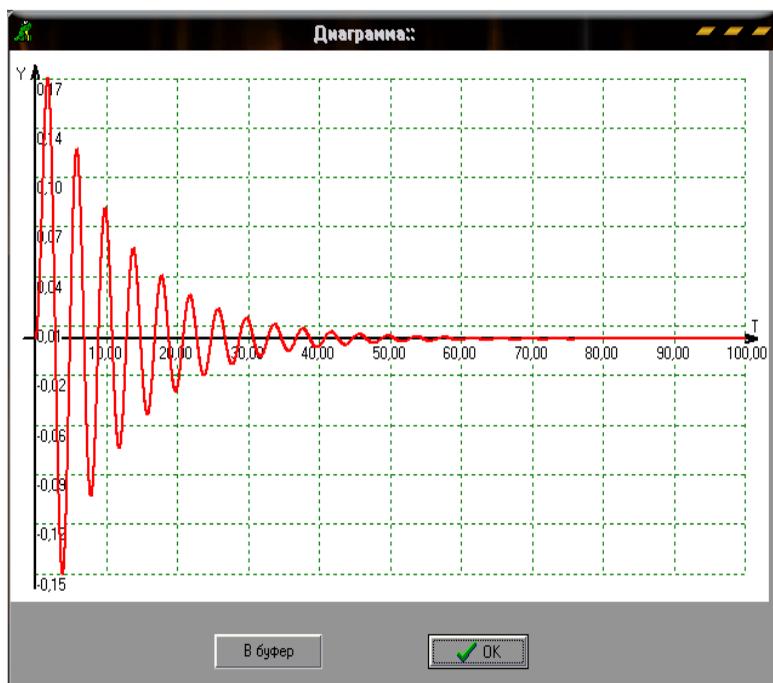


Ю. Ф. МАРТЕМЬЯНОВ, Д. Ю. МУРОМЦЕВ, П. А. ЩЕРБИННИН

# ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ



Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**Ю. Ф. МАРТЕМЬЯНОВ, Д. Ю. МУРОМЦЕВ, П. А. ЩЕРБИНИН**

# **ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Утверждено Учёным советом университета  
в качестве учебного пособия для студентов 3, 4 курсов,  
обучающихся по направлениям подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и  
11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»,  
всех форм обучения



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2020

УДК 621.39(076.5)

ББК 3965я73

М29

Рецензенты :

Доктор физико-математических наук,  
профессор ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина»

*В. А. Федоров*

Доктор технических наук, профессор кафедры КРЭМС  
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

*В. Н. Шамкин*

**Мартемьянов, Ю. Ф.**

М29 Основы управления техническими системами: лабораторный практикум / Ю. Ф. Мартемьянов, Д. Ю. Муромцев, П. А. Щербинин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – 80 с. – 300 экз.

ISBN 978-5-8265-2189-2

Представлены лабораторные работы по курсу «Управление техническими системами», которые включают цикл лабораторных работ по линейной теории автоматического управления.

Предназначен для студентов 3, 4 курсов, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», всех форм обучения.

УДК 621.39(076.5)

ББК 3965я73

ISBN 978-5-8265-2189-2 © Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2020

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

«Основы управления техническими системами» является немаловажной общеобразовательной дисциплиной направления подготовки дипломированного бакалавра. При изучении теории автоматического управления применяется системный подход, требующий рассмотрения системы в ее целостности. Для более полного усвоения курса и приобретения навыков по вопросам анализа и синтеза систем автоматического управления студенты должны выполнить цикл лабораторных работ.

Учебное пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по курсу «Основы управления техническими системами». Осуществляет практическое знакомство студентов с основными динамическими характеристиками, используемыми в системах автоматического управления, экспериментальное определение временных и частотных характеристик, анализ системы на запас устойчивости, а также синтез одноконтурной системы автоматического регулирования с различными законами регулирования.

При выполнении работы должна быть использована электронная оболочка, эмулирующая реальный объект, параметры которого задаются преподавателем, и вид испытательного сигнала.

## ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ

*Цель работы:*

1. Знакомство с типовыми элементарными звеньями.
2. Изучение влияния параметров передаточной функции на форму переходного процесса (кривой разгона) для типовых элементарных звеньев.

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Типовым звеном называется звено направленного действия, в котором происходит передача сигнала только в одном направлении с входа звена на его выход. 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 дифференцирующие, форсирующее, чистого запаздывания, инерционно-форсирующее, аperiodическое 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. К ним относят усилительное, аperiodическое, колебательные звенья, у которых 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 сомножитель  $\frac{1}{s}$ , 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.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Производится запуск лабораторной работы. На экране монитора отображается окно программы.

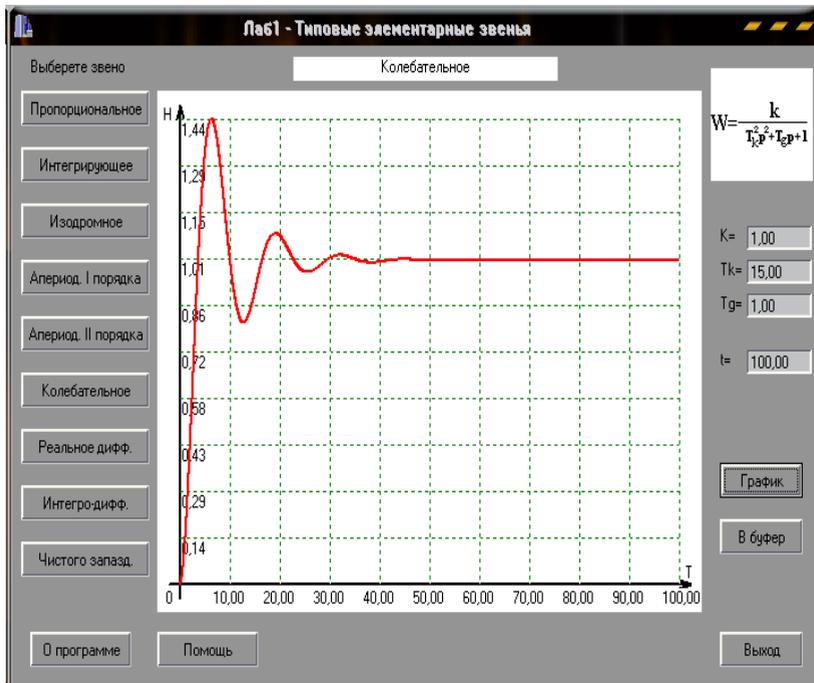
2. Изучить окно программы. В окне программы слева расположены кнопки с названиями различных элементарных звеньев. В центре окна область, в которой отображается график переходной функции. Слева отображается вид передаточной функции звена. Ниже – области для ввода различных коэффициентов. Еще ниже кнопки «График», «В буфер» и «Выход». В нижней части экрана расположены кнопки «О программе» и «Помощь».

3. Приступить к выполнению лабораторной работы, для чего необходимо нажать на кнопку «Помощь».

4. Выбрать исследуемое звено. Для выбора необходимого звена щелкнуть по кнопке с названием этого звена.

5. Установить параметры передаточной функции звена, для этого необходимо щелкнуть по месту ввода параметра и набрать его значение на клавиатуре. Далее следует нажать клавишу «Enter», или «Tab» или щелкнуть мышью по какому-либо другому элементу. При вводе числа можно ввести число не более 10 000, и оно не может иметь более двух 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. 1.1).



**Рис. 1.1. График переходной функции колебательного звена**

7. Выбрать значение времени интегрирования, соответствующее периоду изменения  $y(t)$  ( $y'(t) \neq 0$ ), повторяя пункты 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  $W(s)$  и повторить пункты 5 – 8.

10. Сделать вывод о характере влияния данного параметра на форму  $h(t)$ .

11. Проработать пункты 5 – 10 для всех звеньев, имеющихся в программе.

12. Для завершения работы с программой нажать кнопку «Выход».

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

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о работе должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы.
3. Определение типовых звеньев.
4. Описание выбранного звена: передаточная функция, заданные параметры.
5. График переходной функции исследуемого типового звена, построенного по данным лабораторного исследования.
6. Выводы о влиянии одного 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 отчете должны быть представлены все исследуемые звенья.
10. Выводы о работе в целом.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие звенья относятся 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?

## СНЯТИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Цель работы:*

1. Экспериментальное построение амплитудно-фазовой характеристики (АФХ).
2. Овладение методикой экспериментального снятия частотных характеристик.
3. Знакомство с методикой получения частотных характеристик по передаточной функции.

### 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 характеристик (рис. 2.1).*

Амплитудно-фазовая характеристика является комплексной функцией, поэтому, как и любую комплексную функцию, ее 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);  $\varphi(\omega)$  – фазо-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. 2.2).

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

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

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

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

На практике частотные характеристики получают по передаточным функциям. 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.

