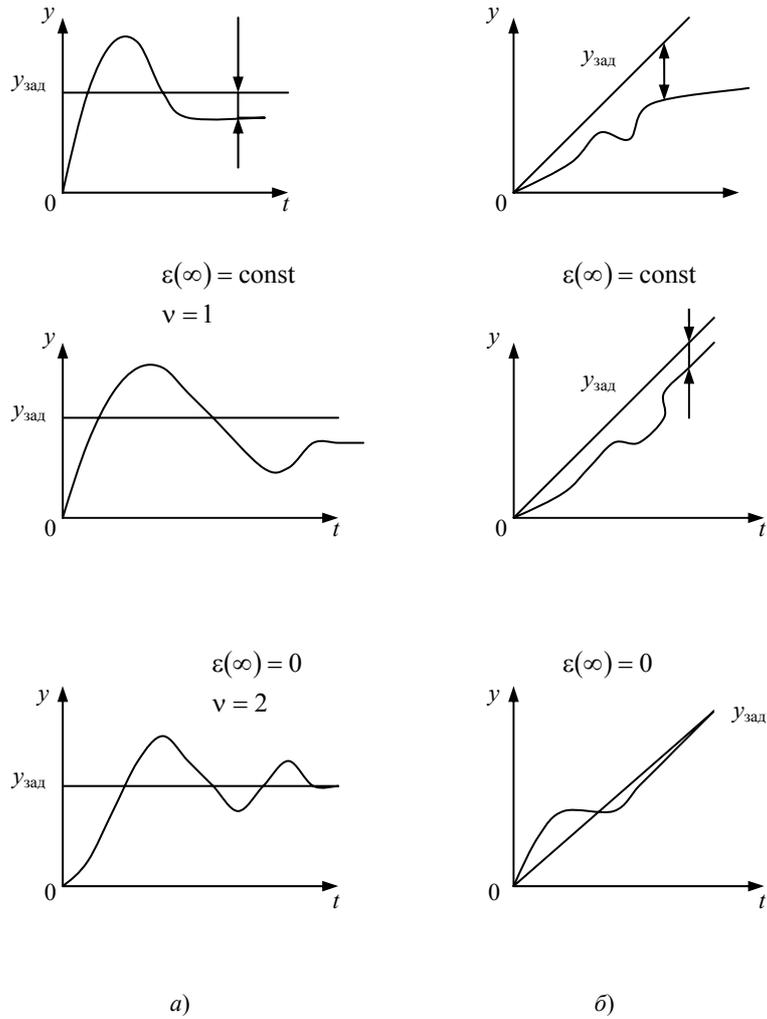


Рис. 8. Переходные процессы в статической и астатической системах при ступенчатом (а) и линейном (б) изменении задающего воздействия

7. Исследовать И-закон регулирования. Задать настройку И-регулятора S_0 . Построить переходные процессы, оценить статическую ошибку регулирования. Повторить всю процедуру ещё с двумя настройками, которые задать больше и меньше первоначально заданной. Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведённым формулам в соответствии с заданными параметрами объекта и настройками регулятора. Эта ошибка должна быть равна нулю, так как система с И-регулятором относится к классу астатических систем. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки.

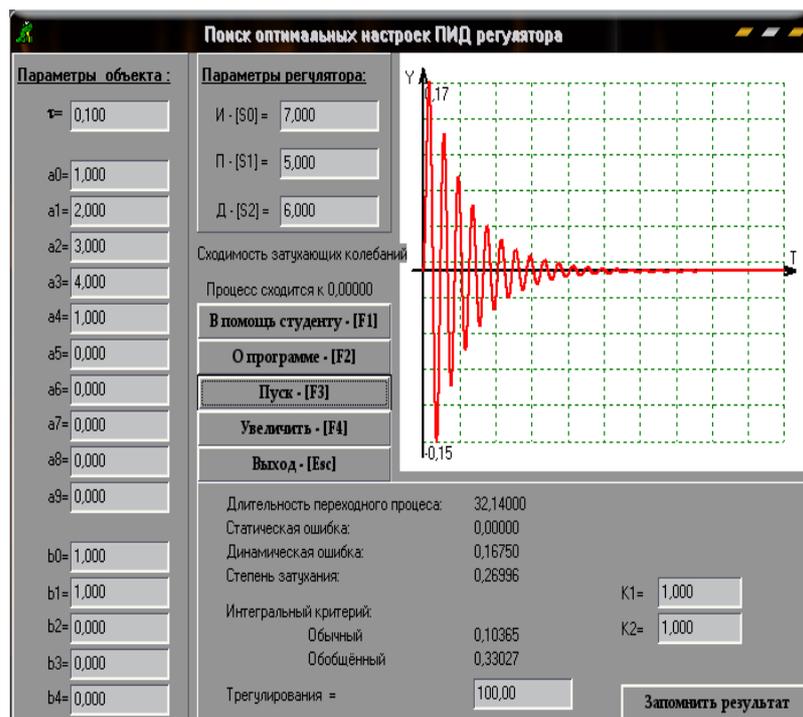


Рис. 9. Диалоговое окно задания параметров

8. Исследовать ПИ-закон регулирования. Задать настройки ПИ-регулятора – S_0, S_1 . Построить переходные процессы и по ним оценить статическую ошибку регулирования, которая должна быть равна нулю. Повторить все расчёты ещё с двумя парами настроек. Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведённым формулам в соответствии с заданными параметрами объекта и настройками регулятора. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки. Сделать соответствующие выводы.

9. Исследовать ПД-закон регулирования. Задать настройки ПД-регулятора – S_2, S_1 . Построить переходные процессы и оценить статическую ошибку регулирования. Повторить все расчёты ещё с двумя парами настроек. Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведённым формулам в соответствии с заданными параметрами объекта и настройками регулятора. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки. Провести анализ влияния на статическую ошибку регулирования ПД-регулятора его настроек S_2, S_1 . Сделать соответствующие выводы.

10. Исследовать ПИД-закон регулирования. Задать настройки ПИД-регулятора – S_0, S_1, S_2 . Построить переходные процессы и оценить статическую ошибку регулирования экспериментально и аналитически. Повторить все расчёты ещё с двумя тройками настроек. Статическая ошибка в системах с ПИД-регулятором должна быть равна нулю. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки. Сделать соответствующие выводы.

11. Провести анализ использования различных типов регуляторов с точки зрения применения статических и астатических систем регулирования. Описать область применения статических и астатических систем регулирования.

Пример диалогового окна задания параметров при исследовании ПИД-закона регулирования представлен на рис. 9.

После выполненного расчёта в окне появляются графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения (рис. 9). При нажатии кнопки «Увеличить» появляется диаграмма увеличенного переходного процесса последовательно по одному из двух каналов (рис. 10).

Если необходимо, то можно скопировать график в память, используя кнопку «В буфер».

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы: передаточную функцию объекта управления, время регулирования, типы регуляторов, подлежащих исследованию, значения настроечных параметров этих регуляторов.

3. Для каждого типа регулятора графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.
4. Для каждого типа регулятора значения статической ошибки регулирования, полученной экспериментально в результате выполнения лабораторной работы.
5. Расчёт статической ошибки для каждого типа регулятора.
6. Расчёт относительной погрешности определения статической ошибки регулирования по формуле

$$\delta = (\Delta y_{ст}^3 + \Delta y_{ст}^{рас}) / \Delta y_{ст}^3.$$
7. Полученные результаты исследования статических и астатических систем регулирования свести в табл.

Таблица 3

Тип регулятора	$\Delta y_{ст}^3$	$\Delta y_{ст}^{рас}$	δ
П			
И			
ПИ			
ПД			
ПИД			

8. Для П- и ПД-регулятора анализ влияния настроек на статическую ошибку регулирования.
9. Сравнительный анализ законов регулирования с точки зрения наличия статической ошибки регулирования.
10. Рекомендации о применимости тех или иных законов регулирования.
11. Выводы по работе.

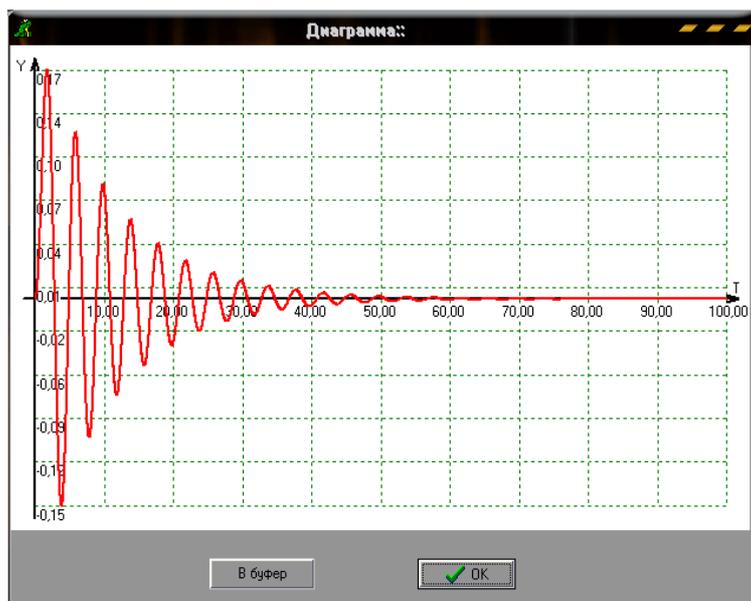


Рис. 10. Переходной процесс по каналу возмущения в астатической системе

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой объект называется статическим объектом регулирования?
2. Какие законы регулирования относятся к классу астатических законов регулирования?
3. Что такое статическая ошибка регулирования?
4. Чем характеризуются статические и астатические законы регулирования?
5. Приведите область применения статических систем регулирования.
6. Дайте сравнительный анализ статической характеристики ошибки регулирования у П- и ПД-законов регулирования.