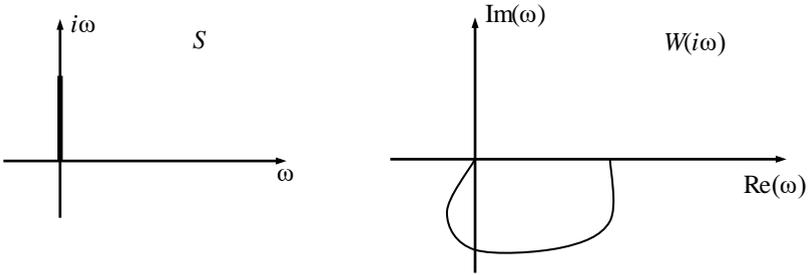


Рис. 2.1. Определение АФХ через конформное преобразование

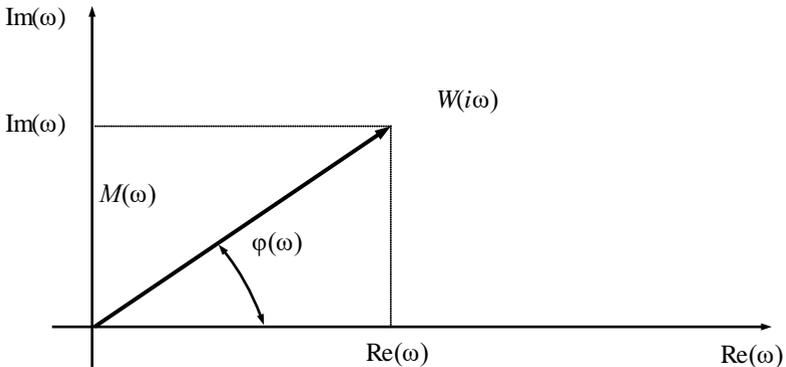
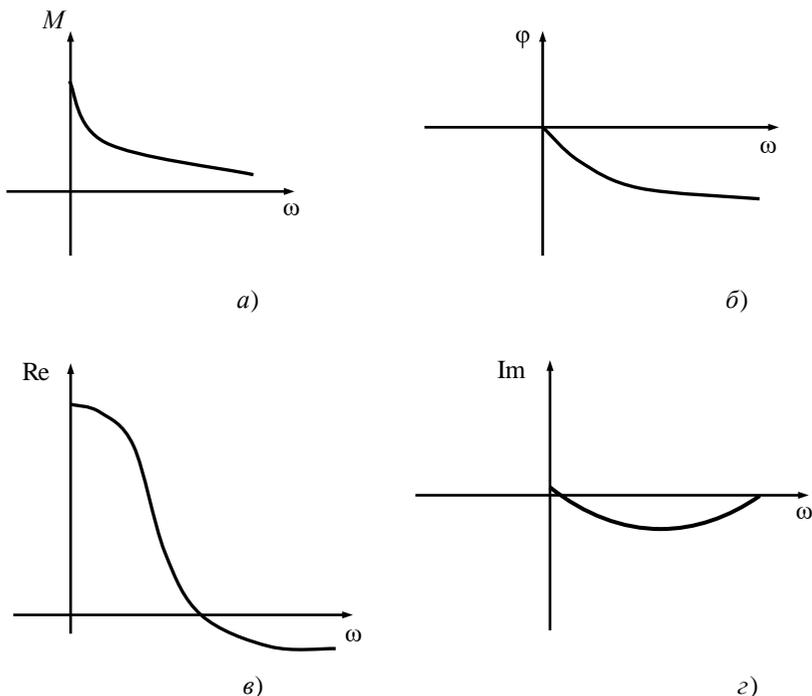


Рис. 2.2. Связь частотных характеристик

Амплитудно-частотная и вещественно-частотная характеристики являются четными функциями, а фазо-частотная и мнимая частотная характеристики являются нечетными функциями. В случае необходимости частотные характеристики для отрицательных частот получают зеркальным отображением либо относительно действительной оси для четных характеристик, либо относительно начала координат – для нечетных характеристик. Графики частотных характеристик представлены на рис. 2.3.

Физический смысл частотных характеристик устанавливается 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 устанавливается также гармонический сигнал  $y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$  той же самой частоты, но другой амплитуды и сдвинутый по фазе.



**Рис. 2.3. 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 путем проводится ряд экспериментов, при которых на вход объекта подается гармонический сигнал заданной частоты. У полученного на выходе гармонического сигнала измеряется амплитуда и сдвиг фаз. В результате проведенных экспериментов с различными частотами определяются частотные характеристики следующим образом.

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

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

Фазочастотная 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  $\tau$  – время запаздывания объекта.

Необходимо установить значения векторов  $a$  и  $b$ , после чего задать время интегрирования. Затем для каждого значения частоты  $\omega$  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.

## 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 и раздел, содержащий кнопку «Пуск» (рис. 2.4).

Параметры воздействия:

$A$  – амплитуда;

$\omega$  – циклическая частота;

$\varphi$  – начальный сдвиг фаз в градусах;

$kr^*\omega$  – количество выводимых на экран периодов гармонического сигнала. Рекомендуемое значение  $kr = 2/\omega$ .

Изучить используемые клавиши:

Escape – закрыть окно (выход из программы);

F1 – открыть окно с подсказками;

F2 – открыть окно с версией программы и ее авторами;

F3 – начать процесс расчета программы;

F4 – открыть окно с увеличенной диаграммой АФХ.

3. Ввести параметры объекта, заданные преподавателем.

4. Определить коэффициент передачи объекта, задав при этом параметры:  $A = 1$ ,  $\omega = 0$ ,  $\varphi = 90$ .

5. Задать  $\omega = 0,1$ ;  $\varphi$  – любое (рекомендуется задать  $A = 1$ ,  $\varphi = 0$ ).

6. Нажать на «Пуск» и после окончания действия собственной составляющей (параметры амплитуды выходного сигнала прекратили изменяться) нажать кнопку «Стоп».

7. Нажать кнопку «Увеличить».

8. В открывшемся окне (рис. 2.5) находится график входного и выходного сигналов, а также значения отношения амплитуд –  $M(\omega)$  и разность фаз –  $\Delta\varphi(\omega)$ , вычисленных по формулам:

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

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

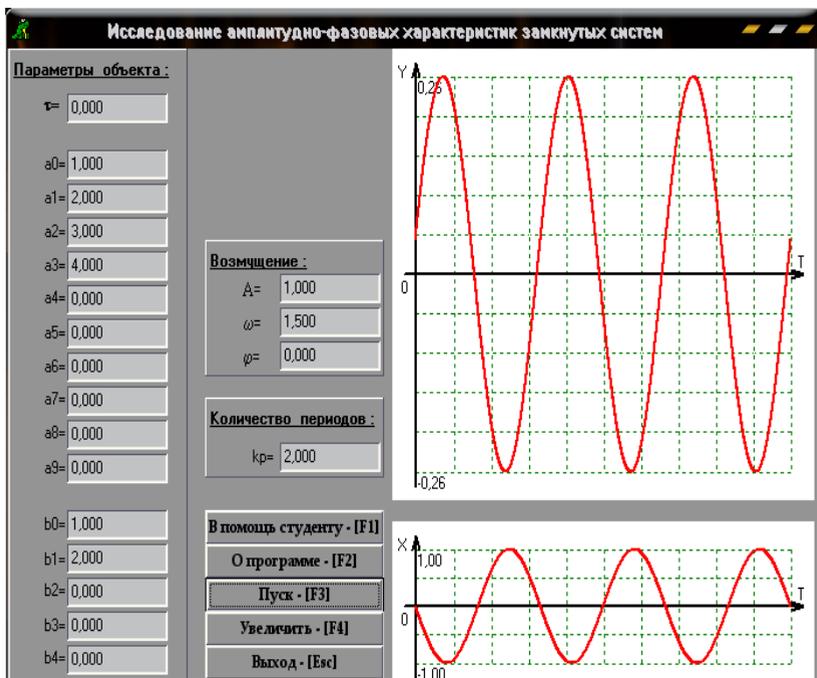


Рис. 2.4. Диалоговое окно задания параметров

9. 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».

**ВНИМАНИЕ!** Для точного измерения фазового сдвига на каждой частоте следует на графике (рис. 2.5 линейкой измерить величину периода колебаний в мм ( $T$ ), а затем величину расстояния от восходящего нуля входного сигнала (зеленый график) до восходящего нуля выходного сигнала (красный график) в мм ( $T_3$ ).

Запаздывание (опережение) по фазе в градусах вычисляется по формуле  $\Delta\varphi(\omega) = 360 \cdot T_3 / T$ .

*Примечание.* Снять значения  $T$  и  $T_3$  можно непосредственно с монитора. (На значения автоматически определенной разности фаз не следует обращать внимание)

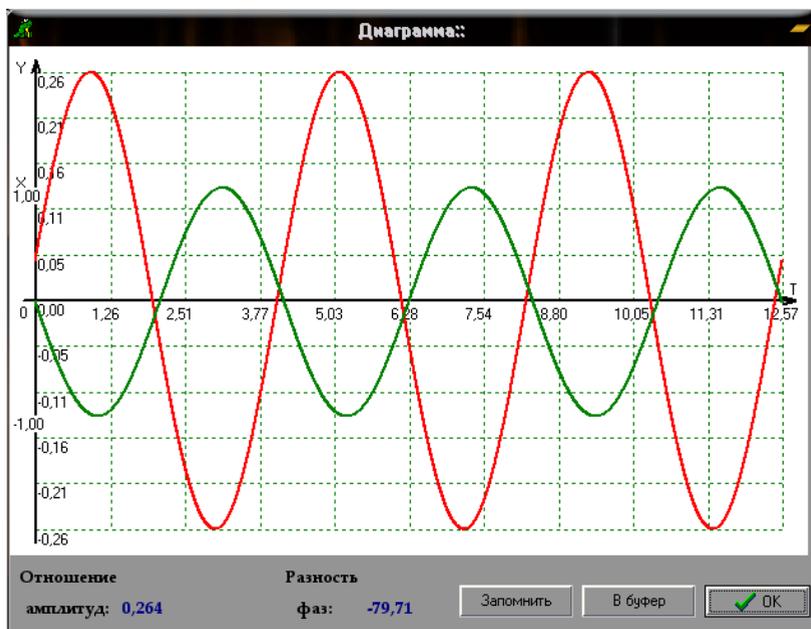


Рис. 2.5. Установившиеся колебания

10. Постепенно увеличивая значения  $\omega$  так, чтобы интервал в  $\Delta\varphi(\omega)$  составлял приблизительно  $15^\circ$ , снять результаты 10 – 15 экспериментов с  $\Delta\varphi(\omega)$  от 0 до  $200^\circ$  (значения интервала частоты будут неравномерными).

11. Занести результаты компьютерного эксперимента в табл. 2.1.

По полученным данным, взятым из файла «Laba2.txt» и табл. 2.1, построить графики АЧХ, ФЧХ, АФХ.

Таблица 2.1

№	$\omega$	$M(\omega)$	$T$	$T_3$	$\Delta\varphi(\omega)$
1					
2					
...					
10 – 15					

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Цель проведения лабораторной работы.
2. Задание на выполнение лабораторной работы.
3. Определение частотных характеристик: АЧХ, ФЧХ, АФХ.
4. Объект управления – аналитическое выражение передаточной функции с численными значениями коэффициентов.
5. Таблицу экспериментальных данных с расчетами  $\Delta\varphi(\omega)$ .
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 расчетными данными.
10. Выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется конформным отображением?
2. Какая характеристика называется амплитудно-фазовой характеристикой?
3. Как экспериментально определить амплитудно-частотную и фазо-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?

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И АСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Цель работы:*

1. Знакомство с основными законами регулирования – пропорциональным (П), интегральным (И), пропорционально-интегральным (ПИ), пропорционально-дифференциальным (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД).
2. Знакомство с простейшими системами автоматического управления: статическими и астатическими.
3. Исследование статических и астатических систем регулирования с точки зрения качества регулирования.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В лабораторной работе исследуется одноконтурная замкнутая система автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 15.

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

*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.

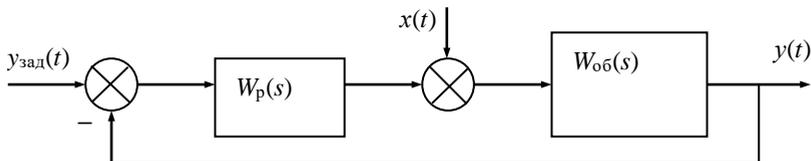


Рис. 3.1. Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления

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 уменьшающаяся 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. усиливать 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) –  $W(s) = -S_0 / s - S_1 - S_2 s$ ;  $S_0, S_1, S_2$  – настройки регуляторов, которые подлежат расчету 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  $y_{\text{зад}}(t)$ . В большинстве случаев эта задача системы заключается в поддержании равенства  $y(t) = y_{\text{зад}}(t)$  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

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

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  $\varepsilon_{\text{зад}}(t)$ , 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  $W_{\text{об}}(s)$  и регулятора  $W_{\text{р}}(s)$ , полная ошибка регулирования  $\varepsilon(t)$  и ее составляющие и в статике, и в динамике обратно пропорциональны выражению  $-(1 + W_{\text{об}}(s)W_{\text{р}}(s))$ , т.е. точность регулирования тем лучше, 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.

$$W_{\text{об}}(0) = k_{\text{об}}, W_{\text{р}}(0) = k_{\text{р}}.$$

Учитывая полученное выражение, можно записать уравнение статики статической системы:

– для управляемой переменной

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

– для сигнала ошибки

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

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  $(1 + k_p k_{\text{об}})$ . Следовательно, *точность статической системы тем лучше, чем больше передаточный коэффициент разомкнутого контура.*

Точность статической системы принято оценивать *коэффициентом статизма*

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

где  $\Delta y_{\text{зад}}$  – отклонение управляемой величины, создаваемое возмущением  $x_{\text{в0}}$  в замкнутой системе,  $\Delta y_{\text{рег}}$  – отклонение управляемой величины от заданного значения, создаваемого возмущением  $x_{\text{в0}}$ . 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

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

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, уста-

новившийся 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 с помощью теоремы о конечном значении оригинала. Возрастающую вынужденную составляющую находят с помощью 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  $y_{зад}(t)$  или  $x_{воз}(t)$  по закону ступенчатой функции  $y_{зад}(t) = a_0 \cdot I(t)$  и по закону степенной функции  $y_{зад}(t) = a_q t^q \cdot I(t)$ , ( $q = 1; 2; \dots$ ).

- Рассматриваются передаточные функции:

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

$$\text{регулятора} \quad W_p(s) = k_p W_p^*(s) / s^{\nu_p} ,$$

где множители  $W_{об}^*(s)$  и  $W_p^*(s)$  при  $s \rightarrow 0$  стремятся к единице.

Показатели  $\nu_p$  и  $\nu_{об}$  характеризуют порядок астатизма регулятора и объекта.

- Записывается передаточная функция разомкнутого контура

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

где  $k = k_{об} k_p$  – передаточный коэффициент разомкнутого контура,

$\nu = \nu_{об} \nu_p$  – порядок астатизма контура, множитель

$W^*(s) = W_{об}^*(s) W_p^*(s)$  стремится к единице при  $s \rightarrow 0$ .

Типовая система автоматического управления называется астатической  $\nu$ -го порядка, если ее регулятор обладает астатизмом  $\nu$ -го порядка, т.е. содержит  $\nu$  интегрирующих звеньев.

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

- Рассчитывается сигнал ошибки типовой системы

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

Из выражения следует, что составляющая ошибки  $\varepsilon_{\text{зад}}$ , обусловленная изменением задающего воздействия  $y_{\text{зад}}(t)$ , зависит от общего порядка астатизма  $\nu$ , 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 распространенных случаев ( $q = 0; 1; 2$  и  $\nu = 0; 1; 2$ ) установившиеся значения составляющих приведены в табл. 3.1.

На основании полученных результатов, которые приведены в табл. 3.1, формулируются общие правила анализа статических и астатических систем автоматического управления:

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

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

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

Таблица 3.1

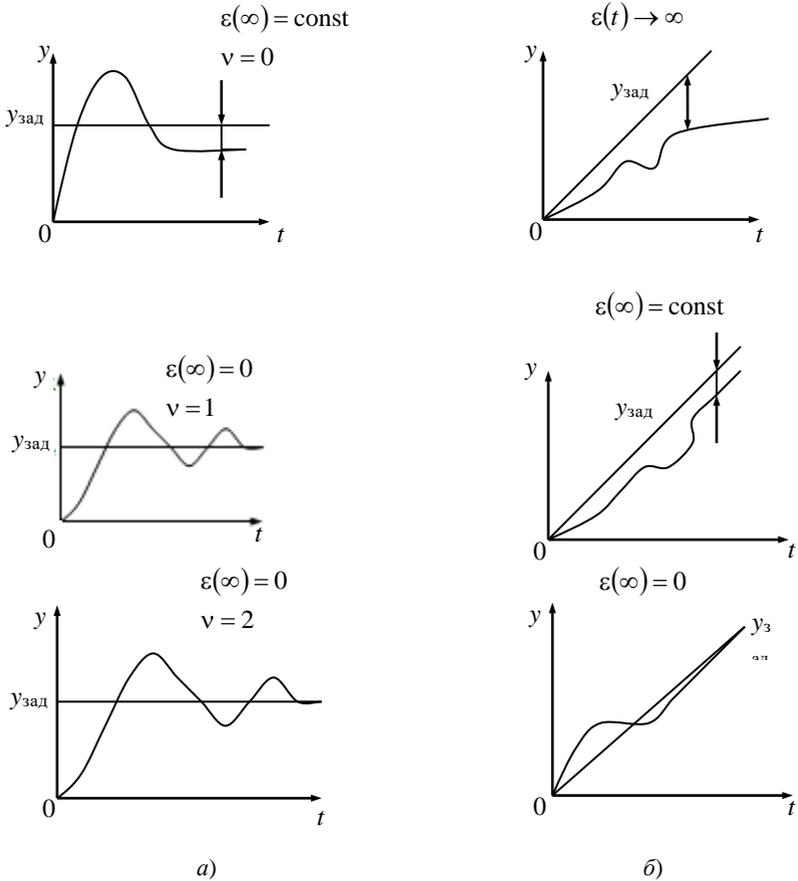
Составляющая сигнала ошибки	Порядок астатизма	Вид воздействия		
		$a_0 \cdot I(t)$	$a_1 t \cdot I(t)$	$a_2 t^2 \cdot I(t)$
$\varepsilon_{\text{зад}}$	$\nu = 0$	$a_0 / (1 + k)$	$\infty$	$\infty$
	$\nu = 1$	0	$a_1 / k$	$\infty$
	$\nu = 2$	0	0	$2a_2 / k$
$\varepsilon_{\text{воз}}$	$\nu_p = 0,$ $\nu_{\text{об}} = 0$	$a_0 k_0 / (1 + k)$	$\infty$	$\infty$
	$\nu_p = 0,$ $\nu_{\text{об}} = 1$	$a_0 / k_p$	$\infty$	$\infty$
	$\nu_p = 1,$ $\nu_{\text{об}} = 0$	0	$a_1 / k_p$	$\infty$
	$\nu_p = 1,$ $\nu_{\text{об}} = 1$	0	$a_1 / k_p$	$\infty$
	$\nu_p = 2,$ $\nu_{\text{об}} = 0$	0	0	$2a_2 / k_p$