Литература: [1], [2], [3].

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

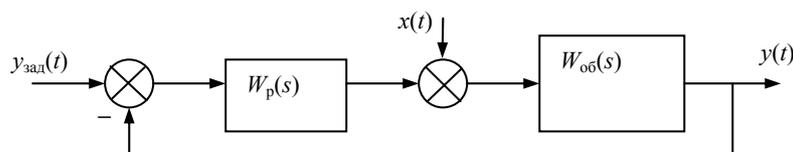
Цель работы: Исследование качества в системах автоматического регулирования с различными типами регуляторов: пропорциональным (П); интегральным (И); пропорционально-интегральным (ПИ); пропорционально-дифференциальным (ПД).

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить основные показатели качества систем автоматического управления.
2. Рассчитать корневые показатели качества систем автоматического управления.
3. Построить для заданного объекта управления и каждого типа регулятора графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.
4. Оценить качество регулирования одноконтурной системы автоматического управления с точки зрения применения различных типовых законов регулирования.
5. Провести оценку прямых показателей качества по кривым переходных процессов для каждого типа регулятора.
6. Провести анализ влияния настроек регуляторов на прямые показатели качества.
7. Провести сравнительный анализ применимости законов регулирования с точки зрения качества для каждого прямого показателя качества.
8. Рассчитать корневые показатели качества регулирования для каждого типа регулятора.
9. Провести оценку качества регулирования по вещественно-частотной характеристике замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения для каждого типа регулятора.
10. Провести сравнительный анализ переходных процессов, полученных экспериментально – расчётным путём и по ВЧХ.
11. Выработать рекомендации о применимости тех или иных законов регулирования по каждому из показателей качества регулирования.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В лабораторной работе исследуется одноконтурная замкнутая система автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 11.



**Рис. 11. Структурная схема одноконтурной системы
автоматического управления**

Одноконтурная система автоматического регулирования состоит из объекта с передаточной функцией $W_{об}(t)$ и регулятора с передаточной функцией $W_p(t)$. Считается, что объект известен. Регулятор отрабатывает один из типовых законов регулирования:

- Пропорциональный (П-закон) – $W(s) = -S_1$;
- Интегральный (И-закон) – $W(s) = -S_0/s$;
- Пропорционально-интегральный (ПИ-закон) –

$$W(s) = -S_0/s - S_1,$$

- Пропорционально-дифференциальный (ПД-закон) –

$$W(s) = -S_1 - S_2s,$$

где S_0, S_1, S_2 – настройки регуляторов.

В лабораторной работе исследуются системы автоматического управления с точки зрения качества регулирования.

Все показатели качества регулирования подразделяются на несколько групп:

Прямые показатели качества.

1. Статическая ошибка регулирования $Y_{ст}$ – разность между установившимся значением регулируемой величины и её заданным значением: $Y_{ст} = Y_{уст} - Y_{зад}$ (рис. 12, а).
2. Динамическая ошибка регулирования $Y_{дин}$ – наибольшее отклонение в переходном процессе регулируемой переменной от её установившегося значения (рис. 12, б).
3. Время регулирования T_p – время, за которое разность между текущим значением регулируемой переменной и её заданным значением становится меньше некоторого числа ϵ : $|Y_{зад}(t) - Y(t)| < \epsilon$ (рис. 12, а).
4. Перерегулирование, измеряемое в процентах и равное отношению первого максимального отклонения регулируемой переменной от её установившегося значения к этому установившемуся значению (рис. 12, в):

$$\sigma = \frac{Y_{max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} \cdot 100 \% .$$

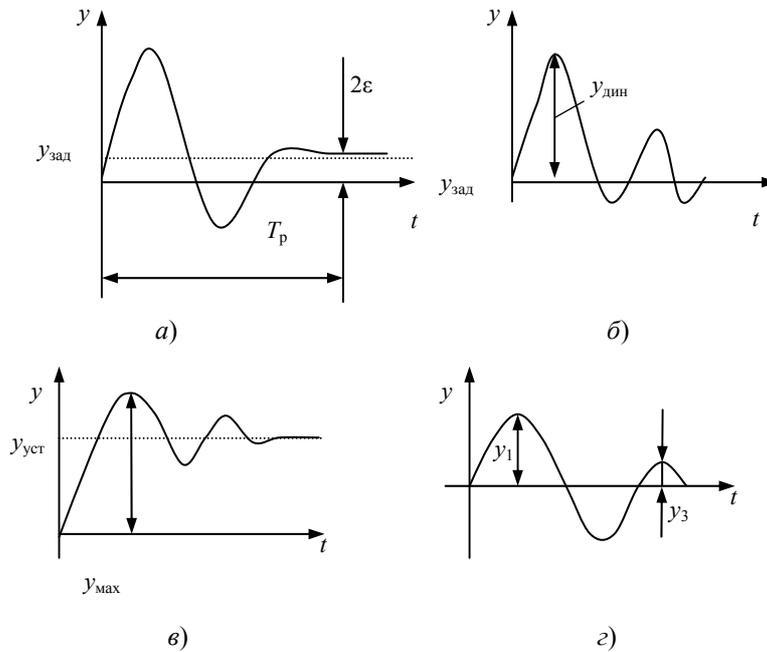


Рис. 12. Прямые показатели качества

5. Степень затухания, измеряемая в процентах, служит количественной оценкой интенсивности затухания колебательных процессов и определяется как отношение разности первой и третьей амплитуд к первой амплитуде (рис. 12, г):

$$\psi = \frac{Y_1 - Y_3}{Y_1} \cdot 100 \% .$$

Прямые показатели качества используются, как правило, при оценке качества переходного процесса уже рассчитанной системы автоматического управления. При проведении параметрического синтеза АСР в большинстве случаев используются другие показатели качества, которые рассматриваются ниже.

Корневые показатели качества.

1. *Степень устойчивости* – расстояние до мнимой оси ближайшего корня характеристического уравнения (рис. 13, а), характеризующая интенсивность затухания наиболее медленно затухающей не колебательной составляющей переходного процесса, которая определяется как $y(t) = Ce^{-\eta t}$. Степень устойчивости используется для оценки времени регулирования монотонных переходных процессов. Касательная к $y(t)$ в точке $t = 0$ отсекает на оси абсцисс отрезок $1/\eta$ (рис. 13, б). Время регулирования в этом случае определяется как $T_p = 3/\eta$.

2. *Степень колебательности* – модуль минимального отношения действительной части к мнимой части корня характеристического уравнения по всем корням характеристического уравнения (рис. 14):

$$m = \min_i \left| \frac{\text{Re}(s_i)}{\text{Im}(s_i)} \right| .$$

Степень колебательности характеризует затухание наиболее медленно затухающей составляющей, которая определяется как

$$y(t) = Ae^{-i\omega t} \sin(\omega t),$$

откуда следует, что изменение частоты влечёт к изменению экспоненциальной части. Степень колебательности однозначно связана со степенью затухания $\psi = 1 - e^{-2\pi m}$.

Интегральные критерии качества – представляют собой определённые интегралы в пределах от 0 до бесконечности от кривой переходного процесса или от ошибки регулирования. Эти критерии подразделяются на следующие виды:

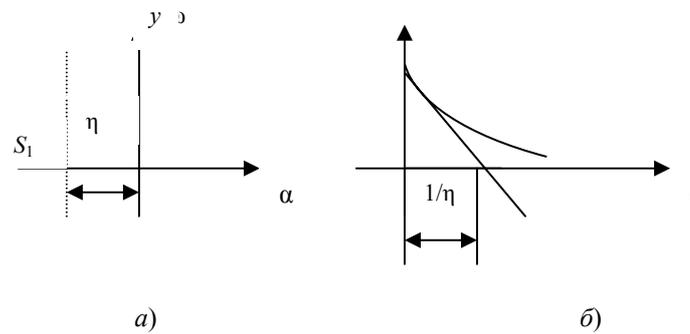


Рис. 13. К определению степени устойчивости:
 а – расположение корней характеристического уравнения;
 б – составляющая переходного процесса

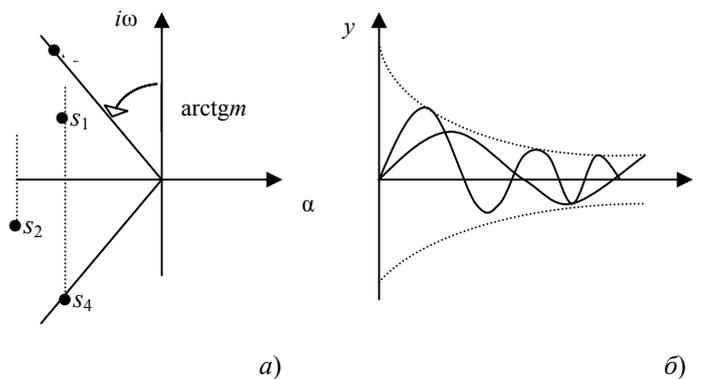


Рис. 14. К определению степени колебательности:
 а – расположение корней характеристического уравнения; б – переходные процессы

1. *Линейный интегральный критерий*

$$I_1 = \int_0^{\infty} y(t) dt .$$

2. *Квадратичный интегральный критерий*

$$I_2 = \int_0^{\infty} y^2(t) dt .$$

3. *Модульный интегральный критерий*

$$I_{\text{mod}} = \int_0^{\infty} |y(t)| dt .$$

4. *Обобщённый интегральный критерий*

$$I_{\text{об}} = \int_0^T \left(k_1 y^2(t) + k_2 \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2 \right) dt ,$$

где k_1 и k_2 – некоторые весовые коэффициенты.

Частотные критерии качества не имеют записи в явном виде. В системах автоматического регулирования существует взаимосвязь между частотными характеристиками системы и кривой переходного процесса. Таким образом, качество переходного процесса можно оценить по частотным характеристикам, не строя непосредственно кривой переходного процесса. Такая оценка проводится по вещественно-частотной характеристике.