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

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

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

5. На рисунке 3.2 представлены переходные процессы в статической и астатической системах.



**Рис. 3.2. Переходные процессы в статической и астатической системах при ступенчатом ( $q = 0$ ) (а) и линейном ( $q = 1$ ) (б) изменении задающего воздействия**

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лабораторной работе моделируется замкнутая система автоматического регулирования. На вход системы подается 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. 3.3).
3. Ввести параметры объекта – коэффициенты  $a_i$ ,  $b_j$  в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.
4. Задать время регулирования.
5. Исследовать П-закон регулирования. Для этого задать настройку регулятора  $S_1$ . Запустить расчет переходного процесса, нажав кнопку «Расчет». На панели появятся графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения. Повторить всю процедуру, взяв настройки П-регулятора больше и меньше первоначальной.

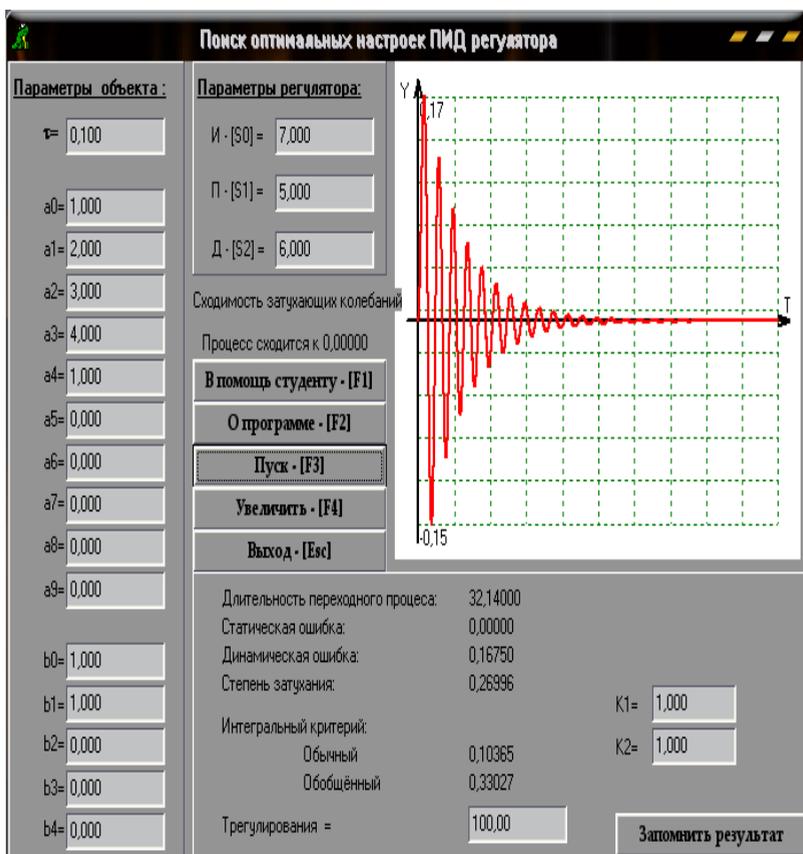


Рис. 3.3. Диалоговое окно задания параметров

Записать статическую ошибку регулирования, которая появится в окне при нажатии клавиши «Увеличить». Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведенным 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.

6. Исследовать И-закон регулирования. Задать настройку И-регулятора  $S_0$ . Построить переходные процессы, оценить статическую ошибку регулирования. Повторить всю процедуру еще с двумя настройками, которые задать больше и меньше первоначально заданной. Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведенным 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.

7. 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 расчеты еще с двумя парами настроек. Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведенным формулам в соответствии с заданными параметрами объекта и настройками регулятора. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки. Сделать соответствующие выводы.

8. Исследовать ПД-закон регулирования. Задать настройки ПД-регулятора –  $S_2, S_1$ . Построить переходные процессы и оценить статическую ошибку регулирования. Повторить все расчеты еще с двумя парами настроек. Рассчитать статическую ошибку регулирования по приведенным 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.

9. Исследовать ПИД-закон регулирования. Задать настройки ПИД-регулятора –  $S_0, S_1, S_2$ . Построить переходные процессы и оценить статическую ошибку регулирования экспериментально и анали-

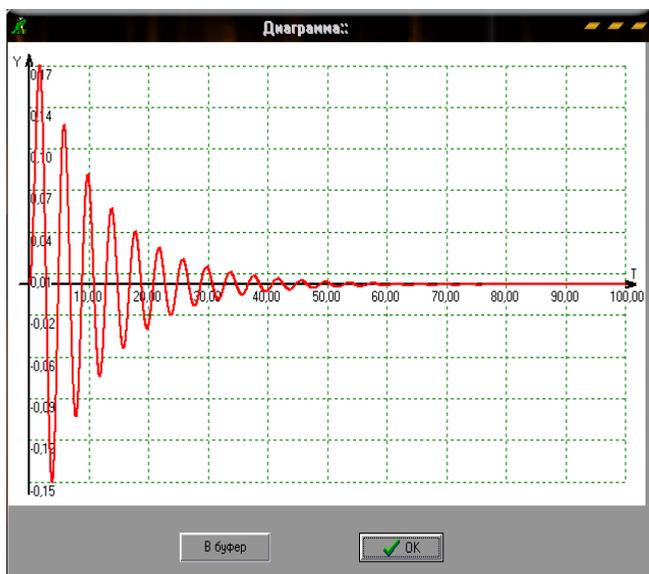
тически. Повторить все расчеты еще с двумя тройками настроек. Статическая ошибка в системах с ПИД-регулятором должна быть равна нулю. Рассчитать погрешность экспериментального и аналитического определения статической ошибки. Сделать соответствующие выводы.

10. 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. 3.3.

После выполненного расчета в окне появляются графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения (рис. 3.3). При нажатии кнопки «Увеличить» появляется диаграмма увеличенного переходного процесса последовательно по одному из двух каналов (рис. 3.4).

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



**Рис. 3.4. Переходный процесс по каналу возмущения в астатической системе**

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

*Отчет должен содержать:*

1. Цель 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. Расчет статической ошибки для каждого типа регулятора.
6. Расчет относительной погрешности определения статической ошибки регулирования проводят по формуле

$$\delta = (\Delta y_{\text{ст}}^{\text{э}} + \Delta y_{\text{ст}}^{\text{рас}}) / \Delta y_{\text{ст}}^{\text{э}}.$$

7. Полученные результаты исследования статических и астатических систем регулирования свести в табл. 3.2.
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.

Выводы по работе.

**Таблица 3.2**

Тип регулятора	$\Delta y_{\text{ст}}^{\text{э}}$	$\Delta y_{\text{ст}}^{\text{рас}}$	$\delta$
П			
И			
ПИ			
ПД			
ПИД			

## 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.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

*Цель работы:*

1. Знакомство с основными показателями качества в системах автоматического управления.
2. Исследование качества в системах автоматического регулирования с различными типами регуляторов:  
пропорциональным (П), интегральным (И),  
пропорционально-интегральным (ПИ),  
пропорционально-дифференциальным (ПД).
3. Расчет корневых показателей качества систем автоматического управления.
4. Оценка качества регулирования одноконтурной системы автоматического управления с точки зрения применения различных типовых законов, законов регулирования.
5. Оценка качества регулирования по вещественно-частотной характеристике.

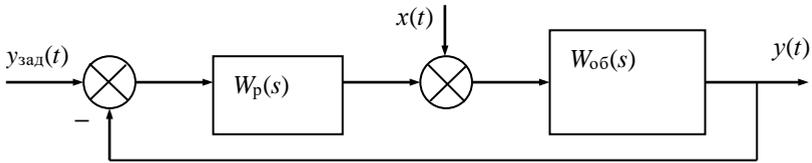
**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

В лабораторной работе исследуется одноконтурная замкнутая система автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 4.1.

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) –  $W(s) = -S_1 - S_2 s$ ;  $S_0, S_1, S_2$  – настройки регуляторов.

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



**Рис. 4.1. Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления**

Все показатели качества подразделяются на несколько групп:

*Прямые показатели качества.*

1. Статическая ошибка регулирования  $Y_{ст}$  – разность между установившимся значением регулируемой величины и ее заданным значением:  $Y_{ст} = Y_{уст} - Y_{зад}$  (рис. 4.2, а).

2. Динамическая ошибка регулирования  $Y_{дин}$  – наибольшее отклонение в переходном процессе регулируемой переменной от ее установившегося значения (рис. 4.2, б).

3. Время регулирования  $T_p$  – время, за которое разность между текущим значением регулируемой переменной и ее заданным значением становится меньше некоторого числа epsilon:  $|Y_{зад}(t) - Y(t)| < \epsilon$  (рис. 4.2, а).

4. Перерегулирование, измеряемое в процентах и равное отношению первого максимального отклонения регулируемой переменной от ее установившегося значения к этому установившемуся значению (рис. 4.2, в):

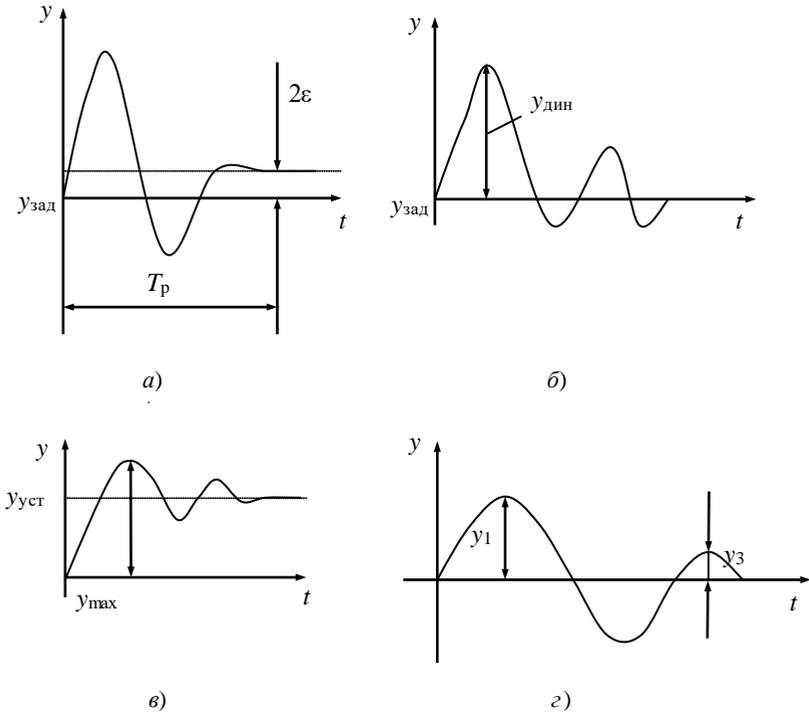
$$\sigma = \frac{Y_{\max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} \cdot 100\%.$$

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. 4.2, з):

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

Прямые показатели качества используются, как правило, при оценке качества переходного процесса уже рассчитанной системы ав-

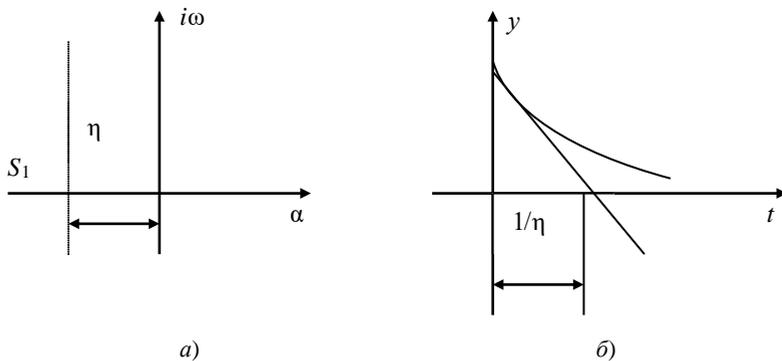
томатического управления. При проведении параметрического синтеза АСР в большинстве случаев используются другие показатели качества, которые рассматриваются ниже.



**Рис. 4.2. Прямые показатели качества**

*Корневые показатели качества*

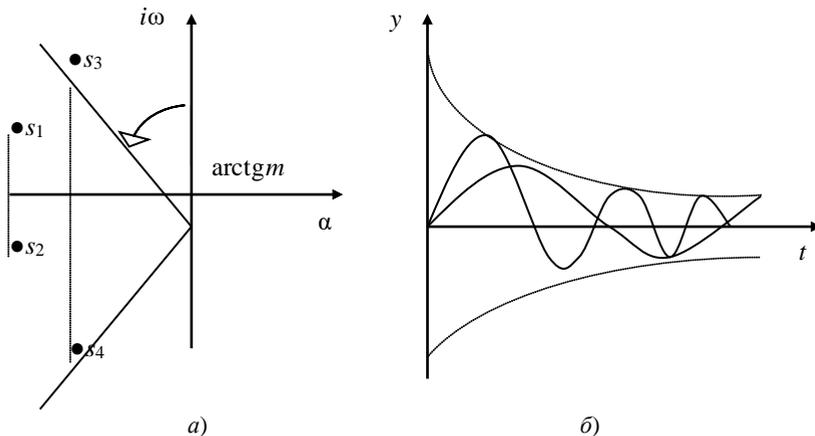
1. *Степень устойчивости* – расстояние до мнимой оси ближайшего корня характеристического уравнения (рис. 4.3, а), характеризующая интенсивность затухания наиболее медленно затухающей не колебательной составляющей переходного процесса, которая определяется как  $y(t) = Ce^{-\eta t}$ . Степень устойчивости используется для оценки времени регулирования монотонных переходных процессов. Касательная к  $y(t)$  в точке  $t = 0$  отсекает на оси абсцисс отрезок  $1/\eta$  (рис. 4.3, б). Время регулирования в этом случае определяется как  $T_p = 3/\eta$ .



**Рис. 4.3. К определению степени устойчивости:**  
 а – расположение корней характеристического уравнения;  
 б – составляющая переходного процесса

2. *Степень колебательности* – модуль минимального отношения действительной части к мнимой части корня характеристического уравнения по всем корням характеристического уравнения (рис. 4.4):

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



**Рис. 4.4. К определению степени колебательности:**  
 а – расположение корней характеристического уравнения;  
 б – переходные процессы

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 влечет к изменению экспоненциальной части. Степень колебательности однозначно связана со степенью затухания  $\psi = 1 - e^{-2\pi m}$ .

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

1. *Линейный интегральный критерий качества*

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

2. *Квадратичный интегральный критерий качества*

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

3. *Модульный интегральный критерий качества*

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

4. *Обобщенный интегральный критерий качества*

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

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 пере-

ходной 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 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*:  $\lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}(\omega) = \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Re } y(t)$ .

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

- 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 трапецеидальной, т.е. может быть аппроксимирована прямоугольной трапецией с диапазоном частот  $0 \dots \omega_2$  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 подается единичное ступенчатое воздействие. Работа выполняется в следующем порядке:

1. Осуществить запуск программы (лабораторной работы). На экране монитора отображается окно программы (рис. 4.5).

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. 4.5).

3. Изучить используемые клавиши:

Escape – закрыть окно (выход из программы);

F1 – открыть окно с подсказками;

F2 – открыть окно с версией программы и ее авторами;

F3 – начать процесс расчета программы;

F4 – открыть окно с увеличенной диаграммой АФХ.

4. Ввести параметры объекта – 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 расчет переходного процесса, нажав 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 управления при использовании И-закона регулирования. Задать настройку И-регулятора  $S_0$ . Построить переходные процессы, оценить качество регулирования. Повторить всю процедуру еще с двумя настройками, 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 управления при использовании ПИ-закона регулирования. Задать настройки ПИ-регулятора –  $S_0, S_1$ . Построить переходной процесс и по нему оценить качество регулирования. Повторить все расчеты еще с двумя парами 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 управления при использовании ПД-закона регулирования. Задать настройки ПД-регулятора –  $S_2, S_1$ . Построить переходные процессы и оценить качество регулирования. Повторить все расчеты еще с двумя парами 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 расчета в окне появляется график переходных процессов по одному из каналов управления или возмущения (рис. 4.5). При нажатии кнопки «Увеличить» появляется диаграмма увеличенного переходного процесса последовательно по одному из двух каналов (рис. 4.6).