Основные свойства вещественно-частотной характеристики и кривой переходного процесса выглядят следующим образом:

– *свойство линейности*: если ВЧХ можно представить в виде суммы $\text{Re}(\omega) = \sum_{i=1}^n \text{Re}_i(\omega)$ и каждой составляющей соответствует переходной процесс $\text{Re}_i(\omega) \rightarrow y_i(t)$, то и переходной процесс представляется суммой составляющих $y(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t)$;

– *соответствие масштабов по оси ординат*: если ВЧХ умножить на постоянный множитель, то соответствующее значение переходного процесса тоже умножается на этот множитель $\alpha \text{Re}_i(\omega) \rightarrow \alpha y_i(t)$;

– *соответствие масштабов по оси абсцисс*: Если аргумент в соответствующем выражении ВЧХ умножить на постоянное число, то аргумент в соответствующем выражении переходного процесса необходимо разделить на это число $\text{Re}_i(\alpha\omega) \rightarrow y_i(\omega/\alpha)$;

– *начальное значение ВЧХ равно конечному значению переходного процесса*: $\lim_{\omega \rightarrow \infty} \text{Re}(\omega) = \lim_{t \rightarrow 0} y(t)$;

– *конечное значение ВЧХ равно начальному значению переходного процесса*: $\lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}(\omega) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$;

– чтобы переходной процесс имел перерегулирование $\sigma \leq 18\%$, ВЧХ должна быть положительной, невозрастающей функцией частоты;

– *условие монотонного протекания переходного процесса*: чтобы переходной процесс имел монотонный характер, достаточно, чтобы соответствующая ему ВЧХ являлась положительной, непрерывной функцией частоты с отрицательной, убывающей по абсолютной величине производной;

– *определение наибольшего значения перерегулирования*: максимальное значение перерегулирования определяется по формуле

$$\sigma_{\max} = (1,18 \text{Re}_{\max} - \text{Re}(0)) / \text{Re}(0);$$

– если ВЧХ близка к трапециидальной, т.е. может быть аппроксимирована прямоугольной трапецией с диапазоном частот $0 - \omega_2$ и коэффициентом наклона $\chi = \omega_1/\omega_2$, то время регулирования переходного процесса заключается в пределах $\pi/\omega_2 \leq T_p \leq 4\pi/\omega_2$.

Основные методы построения кривой переходного процесса основываются также на частотных характеристиках. К ним относятся метод трапеций, который непосредственно использует свойства ВЧХ и переходного процесса, и метод Акульшина.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лабораторной работе моделируется замкнутая система автоматического регулирования. На вход системы подаётся единичное ступенчатое воздействие. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Провести запуск лабораторной работы. На экране монитора отображается окно программы (рис. 15).
2. Изучить окно программы. Окно содержит четыре раздела: параметры объекта, параметры регулятора, параметры управления программой, рассчитанный переходной процесс и рассчитанные программой в ходе выполнения лабораторной работы оценки качества регулирования (рис. 15).
3. Изучить используемые кнопки.
4. Ввести параметры объекта – время чистого запаздывания, коэффициенты a_i, b_j в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.
5. Задать время регулирования, весовые коэффициенты k_1, k_2 .
6. Исследовать качество регулирования в одноконтурной системе автоматического управления при использовании П-закона регулирования. Для этого задать настройку регулятора S_1 , запустить расчёт переходного процесса, кликнув кнопку «Пуск». На панели появятся графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения и рассчитанные программой оценки качества регулирования: статическая ошибка, динамическая ошибка, время регулирования, степень затухания интегральные критерии качества регулирования (квадратичный и обобщенный).
7. Повторить процедуру исследования качества регулирования, взяв настройки П-регулятора больше и меньше первоначальной. Помимо рассчитываемых программой прямых оценок качества регулирования определить корневые показатели качества регулирования. Сделать вывод о влиянии настройки S_1 на качество регулирования.
8. Исследовать качество регулирования в одноконтурной системе автоматического регулирования при использовании И-закона регулирования. Задать настройку И-регулятора S_0 . Построить переходные процессы, оценить качество регулирования. Повторить всю процедуру ещё с двумя значениями настройки, которые задать

больше и меньше первоначально заданной. Оценить корневые показатели качества регулирования. Сделать вывод о влиянии настройки S_0 на качество регулирования при использовании И-регулятора.

9. Исследовать качество регулирования в одноконтурной системе автоматического регулирования при использовании ПИ-закона регулирования. Задать настройки ПИ-регулятора – S_0, S_1 . Построить переходной процесс и по нему оценить качество регулирования. Повторить все расчёты ещё с двумя парами значений настроек. Оценить корневые показатели качества регулирования при использовании ПИ-регулятора, оценить влияние настроек S_0, S_1 на качество регулирования. Сделать соответствующие выводы.

10. Исследовать качество регулирования в одноконтурной системе автоматического регулирования при использовании ПД-закона регулирования. Задать настройки ПД-регулятора – S_2, S_1 . Построить переходные процессы и оценить качество регулирования. Повторить все расчёты ещё с двумя парами значений настроек. Рассчитать корневые показатели качества регулирования, оценить влияние настроек S_2, S_1 на качество регулирования при использовании ПД-регулятора. Сделать соответствующие выводы о качестве регулирования в системах с ПД-регулятором.

11. Провести анализ использования регуляторов с одним и двумя настроечными параметрами с точки зрения качества регулирования для одного и того же объекта.

Студенту следует знать, что после выполнения расчёта в окне появляется график переходных процессов по одному из каналов управления или возмущения (рис. 15). При нажатии кнопки «Увеличить» появляется диаграмма увеличенного переходного процесса последовательно по одному из двух каналов (рис. 16).

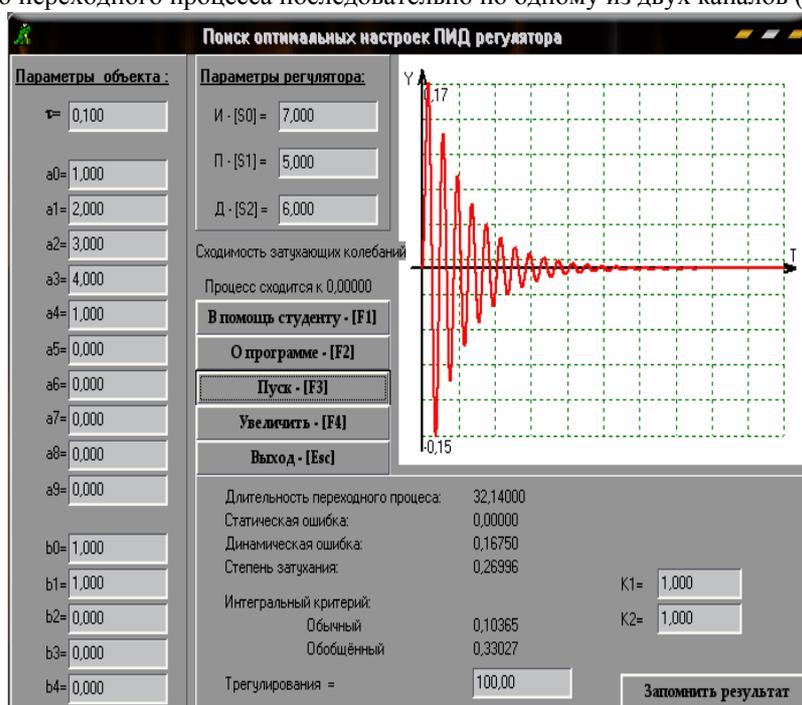


Рис. 15. Диалоговое окно задания параметров

Если необходимо, то можно скопировать график в память, используя кнопку «В буфер», а с помощью кнопки «Запомнить» – можно записать полученные данные в память и результат занести в текстовый файл «Laba4.txt».

12. Для одного из законов регулирования по заданию преподавателя построить ВЧХ замкнутой системы автоматического управления.

13. Оценить качество регулирования в одноконтурной системе автоматического управления по вещественно-частотной характеристике. Сравнить характеристики переходного процесса, полученного по ВЧХ и рассчитанного ранее.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы: передаточную функцию объекта регулирования, значения настроечных параметров регуляторов, весовые коэффициенты k_1, k_2 , используемые при расчёте обобщённого интегрального критерия.

3. Для каждого типа регулятора графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.

4. Для каждого типа регулятора оценку прямых показателей качества, проведённую по кривым переходных процессов. Полученные результаты свести в табл. 4.

Таблица 4

Критерий качества	S_0	S_1	S_2	Значение критерия
$T_{рег}$				
Ψ				
σ				
$Y_{дин}$				
$Y_{ст}$				

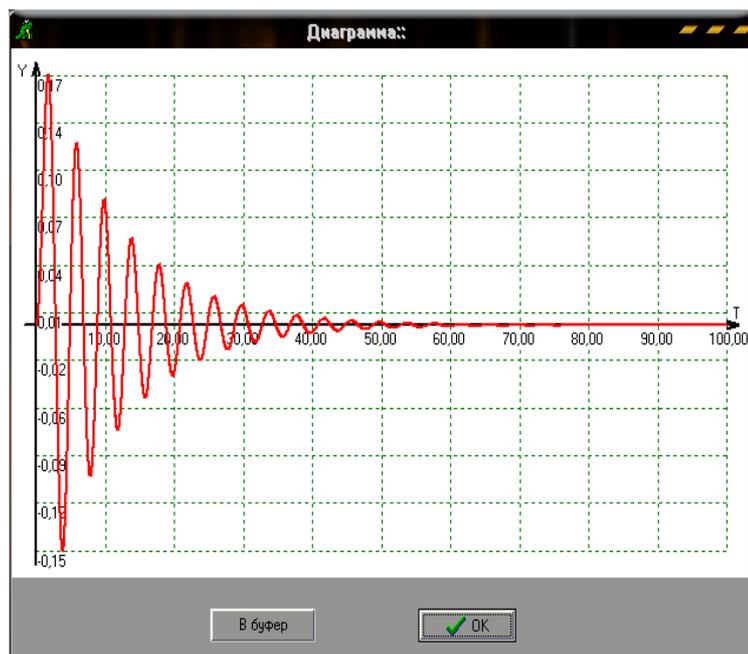


Рис. 16. Диаграмма

5. Для каждого типа регулятора анализ влияния его настроек на прямые показатели качества.