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 ОТЧЕТА

*Отчет 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 расчете обобщенного 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, проведенную по кривым переходных процессов. Полученные результаты свести в табл. 4.1.

**Таблица 4.1**

Критерий качества	$S_0$	$S_1$	$S_2$	Значение критерия
$T_{рег}$				
$\Psi$				
$\sigma$				
$Y_{дин}$				
$Y_{ст}$				

**Поиск оптимальных настроек ПИД регулятора**

**Параметры объекта :**

$\tau =$  0,100

$a_0 =$  1,000

$a_1 =$  2,000

$a_2 =$  3,000

$a_3 =$  4,000

$a_4 =$  1,000

$a_5 =$  0,000

$a_6 =$  0,000

$a_7 =$  0,000

$a_8 =$  0,000

$a_9 =$  0,000

**Параметры регулятора:**

И - [S0] = 7,000

П - [S1] = 5,000

Д - [S2] = 6,000

Сходимость затухающих колебаний

Процесс сходится к 0,00000

**В помощь студенту - [F1]**

**О программе - [F2]**

**Пуск - [F3]**

**Увеличить - [F4]**

**Выход - [Esc]**

**Длительность переходного процесса:** 32,14000

**Статическая ошибка:** 0,00000

**Динамическая ошибка:** 0,16750

**Степень затухания:** 0,26996

**Интегральный критерий:**

Обычный 0,10365

Обобщённый 0,33027

**T регулирования =** 100,00

**K1 =** 1,000

**K2 =** 1,000

**Запомнить результат**

**Рис. 4.5. Диалоговое окно задания параметров**

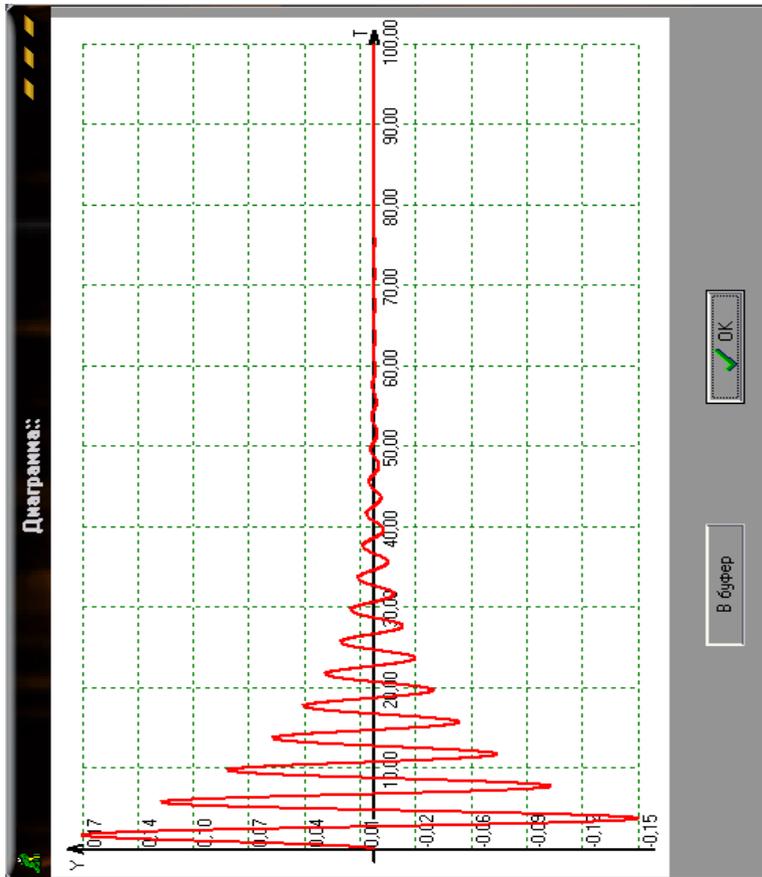


Рис. 4.6. Диаграмма

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

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

7. Расчет 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 расчетным путем 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 апериодического 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?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ПО МОДУЛЮ И ФАЗЕ

*Цель работы:* 1. Знакомство с количественными оценками запаса устойчивости.

2. Приобретение навыков определения запаса устойчивости частотными методами.

3. Приобретение навыков моделирования системы автоматического управления с заданным запасом устойчивости.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При синтезе систем автоматического управления недостаточно, чтобы система была устойчивой, так как даже небольшие внешние возмущения могут вывести ее из устойчивого состояния и перевести в область неустойчивой работы. В связи с этим необходимо обеспечить некоторый запас устойчивости и оценить его количественно. Наиболее распространенными 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. 5.1) –  $\eta = \min | \operatorname{Re} s_i |$ .

Введение в рассмотрение степени устойчивости равносильно переносу границы устойчивости влево на величину  $\eta$ , 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. 5.2):

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

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

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

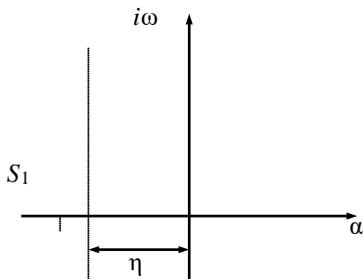


Рис. 5.1. К определению степени устойчивости

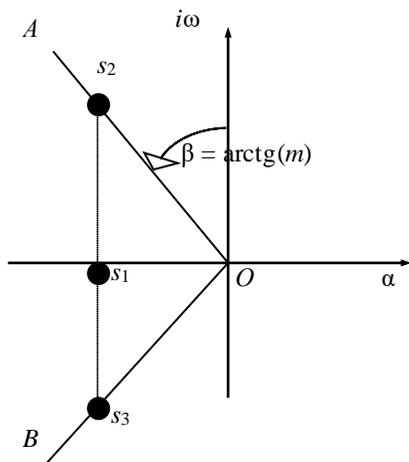


Рис. 5.2. К определению степени колебательности

### *Частотные методы оценки запаса устойчивости*

Одним из наиболее распространенных 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. 5.3), 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  $\alpha$  (рис. 5.3) между вещественной отрицательной полуосью и лучом, проведенным 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 еще одна оценка, являющаяся обобщенной оценкой уже рассмотренных, – показатель колебательности.

Одним из основных частотных методов оценки запаса устойчивости является *показатель колебательности*, который как бы объединяет запас устойчивости по модулю и запас устойчивости по фазе. Оказывается, что степень близости замкнутой системы к границе устойчивости можно определить по величине максимума амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы. Этот максимум и называется *показателем колебательности*  $M$ , если  $M(0) = 1$  (рис. 5.4).

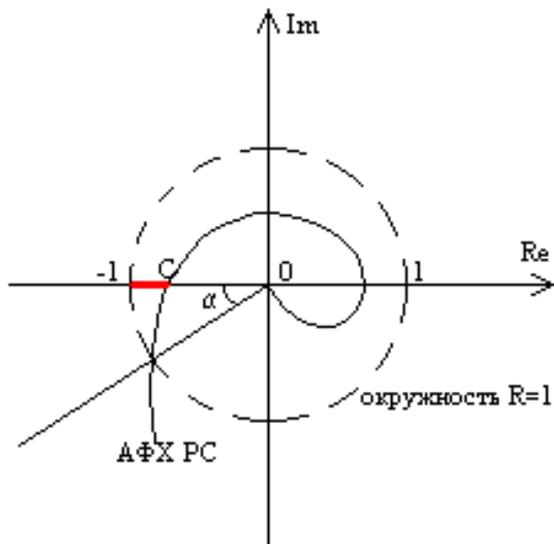


Рис. 5.3. К определению частотных оценок запаса устойчивости

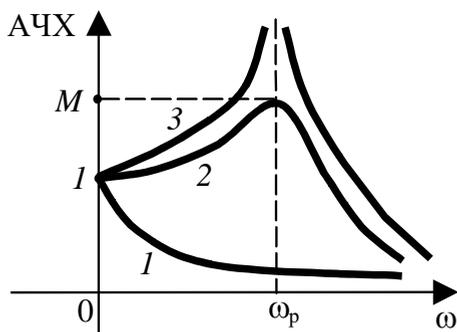


Рис. 5.4. АЧХ замкнутой системы:

1 – неколебательной; 2 – колебательной; 3 – на границе устойчивости

Как известно, АФХ замкнутой системы определяется через АФХ разомкнутой системы следующим образом:

$$W_{z.c}(i\omega) = \frac{W_{p.c}(i\omega)}{1 + W_{p.c}(i\omega)},$$

откуда АЧХ замкнутой системы, соответственно, равна

$$M_{з.с}(\omega) = \frac{|W_{p.c}(i\omega)|}{|1 + W_{p.c}(i\omega)|}.$$

Как видно из рис. 5.5, модуль АФХ разомкнутой системы равен длине отрезка  $OB$ , т.е.

$$|W_{p.c}(i\omega)| = OB.$$

Вектор  $1 + W_{p.c}(i\omega)$  определяется как разность векторов  $OA$  и  $OB$ , т.е.

$$1 + \vec{W}_{p.c}(i\omega) = \vec{W}_{p.c}(i\omega) - (-\vec{1}) = \vec{AB}.$$

Следовательно,

$$M_{з.с}(\omega) = \frac{OB}{AB}.$$

Если изменять частоту от 0 до  $\infty$ , то отношение  $\frac{OB}{AB}$  вначале возрастает, а затем начинает уменьшаться, следовательно, и АЧХ замкнутой системы вначале будет возрастать, а затем уменьшаться, т.е. будет иметь максимум. Оказывается, что, чем больший 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.

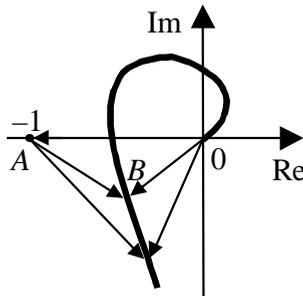


Рис. 5.5. Определение показателя колебательности

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В лабораторной работе моделируется линейная разомкнутая система автоматического регулирования. На вход системы подается 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.

Производя соответствующие измерения определяется запас устойчивости замкнутой системы.

Лабораторная работа проводится в следующем порядке:

1. Осуществить запуск программы (лабораторной работы).

На экране монитора отображается окно программы (рис. 5.6).

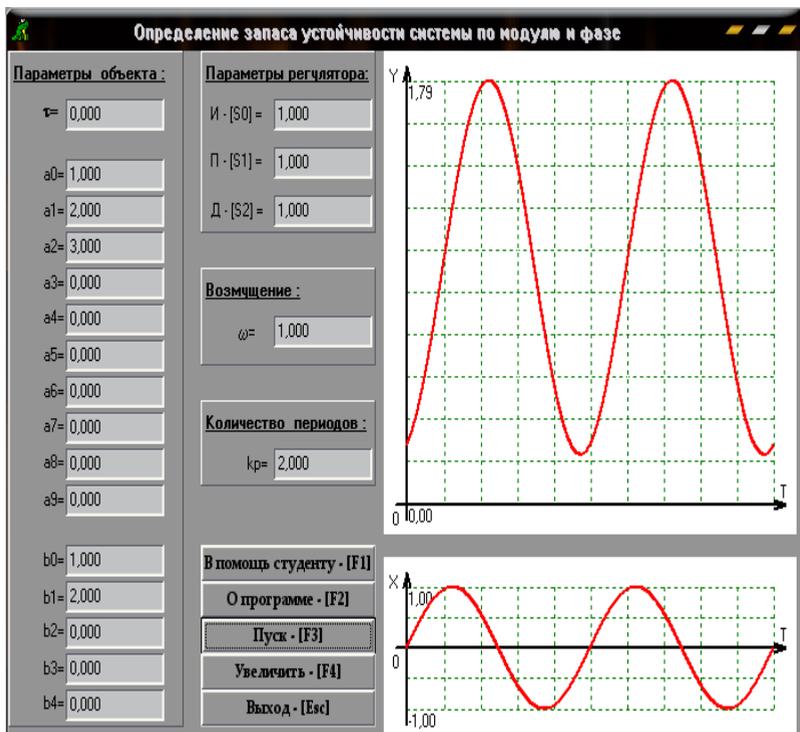


Рис. 5.6. Диалоговое окно задания параметров для определения запаса устойчивости

2. Изучить окно программы. Окно содержит разделы: параметры объекта, параметры регулятора, параметры управления программой, входной гармонический сигнал, рассчитанный переходный процесс и рассчитанная программой оценка запаса устойчивости (рис. 5.6).

3. Изучить используемые клавиши:

Escape – закрыть окно (выход из программы);

F1 – открыть окно с подсказками;

F2 – открыть окно с версией программы и ее авторами;

F3 – начать процесс расчета программы;

F4 – открыть окно с увеличенной диаграммой АФХ.

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

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 путем введения в окно панели «Возмущение».

7. Запустить расчет процесса, нажав кнопку «Пуск».

8. После окончания переходного процесса (когда амплитуда  $y(t)$  не станет изменяться), нажать кнопку «Стоп», затем кнопку «Увеличить» (рис. 5.6).

9. В открывшемся окне (рис. 5.6) находится график входного и выходного сигналов, а также значения отношения амплитуд  $M(\omega)$  и разность фаз  $\Delta\varphi(\omega)$ , вычисляемых по формулам:

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

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

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 расчеты, добиваясь сдвига фаз, равного  $180^\circ$ ; отношения амплитуд, равного 1.

12. Построить АЧХ и ФЧХ разомкнутой системы и по ним построить АФХ.

13. По построенной АФХ разомкнутой системы определить запас устойчивости по модулю и фазе.

14. Записать передаточную функцию замкнутой системы.

15. По передаточной функции замкнутой системы записать характеристическое уравнение.

16. Найти корни характеристического уравнения замкнутой системы, по которым определить степень устойчивости и степень колебательности (рис. 5.7).

17. Записать АФХ замкнутой системы.

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

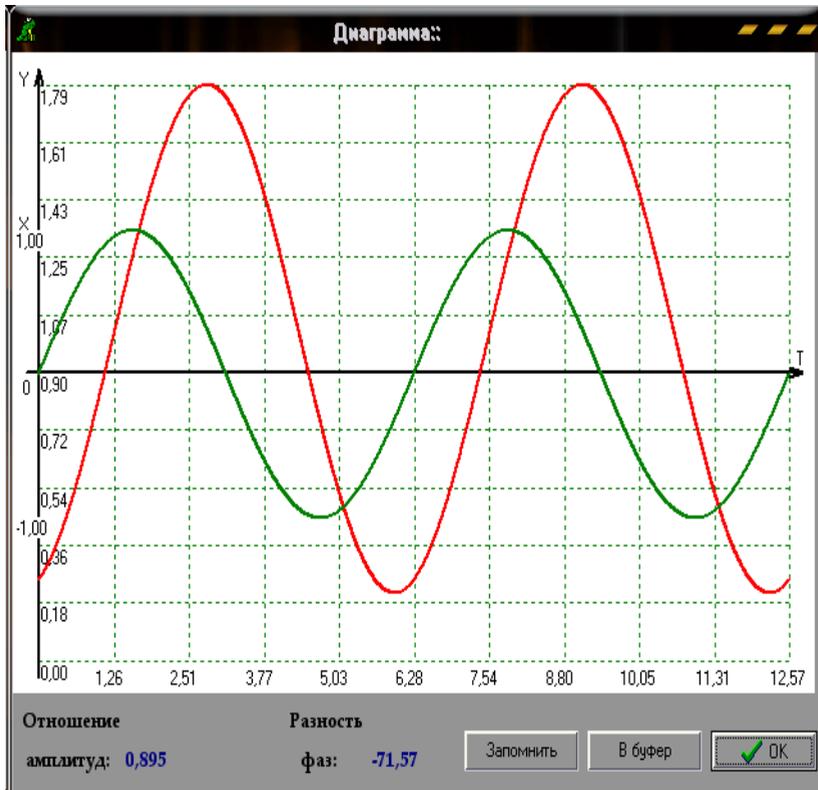


Рис. 5.7. Диаграмма для определения запаса устойчивости

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель 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 оформляются в виде табл. 5.1.
5. Построение АЧХ, ФЧХ и АФХ по экспериментальным данным.
6. Расчет запаса устойчивости по модулю и фазе.
7. Запись передаточной функции замкнутой системы автоматического управления.
8. Запись характеристического уравнения замкнутой системы.
9. Решение характеристического уравнения.
10. Расчет корневых оценок запаса устойчивости: степени устойчивости и степени колебательности.
11. Запись и построение АЧХ и АФХ замкнутой системы.
12. Расчет показателя колебательности.
13. Анализ запаса устойчивости замкнутой системы, меры по повышению этого запаса.
14. Выводы по работе.

**Таблица 5.1.**

№ опыта	$\omega$	$\Delta\varphi$	$M$
1			
2			
...			
...			
...			
...			
...			

## 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 чем заключается физический смысл запаса устойчивости по модулю и фазе?
6. Какие Вам известны методы обеспечения запаса устойчивости?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПИД-ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Цель работы:*

1. Знакомство с ПИД-законом регулирования в системах автоматического управления.
2. Приобретение навыков исследование качества регулирования в системах автоматического управления с ПИД-регулятором.
3. Расчет корневых показателей качества регулирования в системах с ПИД-регулятором.
4. Анализ качества регулирования одноконтурной системы автоматического управления при использовании ПИД-законов регулирования.
5. Расчет оценок запаса устойчивости в системе автоматического управления при использовании ПИД-регулятора.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В лабораторной работе исследуется одноконтурная замкнутая система автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 6.1.