6. Сравнительный анализ законов регулирования с точки зрения качества регулирования. Провести анализ для каждого прямого показателя качества.

7. Расчёт корневых показателей качества для каждого типа регулятора.

8. Для заданного типа регулятора выражение и график ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.

9. Анализ переходного процесса по ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.

10. Сравнительный анализ переходных процессов, полученных расчётным путём и по частотным характеристикам, в частности по ВЧХ.

11. Рекомендации о применимости тех или иных законов регулирования по каждому из показателей качества регулирования.

12. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие прямые показатели качества Вам известны?

2. Как по степени устойчивости определить время регулирования аperiodического переходного процесса?

3. Существует ли связь между степенью колебательности и степенью затухания?

4. Какие из интегральных критериев качества регулирования нашли наибольшее применение?

5. Как оценить переходной процесс по частотным характеристикам?

Литература: [1], [2], [3].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ПО МОДУЛЮ И ФАЗЕ

Цель работы: Приобретение навыков моделирования системы автоматического управления с заданным запасом устойчивости.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить понятия и методы оценки запаса устойчивости.
2. Задать параметры разомкнутой системы автоматического управления.
3. Найти экспериментальный запас устойчивости по модулю и запас устойчивости по фазе.
4. Построить АФХ разомкнутой системы автоматического управления из расчётных данных.
5. Рассчитать запас устойчивости по модулю и запас устойчивости по фазе по расчётным данным.
6. Рассчитать погрешность в определении запаса устойчивости по модулю и запаса устойчивости по фазе.
7. Записать передаточную функцию замкнутой системы автоматического управления.
8. Записать характеристическое уравнение замкнутой системы автоматического управления.
9. Решить характеристическое уравнение (найти корни характеристического уравнения).
10. Рассчитать корневые оценки запаса устойчивости: степени устойчивости и степени колебательности.
11. Записать и построить АЧХ, ФЧХ и АФХ замкнутой системы автоматического управления.
12. Рассчитать показатель колебательности.
13. Провести анализ запаса устойчивости замкнутой системы автоматического управления, предложить меры по повышению этого запаса.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При синтезе систем автоматического управления недостаточно, чтобы система была устойчивой, так как даже небольшие внешние возмущения могут вывести её из устойчивого состояния и перевести в область неустойчивой работы. В связи с этим необходимо обеспечить некоторый запас устойчивости и оценить его количественно. Наиболее распространёнными оценками запаса устойчивости являются следующие оценки, которые подразделяются на две группы: корневые и частотные.

Корневые методы оценки запаса устойчивости.

Необходимым и достаточным условием устойчивости является отрицательность действительной части корней характеристического уравнения, т.е. все корни характеристического уравнения системы должны быть расположены слева от мнимой оси, которая является границей устойчивости. Корневые методы оценки запаса устойчивости основываются на том, что, если перенести границу устойчивости влево – в область устойчивости, то тем самым будет обеспечен запас устойчивости. К этим методам оценки запаса устойчивости относятся степень устойчивости и степень колебательности.

1. *Степень устойчивости* – расстояние до мнимой оси ближайшего корня характеристического уравнения (рис. 17) – $\eta = \min_i |\operatorname{Re} s_i|$. Введение в рассмотрение степени устойчивости равносильно переносу границы устойчивости влево на величину η , которая и характеризует запас устойчивости.

2. *Степень колебательности* – модуль минимального отношения действительной части к мнимой части корня характеристического уравнения по всем корням характеристического уравнения (рис. 18):

$$m = \min_i \left| \frac{\operatorname{Re}(s_i)}{\operatorname{Im}(s_i)} \right|.$$

В этом случае граница запаса устойчивости также, как и в первом случае сдвигается влево в область устойчивой работы и представляет собой ломаную линию АОВ.

Для обеспечения запаса устойчивости необходимо, чтобы эти корневые показатели были больше или равны заданным: $\eta \geq \eta_{\text{зад}}$, $m \geq m_{\text{зад}}$.

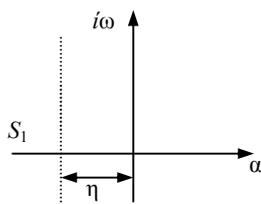


Рис. 17. К определению степени устойчивости

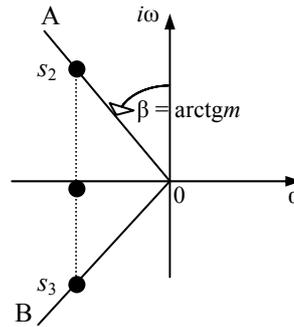


Рис. 18. К определению степени колебательности

Частотные методы оценки запаса устойчивости.

Одним из наиболее распространённых критериев устойчивости с практической точки зрения является частотный критерий устойчивости найквиста, согласно которому, если разомкнутая система автоматического управления устойчива, то для того, чтобы замкнутая система была устойчивой необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы не охватывала точку с координатами $(-1, i0)$. В связи с этим запас устойчивости можно определить по тому, насколько удалена точка $(-1, i0)$ от АФХ разомкнутой системы. Различают запас устойчивости по модулю и по фазе:

- *Запас устойчивости по модулю* – длина отрезка $|1 - OC|$ (рис. 19), т.е. расстояние от точки пересечения АФХ разомкнутой системы с отрицательной вещественной полуосью до точки $(-1, i0)$. Запас устойчивости по модулю показывает насколько можно изменить модуль разомкнутой системы, чтобы замкнутая система вышла на границу устойчивости.
- *Запас устойчивости по фазе* – это угол α (рис. 19) между вещественной отрицательной полуосью и лучом, проведённым из начала координат через точку пересечения АФХ разомкнутой системы с окружностью единичного радиуса с центром в начале координат. Запас устойчивости по фазе показывает насколько можно изменить фазу разомкнутой системы, чтобы замкнутая система вышла на границу устойчивости.

Эти частотные оценки запаса устойчивости прозрачны и понятны, но их практическое использование затруднено, поэтому в рассмотрение введена ещё одна оценка, являющаяся обобщённой оценкой уже рассмотренных – показатель колебательности.

Оценку запаса устойчивости системы автоматического управления можно произвести по величине максимума амплитудно-частотной характеристики. Оказывается, что, чем больше максимум имеет АЧХ замкнутой системы, тем ближе АФХ разомкнутой системы располагается к точке $(-1, i0)$, и, следовательно, тем меньший запас устойчивости имеет замкнутая система как по модулю, так и по фазе. Таким образом, показатель колебательности с физической точки зрения представляет собой максимум АЧХ замкнутой системы. Его определяют также как отношение отрезка OB к отрезку AB (рис. 18): $M = OB/AB$. Если задан показатель колебательности, то, следовательно, задан запас устойчивости.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лабораторной работе моделируется линейная разомкнутая система автоматического регулирования. На вход системы подаётся гармоническое возмущение вида $x(t) = \sin(\omega t)$. На выходе этой линейной системы также будет гармонический сигнал, который можно наблюдать. Выходной сигнал $y(t)$ отличается от входного по амплитуде и фазе.

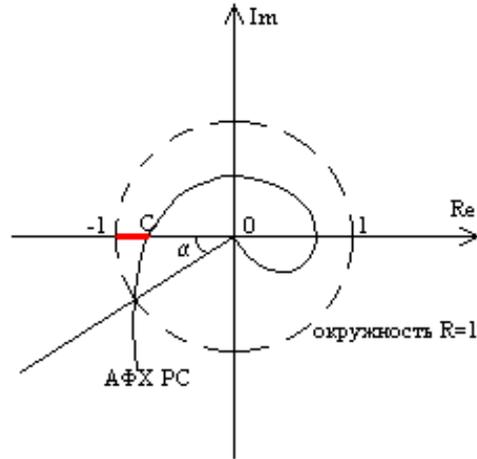


Рис. 19. К определению частотных оценок запаса устойчивости

Производя соответствующие измерения, определяется запас устойчивости замкнутой системы.

Лабораторная работа проводится в следующем порядке:

1. Произвести запуск программы (лабораторной работы). На экране монитора отображается окно программы (рис. 20).
2. Изучить окно программы. Окно содержит разделы: параметры объекта, параметры регулятора, параметры управления программой, входной гармонический сигнал, рассчитанный переходной процесс и рассчитанная программой оценка запаса устойчивости (рис. 20).
3. Изучить используемые кнопки.
4. Задать и ввести параметры объекта ($\tau, a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$) в соответствии с вариантом задания.
5. Выбрать тип регулятора (П-, И-, ПИ-, ПД-, ПИД) и задать его настройки (S_0, S_1, S_2).
6. Задать начальную частоту входных гармонических колебаний путём введения в окошко панели «Возмущение».
7. Запустить расчёт процесса, кликнув кнопку «Пуск».
8. После окончания переходного процесса (когда амплитуда $y(t)$ не станет изменяться), кликнуть кнопку «Стоп», затем кнопку «Увеличить» (рис. 20).

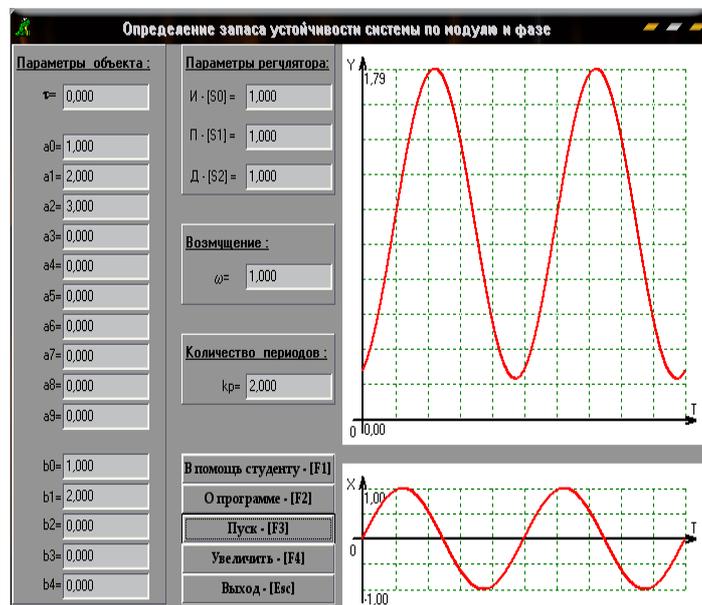
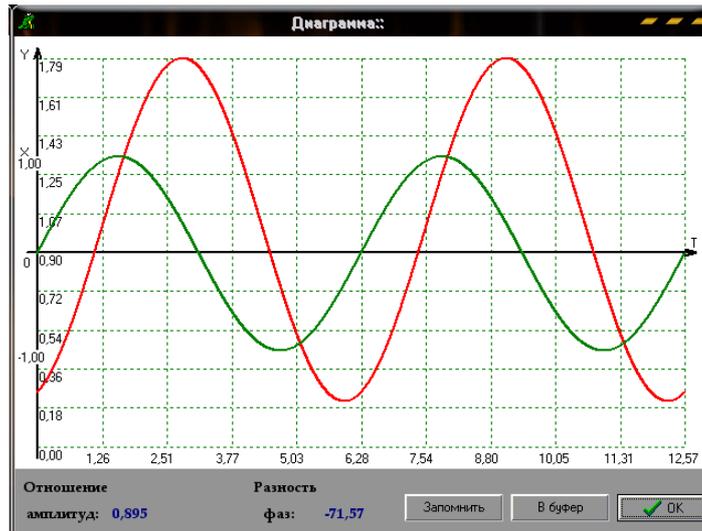


Рис. 20. Окно задания параметров и диаграмма для определения запаса устойчивости

9. В открывшемся окне (рис. 20) находится график входного и выходного сигналов, а также значения отношения амплитуд $M(\omega)$ и разность фаз $\Delta\varphi(\omega)$, вычисляемых по формуле:

$$M(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)};$$

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega).$$

10. С помощью кнопки «В буфер» можно скопировать график в память, а с помощью кнопки «Запомнить» – записать полученные данные в память и результат занести в текстовый файл «Laba5.txt».

11. Изменяя частоту входных гармонических колебаний, повторить расчёты, добиваясь сдвига фаз, равного 180° ; отношения амплитуд, равного 1.

12. Экспериментально определить запас устойчивости по модулю и запас устойчивости по фазе.

13. Определить на основе $W_{PC}(i\omega)$ теоретические значения запаса устойчивости по модулю и запаса устойчивости по фазе и определить погрешности их экспериментального определения.

14. Записать передаточную функцию замкнутой системы.

15. Записать характеристическое уравнение замкнутой системы по передаточной функции.

16. Найти корни характеристического уравнения замкнутой системы, по которым определить степень устойчивости и степень колебательности.

17. Записать АФХ замкнутой системы.

18. Записать и построить АЧХ замкнутой системы, по которой определить показатель колебательности.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы.
3. Структурную схему системы автоматического управления с записью передаточных функций объекта и регулятора.
4. Запись экспериментальных данных, которая оформляется в табл. 5.

Таблица 5

№ опыта	ω	$\Delta\varphi$	M
1			
2			

5. Определение запаса устойчивости по модулю и запаса устойчивости по фазе по экспериментальным данным.
6. Теоретический расчёт запаса устойчивости по модулю и запаса устойчивости по фазе.
7. Расчёт погрешности определения запаса устойчивости по модулю и запаса устойчивости по фазе по экспериментальным данным и в результате теоретических расчётов.
8. Расчёт корневых оценок запаса устойчивости: степени устойчивости и степени колебательности.
9. Запись и построение АЧХ и АФХ замкнутой системы.
10. Расчёт показателя колебательности.
11. Анализ запаса устойчивости замкнутой системы, меры по повышению этого запаса.
12. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое «запас устойчивости»?
2. Какие параметры оценки запаса устойчивости Вам известны?
3. Каков физический смысл показателя колебательности?
4. Какие показатели относятся к корневым оценкам запаса устойчивости?
5. В чём заключается физический смысл запаса устойчивости по модулю и по фазе?
6. В чём заключается физический смысл расширенной амплитудно-фазовой характеристики (РАФХ)?
7. Как оценить запас устойчивости, если известна амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы?
8. Что такое степень устойчивости?
9. Как определить степень колебательности?
10. Какая существует связь между запасом устойчивости по модулю и фазе с показателем колебательности?
11. Если известна РАФХ разомкнутой системы автоматического регулирования, можно ли по ней оценить запас устойчивости замкнутой системы?
12. Сформулируйте аналог критерия Найквиста по обеспечению устойчивости систем автоматического регулирования.

Литература: [1], [2], [3].

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИД-ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: Исследование систем автоматического управления с ПИД-законом регулирования.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить ПИД-закон регулирования и его применение в системах автоматического управления.
2. Рассчитать корневые показатели качества регулирования в одноконтурной системе автоматического управления с ПИД-регулятором (расчёты провести для трёх значений троек настроечных параметров).

3. Рассчитать оценки запаса устойчивости в системе автоматического управления при использовании ПИД-регулятора.
4. Провести анализ качества регулирования одноконтурной системы автоматического управления при использовании ПИД-закона регулирования, с этой целью построить графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения для заданной тройки настроек регулятора.
5. Оценить прямые показатели качества по кривым переходных процессов, а также значение обобщённого интегрального критерия качества.
6. Провести анализ влияния настроечных параметров ПИД-регулятора на прямые показатели качества и обобщённый интегральный критерий.
7. Провести анализ влияния настроечных параметров ПИД-регулятора на корневые показатели качества.
8. Записать выражение и построить график ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.
9. Провести анализ переходного процесса по ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.
10. Провести сравнительный анализ переходных процессов, полученных экспериментальным путём в ходе выполнения лабораторной работы и по частотным характеристикам (ВЧХ).
11. Провести анализ влияния настроечных параметров ПИД-регулятора на частотные оценки запаса устойчивости и запас устойчивости одноконтурной системы автоматического управления.
12. Сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В лабораторной работе исследуется одноконтурная замкнутая система автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис.21.

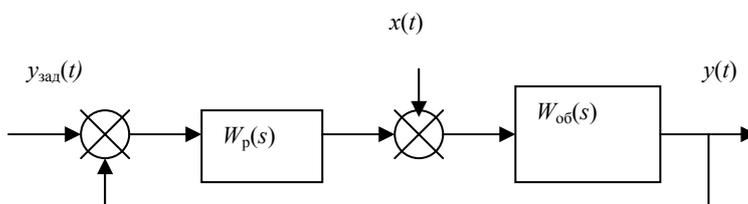


Рис. 21. Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления

Одноконтурная система автоматического регулирования состоит из объекта с передаточной функцией $W_{об}(s)$ и ПИД-регулятора с передаточной функцией $W_p(s) = -S_0 / s - S_1 - S_2 s$, где S_0, S_1, S_2 – настройки регулятора. Считается, что объект известен.

В лабораторной работе исследуется система автоматического управления с ПИД-регулятором с точки зрения оценки качества регулирования и запаса устойчивости по сравнению с другими типовыми законами регулирования.

Все показатели качества регулирования рассматривались в лабораторной работе 4, а оценки запаса устойчивости в лабораторной работе 5, поэтому студенту для воспроизведения их в памяти следует обратиться к этим лабораторным работам.

ПИД-закон регулирования является самым сложным законом регулирования, который сочетает в себе все достоинства трёх простейших законов регулирования: высокое быстродействие, благодаря наличию импульса по производной; отсутствие статической ошибки, которое обеспечивает интегральная составляющая. На практике применение регуляторов с дифференциальными составляющими не всегда целесообразно, а иногда и недопустимо. Так для объектов с большим чистым запаздыванием по каналу регулирования бесполезно вводить воздействие по производной от регулируемой величины. Этот импульс будет поступать в регулятор по истечении времени чистого запаздывания после прихода возмущения, за которое в объекте могут накопиться большие отклонения. Более того, в таких случаях регулятор может «раскачать» объект и система потеряет устойчивость. Применение на практике ПИД-регулятора оправдано при производстве особо чистых веществ, в производствах, где необходима высокая точность поддержания значений регулируемых переменных и других подобных производствах.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лабораторной работе моделируется замкнутая система автоматического регулирования. На вход системы подаётся единичное ступенчатое воздействие. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Произвести запуск лабораторной работы. На экране монитора отображается окно программы (рис. 22).
2. Изучить окно программы. Окно содержит четыре раздела: параметры объекта, параметры регулятора, параметры управления программой, рассчитанный переходной процесс и рассчитанные программой в ходе выполнения лабораторной работы оценки качества регулирования (рис. 22).
3. Изучить используемые клавиши.
4. Ввести параметры объекта – τ и коэффициенты a_i, b_j в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.
5. Задать время регулирования, весовые коэффициенты k_1, k_2 .
6. Исследовать качество регулирования в одноконтурной системе автоматического управления при использовании ПИД-закона регулирования. Для этого задать настройки регулятора S_0, S_1, S_2 . Запустить расчёт переходного процесса, кликнув кнопку «Пуск». На панели появятся графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения и рассчитанные программой оценки качества регулирования: статическая ошибка, динамическая ошибка, время регулирования, степень затухания интегральные критерии качества регулирования (квадратичный и обобщённый).
7. Повторить процедуру исследования качества регулирования при двух других значениях троек настроек ПИД-регулятора. Сравнить полученные показатели качества. Сделать соответствующие выводы.
8. Исследовать влияние на качество регулирования составляющих ПИД-закона регулирования. Для этого настройки ПИД-регулятора варьировать следующим образом: фиксировать две настройки регулятора и изменять третью, взяв её больше и меньше первоначального значения. Подобную процедуру повторить для всех трёх настроек S_0, S_1, S_2 . Сравнить полученные показатели. Сделать вывод о влиянии составляющих S_0, S_1, S_2 на качество регулирования.
9. Определить корневые показатели качества регулирования аналитическим путём, оценить влияние настроек S_0, S_1, S_2 на качество регулирования. Сделать соответствующие выводы.
10. Построить ВЧХ замкнутой системы автоматического управления.
11. Оценить качество регулирования в одноконтурной системе автоматического управления по вещественно-частотной характеристике при фиксированных значениях настроек регулятора. Сравнить характеристики переходного процесса, полученного по ВЧХ и рассчитанного ранее.

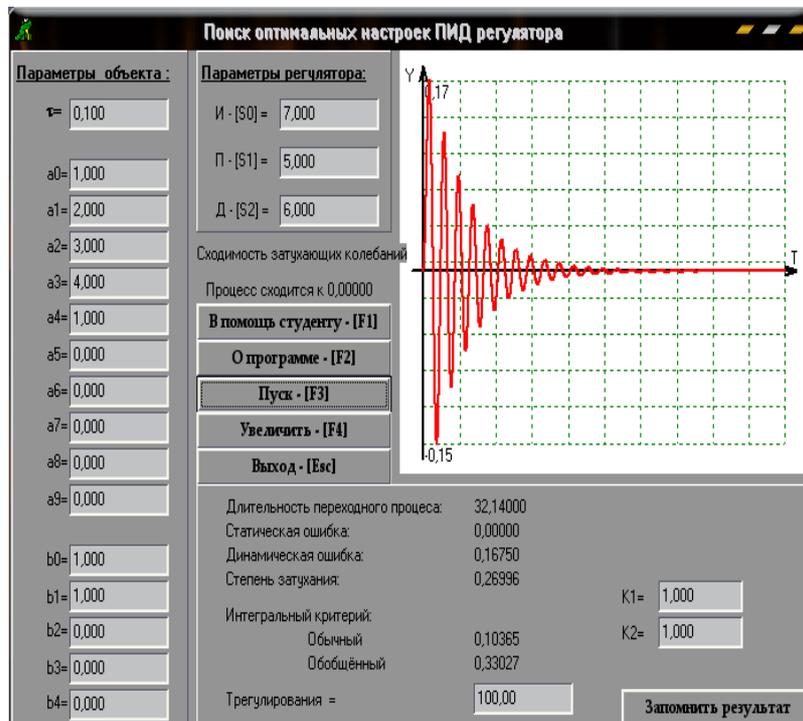


Рис. 22. Диалоговое окно задания параметров

12. Оценить запас устойчивости в системе, рассчитав запас устойчивости по модулю, запас устойчивости по фазе и показатель колебательности при фиксированных значениях настроек регулятора.

13. Рассчитать корневые оценки запаса устойчивости. Построить расширенную амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы автоматического регулирования для каждой корневой оценки запаса устойчивости при фиксированных значениях настроек регулятора. Сделать соответствующие выводы.

14. Исследовать влияние составляющих настроек ПИД-регулятора на запас устойчивости. Для этого варьировать настройки ПИД-регулятора таким же образом, как и при исследовании качества регулирования. Сделать соответствующие выводы.

Студенту следует знать, что после выполнения расчёта в окне появляется график переходных процессов по одному из каналов управления или возмущения (рис. 22). При нажатии кнопки «Увеличить» последовательно появляется диаграмма увеличенного переходного процесса по одному из двух каналов (рис. 23).

Если необходимо, то можно скопировать график в память, используя кнопку «В буфер», а с помощью кнопки «Запомнить» – можно записать полученные данные в память и результат занести в текстовый файл «Laba4.txt».

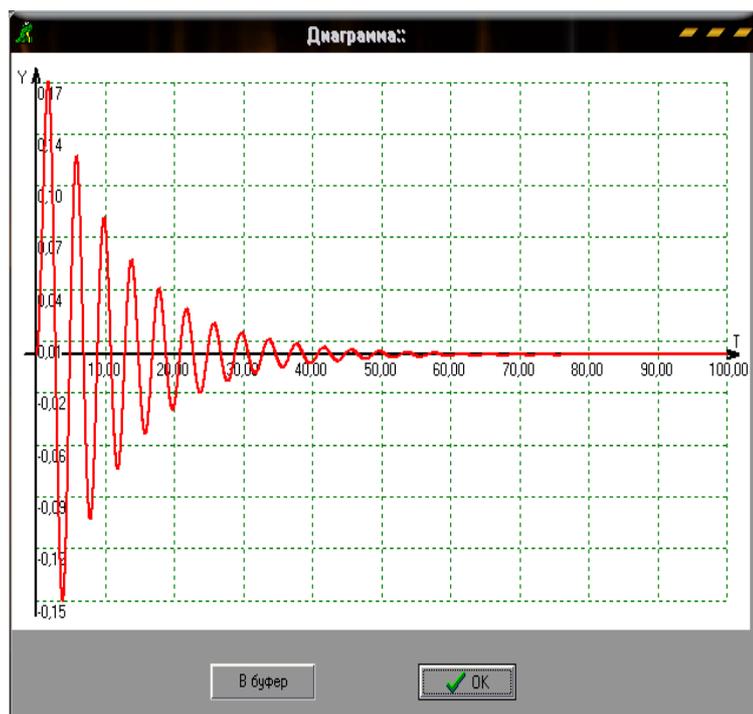


Рис. 23. Диаграмма переходного процесса в системе ПИД-регулятором
СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы: передаточную функцию объекта регулирования, значения настроечных параметров регуляторов, весовые коэффициенты k_1 , k_2 , используемые при расчёте обобщенного интегрального критерия.
3. Для каждой тройки значений настроек регулятора графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.
4. Для каждой тройки значений настроек регулятора оценку прямых показателей качества, проведённую по кривым переходных процессов, и значение обобщённого интегрального критерия качества. Полученные результаты свести в табл. 6.
5. Анализ влияния составляющих ПИД-регулятора на прямые показатели качества и обобщённый интегральный критерий.
6. Расчёт корневых показателей качества: степени устойчивости и степени колебательности для каждой тройки значений настроек регулятора в замкнутой системе автоматического управления.
7. Анализ влияния составляющих ПИД-регулятора на корневые показатели качества.
8. Для первоначально заданной тройки значений настроек регулятора записать выражение и построить график ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.

9. Анализ переходного процесса по ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.

Таблица 6

Критерий качества	S_0	S_1	S_2	Значение критерия
$T_{\text{рег}}$				
ψ				
σ				
$Y_{\text{дин}}$				
$Y_{\text{ст}}$				
$I_{\text{обоб}}$				

10. Расчёт оценочных показателей запаса устойчивости: запаса устойчивости по модулю, запаса устойчивости по фазе, показателя колебательности для фиксированной тройки значений настроек регулятора. Полученные результаты свести в табл. 7.

Таблица 7

Оценка запаса устойчивости	S_0	S_1	S_2	Значение оценки запаса устойчивости
Запас устойчивости по модулю				
Запас устойчивости по фазе				
Показатель колебательности				

11. Анализ влияния составляющих настроек ПИД-регулятора на частотные оценки запаса устойчивости.

12. Расчёт и построение расширенных амплитудно-фазовых характеристик (РАФХ) разомкнутой системы автоматического управления для заданной степени устойчивости и заданной степени колебательности при фиксированном значении двух настроек регулятора и трёх значений третьей настройки регулятора.

13. Анализ влияния исследуемой составляющей ПИД-регулятора на запас устойчивости замкнутой системы автоматического управления.

14. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими достоинствами обладает ПИД-закон регулирования?
2. Назовите области применения ПИД-закона регулирования.
3. Чем объясняется высокое быстродействие ПИД-закона регулирования?
4. Чему равна статическая ошибка ПИД-закона регулирования?
5. За счёт чего снижается динамическая ошибка ПИД-закона регулирования?

Литература: [1], [2], [3].

Лабораторная работа 7

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: Изучение приближённых методов расчёта оптимальных настроек регуляторов.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить приближённые методы расчёта оптимальных настроек регуляторов.
2. Рассчитать оптимальные настройки заданного регулятора методом незатухающих колебаний.
3. Получить графики переходных процессов в одноконтурной системе автоматического управления по каналу управления и по каналу возмущения.

4. Провести оценку прямых показателей качества регулирования по кривой переходного процесса. Оценить значение обобщённого интегрального критерия качества.
5. Рассчитать корневые показатели качества регулирования и оценки запаса устойчивости: степень устойчивости и степень колебательности в замкнутой системе автоматического управления при оптимальных настройках регулятора.
6. Построить амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы автоматического управления.
7. Рассчитать частотные показатели запаса устойчивости: запас устойчивости по модулю, запас устойчивости по фазе, показатель колебательности.
8. Построить расширенную амплитудно-фазовую характеристику (РАФХ) разомкнутой системы автоматического управления для рассчитанной степени устойчивости и рассчитанной степени колебательности.
9. Оценить запас устойчивости в исследуемой системе автоматического управления.
10. Сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Провести параметрический синтез системы автоматического управления – это значит определить оптимальные настройки регулятора при заданной структуре системы автоматического управления.

В настоящее время разработано много методов расчёта настроек регулятора, одни из них являются более точными, но трудоёмкими, другие – простыми, но приближёнными.

Рассчитать систему автоматического управления – это, следовательно, найти настройки регулятора, которые отвечали бы определённым требованиям. Принято считать, что настройки регулятора являются оптимальными, если они удовлетворяют двум требованиям: обеспечивают заданный запас устойчивости замкнутой системы автоматического управления и наилучшее качество регулирования.

К точным методам относятся метод, использующий расширенные частотные характеристики, и метод расчёта оптимальных настроек регулятора по амплитудно-фазовой характеристике регулируемого объекта. Наиболее распространённым приближённым методом является метод незатухающих колебаний.

Метод незатухающих колебаний определения оптимальных настроек регулятора обеспечивает запас устойчивости, некоторую степень затухания и небольшую динамическую ошибку.

Расчёт регулятора с одним настроечным параметром производится один этап и основывается на расчёте критического значения настройки пропорциональной составляющей, при которой система будет находиться на границе устойчивости. П-регулятор рассчитывается по обычным частотным характеристикам объекта. Уравнения для расчёта критических значений настройки и частоты имеют вид:

$$\begin{aligned}\varphi_{об}(\omega_{кр}) &= -\pi; \\ S_{1кк} &= 1 / M_{об}(\omega_{кр})\end{aligned}$$

Расчёт других регуляторов производится в два этапа: на первом – производится определение критических значений пропорциональной составляющей и частоты, на втором – обеспечивается степень затухания $\psi = 0,8 \dots 0,9$. Оптимальные настройки регуляторов находят по следующим формулам:

$$\text{П-регулятор: } S_1^{опт} = 0,55 S_{1кк};$$

$$\text{ПИ-регулятор: } S_1^{опт} = 0,45 S_{1кк} \omega_{кр}; S_0^{опт} = 0,086 S_{1кк} \omega_{кр};$$

$$\text{ПИД-регулятор: } S_1^{опт} = 0,6 S_{1кк}; S_0^{опт} = 0,192 S_{1кк} \omega_{кр};$$

$$S_2^{опт} = 0,471 S_{1кк} / \omega_{кр}.$$

После того, как определили оптимальные настройки регулятора в системе автоматического управления, необходимо в качестве проверки этих настроек, что они действительно являются оптимальными, построить переходной процесс и оценить по нему прямые показатели качества регулирования.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выполнение лабораторной работы начинается с предварительного расчёта оптимальных настроек регулятора в системе автоматического управления. В связи с этим лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Ознакомиться с заданием на лабораторную работу (объектом управления, исследуемым законом регулирования).
2. Рассчитать оптимальные настройки заданного регулятора методом незатухающих колебаний.
3. Произвести запуск лабораторной работы. На экране монитора отобразится окно программы (рис. 22).

4. Изучить окно программы. Окно содержит четыре раздела: параметры объекта, параметры регулятора, параметры управления программой, рассчитанный переходный процесс и рассчитанные программой в ходе выполнения лабораторной работы оценки качества регулирования (рис. 22).
5. Изучить используемые клавиши.
6. Ввести параметры объекта – коэффициенты a_i, b_j в соответствии с вариантом задания.
7. Ввести рассчитанные значения настроечных параметров регулятора.
8. Задать время регулирования, весовые коэффициенты k_1, k_2 .
9. Запустить расчёт переходного процесса, кликнув кнопку «Пуск». На панели появятся графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения (рис. 23).
10. Исследовать качество регулирования в системе автоматического управления, для чего по рассчитанной кривой переходного процесса определить прямые показатели качества регулирования. Сделать соответствующие выводы.
11. Определить корневые показатели качества регулирования в исследуемой системе автоматического управления.
12. Построить амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы.
13. Оценить запас устойчивости замкнутой системы автоматического управления, рассчитав запас устойчивости по модулю, запас устойчивости по фазе и показатель колебательности.
14. Исследовать запас устойчивости по корневым оценкам, для этого построить расширенную амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы автоматического регулирования. Сделать соответствующие выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы: передаточную функцию объекта регулирования, весовые коэффициенты k_1, k_2 , используемые при расчёте обобщённого интегрального критерия, закон регулирования.
3. Расчёт оптимальных настроек заданного регулятора методом незатухающих колебаний.
4. Для рассчитанных оптимальных настроек регулятора графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.
5. Оценку прямых показателей качества регулирования, проведённую по кривым переходных процессов, и значение обобщённого интегрального критерия качества.
6. Расчёт корневых показателей качества регулирования и оценки запаса устойчивости: степени устойчивости и степени колебательности в замкнутой системе автоматического управления с рассчитанными оптимальными настройками регулятора.
7. Амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы автоматического управления.
8. Расчёт оценочных показателей запаса устойчивости: запаса устойчивости по модулю, запаса устойчивости по фазе, показателя колебательности.
9. Расчёт и построение расширенной амплитудно-фазовой характеристики (РАФХ) разомкнутой системы автоматического управления для рассчитанной степени устойчивости и рассчитанной степени колебательности.
10. Оценку запаса устойчивости в исследуемой системе автоматического управления.
11. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое параметрический синтез систем автоматического управления?
2. Почему рассчитываемые настройки регулятора называются оптимальными?
3. Какие методы расчёта настроек регулятора Вам известны?
4. Какие критерии оптимальности заложены в методе незатухающих колебаний?
5. С чем связано деление методов расчёта оптимальных настроек регуляторов на точные и приближённые?
6. Сформулируйте суть метода, использующего в расчёте оптимальных настроек регулятора расширенные амплитудно-фазовые характеристики.
7. В чём заключается критерий качества регулирования – критерий оптимальной фильтрации, в каком методе расчёта оптимальных настроек регулятора он используется?

Литература: [1], [2], [3].

ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ

Цель работы: Изучение типовых элементарных звеньев.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ

1. Изучить уравнения движения предложенных типовых звеньев.
2. Изучить передаточные функции этих звеньев.
3. Изучить частотные характеристики этих звеньев.
4. Изучить временные характеристики этих звеньев.
5. Изучить влияние параметров передаточной функции на форму кривой разгона для предложенных типовых звеньев.

Типовым динамическим звеном называется динамическая система, передаточная функция которой имеет вид простой дроби.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ЗВЕНЬЯ

1. *Пропорциональное звено.*

Уравнение звена – $y(t) = kx(t)$.

Передаточная функция – $W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = k$.

Переходная функция – $h(t) = k_1 \cdot 1(t)$.

Изменяемым параметром усилительного звена является коэффициент усиления k , который принят равным $k = 5, k = 25, k = 45$.

Графики переходной функции при трёх различных значениях коэффициента усиления представлены на рис. 24.

Как видно из графика кривая разгона для пропорционального звена равна постоянной величине – коэффициенту усиления звена k .

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что пропорциональное звено лишь «усиливает» входную величину в соответствии с коэффициентом усиления, мгновенно и без искажений воспроизводя её на выходе.

Переходная функция звена может быть получена по его передаточной функции: $h(t) = L^{-1}[W(s)/s]$. Для трёх значений коэффициента усиления аналитическое выражение переходной функции будет соответственно:

$$h(t) = 5 \cdot 1(t); \quad h(t) = 25 \cdot 1(t); \quad h(t) = 45 \cdot 1(t).$$

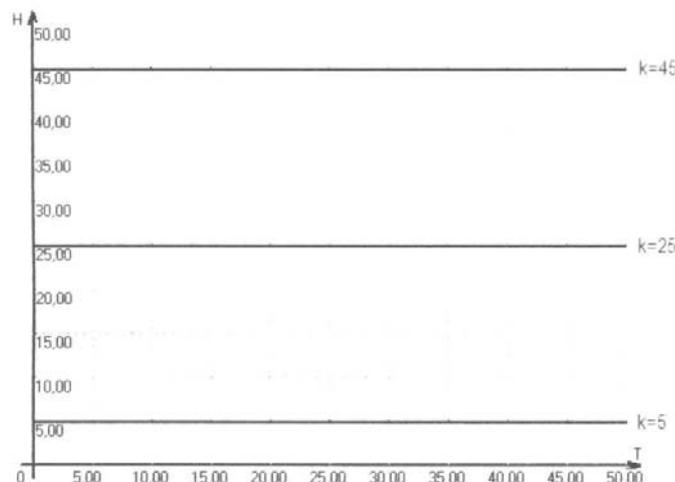


Рис. 24. Переходные функции усилительного звена при различных значениях коэффициента усиления

Анализ переходных функций усилительного звена, полученных экспериментально и аналитически, показывает, что они полностью совпадают.

II. *Интегрирующее звено.*

$$\text{Уравнение звена} - y(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t x(\tau) d\tau.$$

$$\text{Передачная функция} - W(s) = \frac{1}{T_{\text{и}} s}.$$

$$\text{Переходная функция} - y(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t d\tau = \frac{1}{T_{\text{и}}} t.$$

Основным параметром звена является параметр $T_{\text{и}}$, который задаётся тремя значениями – 0,5; 1, 5. Графики переходных функций интегрирующего звена, полученных экспериментально для трёх значений параметра $T_{\text{и}}$ представлены на рис. 25.

Аналитические выражения переходных функций для трёх значений $T_{\text{и}}$ имеют вид – $h(t) = 0,5t$; $h(t) = t$; $h(t) = 5t$, т.е. переходной функцией интегрирующего звена является прямая, выходящая из начала координат под углом $\gamma = \text{arctg}(1/T_{\text{и}})$. Графическое изображение переходных функций, рассчитанных по аналитическим выражениям и полученных экспериментально, полностью совпадает.

Анализ переходной функции показывает, что её значения обратно пропорциональны постоянной времени интегрирующего звена $T_{\text{и}}$, причём при $t \rightarrow \infty, h(t) \rightarrow \infty$. Скорость изменения переходной функции постоянна и определяется параметром $T_{\text{и}}$.

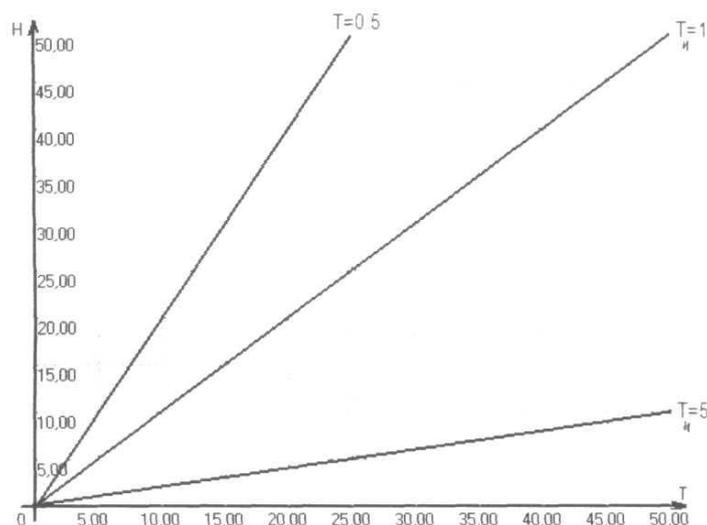


Рис. 25. Переходные функции интегрирующего звена

III. *Апериодическое звено 1-го порядка.*

$$\text{Уравнение звена} - Ty'(t) + y(t) = kx(t).$$

$$\text{Передачная функция} - W(s) = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{k}{Ts + 1}.$$

$$\text{Переходная функция} - h(t) = k(1 - \exp(-t/T)).$$

Параметрами аperiодического звена 1-го порядка являются коэффициент передачи звена k и постоянная времени звена T . Как и в предыдущих случаях экспериментальные исследования проводились для трёх групп параметров звена: 1) $k = 25, T = 3$; 2) $k = 50, T = 1$; 3) $k = 50, T = 7$.

Аналитические выражения переходной функции имеют соответственно вид:

$$h(t) = 25(1 - \exp(-t/3)); \quad h(t) = 50(1 - \exp(-t)); \quad h(t) = 50(1 - \exp(-t/7)).$$

Как видно из аналитического выражения, переходной функцией аperiодического звена 1-го порядка является экспонента, поэтому график (рис. 26) представляет собой выпуклую кривую, стремящуюся при $t \rightarrow \infty$ к значению коэффициента передачи, т.е. $h(\infty) = k$. Графики переходных функций, рассчитанные и полученные экспериментально при различных значениях параметров звена, совпадают. Как показывает анализ переходных

функций, коэффициент передачи оказывает влияние на само значение переходной функции: чем больше коэффициент передачи, тем больше значение функции. Постоянная времени T влияет на скорость изменения переходной функции: чем больше постоянная времени, тем меньше скорость изменения переходной функции и наоборот.

IV. Аperiodическое звено 2-го порядка.

Уравнение звена – $T_1 T_2 y''(t) + (T_1 + T_2) y'(t) + y(t) = kx(t)$.

Передаточная функция звена –

$$W(s) = \frac{k}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2) s + 1} = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

Кривая разгона – $h(t) = C_0 + C_1 e^{-t/T_1} + C_2 e^{-t/T_2}$.

Параметрами аperiodического звена 2-го порядка являются: коэффициент передачи k , постоянная времени T_1 , постоянная времени T_2 . Экспериментальные исследования звена проводились при трёх различных тройках параметров звена: 1) $k = 50, T_1 = 4, T_2 = 4$; 2) $k = 50, T_1 = 10, T_2 = 2$; 3) $k = 20, T_1 = 2, T_2 = 10$ и представлены на рис. 27.

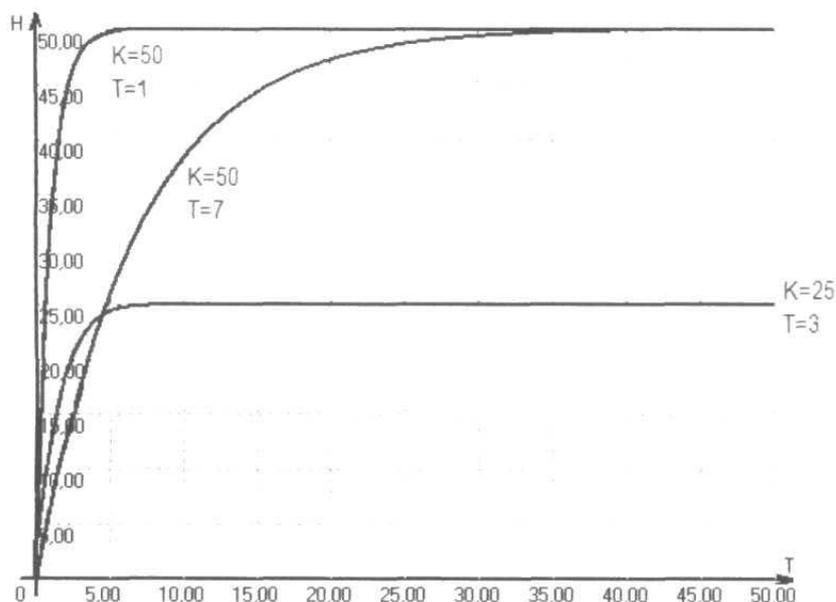


Рис. 26. Переходные функции аperiodического звена первого порядка

Аналитические выражения переходной функции, полученные по передаточной функции, соответственно для трёх вариантов имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} h(t) &= 50t \exp(-t/4); \\ h(t) &= 50 + 1250 \exp(-t/10) - 250 \exp(-t/2); \\ h(t) &= 20 - 100 \exp(-t/2) + 1000 \exp(-t/10). \end{aligned}$$

Графическое изображение переходных функций аperiodического звена 2-го порядка, полученных аналитическим путём и экспериментальным, полностью совпадают.

Анализ переходных функций показывает, что при $t \rightarrow \infty, h(t) \rightarrow k$, причём, чем больше значение коэффициента передачи, тем больше значение переходной функции. Переходные функции аperiodического звена 2-го порядка с геометрической точки зрения представляют собой выпуклые кривые, но в отличие от переходных функций аperiodического звена 1-го порядка они имеют перегиб.

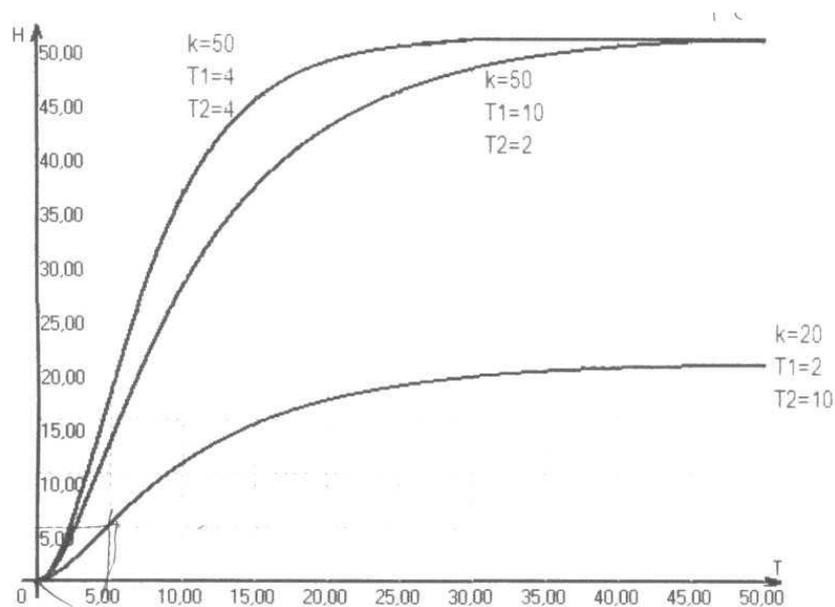


Рис. 27. Переходные функции аperiodического звена второго порядка

Аperiodическое звено 2-го порядка изменяет входную величину на выходе на коэффициент усиления k с течением времени. Скорость изменения переходной функции тем больше, чем меньше постоянные времени T_1 и T_2 . Аperiodическое звено 2-го порядка можно структурно представить в виде последовательного соединения двух звеньев 1-го порядка с постоянными времени T_1 и T_2 .

Выводы.

Исследование типовых звеньев и их соединений показало разнообразность поведения их переходных функций. Возможность воздействовать на параметры звена позволяет добиться желаемых результатов на выходе, а также желаемой скорости и формы переходных функций, т.е. получить оптимальные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарева, Т.Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 308 с.
2. Лазарева, Т.Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.
3. Лазарева, Т.Я. Линейные системы автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – 264 с.
4. Лукас, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Лукас. – М. : Недра, 1990. – 416 с.

**ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет
Кафедра «Информационные процессы и управление»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

по курсу «ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»

ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ

Группа А-31
Студент: Иванов А.А.

Преподаватель:
К.т.н. доцент
Петрова Л.И.

Тамбов 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа 1. ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ	3
Лабораторная работа 2. СНЯТИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	7
Лабораторная работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И АСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИ- РОВАНИЯ	13
Лабораторная работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	25
Лабораторная работа 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИ- ВОСТИ ПО МОДУЛЮ И ФАЗЕ	35
Лабораторная работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПИД-ЗАКОНА РЕ- ГУЛИРОВАНИЯ	43
Лабораторная работа 7. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИС- ТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИ- РОВАНИЯ	50
ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	60
ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА К ЛАБОРА- ТОРНОЙ РАБОТЕ	61