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 исследуются системы автоматического управления с ПИД-регулятором с точки зрения оценки качества регулирования и запаса устойчивости по сравнению с другими типовыми законами регулирования.

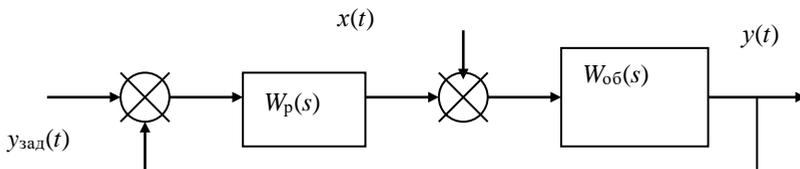


Рис. 6.1. Структурная схема одноконтурной системы автоматического управления

Все показатели качества регулирования рассматривались в лабораторной работе № 3, 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 трех простейших законов регулирования: высокое быстродействие, благодаря наличию импульса по производной, и 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, и других подобных производствах.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

1. Осуществить запуск программы (лабораторной работы). На экране монитора отображается окно программы (рис. 6.2).

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. 6.2).

3. Изучить используемые клавиши:

Escape – закрыть окно (выход из программы);

F1 – открыть окно с подсказками;

F2 – открыть окно с версией программы и ее авторами;

F3 – начать процесс расчета программы;

F4 – открыть окно с увеличенной диаграммой АФХ.

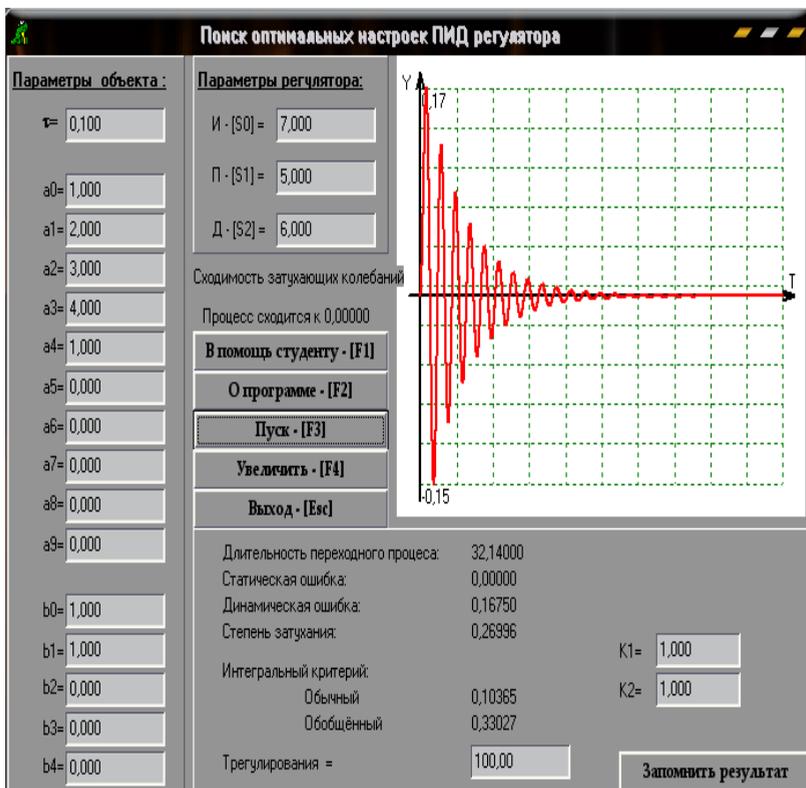


Рис. 6.2. Диалоговое окно задания параметров

4. Ввести параметры объекта – 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 расчет переходного процесса, нажав 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 при двух других тройках 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 ее больше и меньше первоначального значения. Подобную процедуру повторить для всех трех 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. Помимо рассчитываемых программой оценок качества регулирования определить корневые показатели качества регулирования, оценить влияние настроек  $S_0, S_1, S_2$  на качество регулирования. Сделать соответствующие выводы.

10. Построить ВЧХ замкнутой системы автоматического управления.

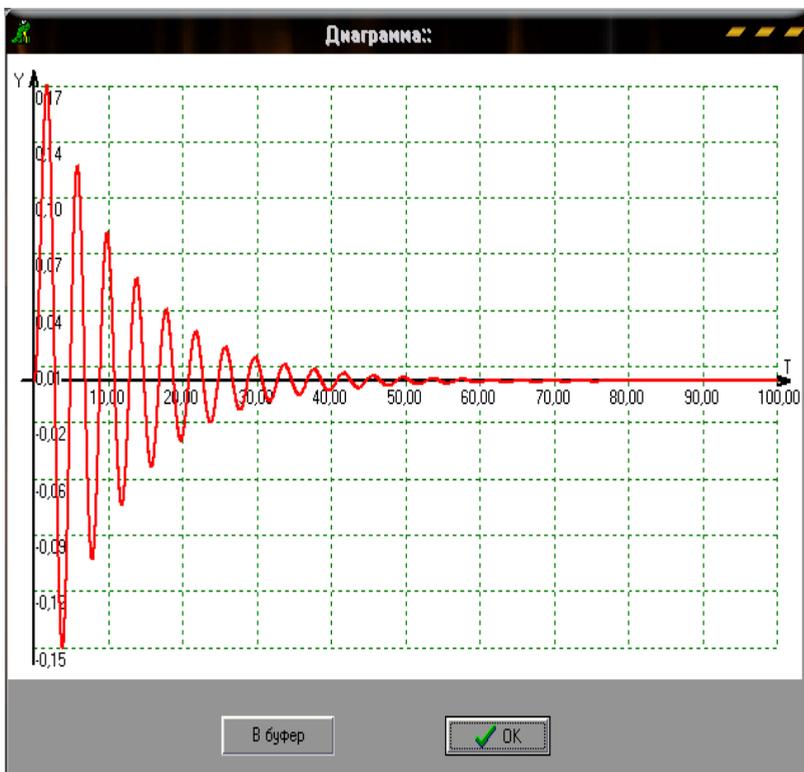
11. Оценить качество регулирования в одноконтурной системе автоматического управления по вещественно-частотной характеристике. Сравнить характеристики переходного процесса, полученного по ВЧХ и рассчитанного ранее.

12. Оценить запас устойчивости в системе, рассчитав запас устойчивости по модулю, запас устойчивости по фазе и показатель колебательности.

13. Рассчитать корневые оценки запаса устойчивости. Построить расширенную амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы автоматического регулирования для каждой корневой оценки запаса устойчивости. 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 расчета в окне появляется график переходных процессов по одному из каналов управления или возмущения. При нажатии кнопки «Увеличить» появляется диаграмма увеличенного переходного процесса последовательно по одному из двух каналов (рис. 6.2).



**Рис. 6.2.** Диаграмма переходного процесса в системе ПИД-регулятором

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».

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

*Отчет 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 расчете обобщенного интегрального критерия.

Таблица 6.1

Критерий качества	$S_0$	$S_1$	$S_2$	Значение критерия качества
$T_{рег}$				
$\psi$				
$\sigma$				
$Y_{дин}$				
$Y_{ст}$				
$I_{обоб}$				

3. Для каждой тройки настроек регулятора графики переходных процессов по каналу управления и по каналу возмущения.

4. Для каждой тройки настроек регулятора оценку прямых показателей качества, проведенную по кривым переходных процессов, и значение обобщенного интегрального критерия качества. Полученные результаты свести в табл. 6.1).

5. Анализ влияния составляющих ПИД-регулятора на прямые показатели качества и обобщенный интегральный критерий.

6. Расчет корневых показателей качества: степени устойчивости и степени колебательности для каждой тройки настроек регулятора в замкнутой системе автоматического управления.

7. Анализ влияния составляющих ПИД-регулятора на корневые показатели качества.

8. Для первоначальной заданной тройки настроек регулятора записать выражение и построить график ВЧХ замкнутой системы автоматического управления по каналу управления и 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 расчетным путем и по частотным характеристикам, в частности по ВЧХ.

11. Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутой системы автоматического управления для каждой тройки настроек ПИД-регулятора.

12. Расчет оценочных показателей запаса устойчивости: запаса устойчивости по модулю, запаса устойчивости по фазе, показателя колебательности для каждой тройки настроек регулятора. Полученные результаты свести в табл. 6.2.

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

14. Расчет 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 трех значениях третьей настройки регулятора.

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

16. Выводы по работе.

**Таблица 6.2**

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

## 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 счет чего снижается динамическая ошибка ПИД-закона регулирования?

## ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ

### *Лабораторная работа № 1*

#### ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ

*Цель работы:*

1. Знакомство с типовыми элементарными звеньями.
2. Изучение влияния параметров передаточной функции на форму кривой разгона для типовых элементарных звеньев.

*Задание:* исследовать типовые звенья, представить в отчете графики всех возможных вариантов поведения каждого звена, охарактеризовать эти звенья.

#### Порядок выполнения

1. Построить графики переходной функции звена.
2. Указать на различия поведения графиков и сделать предположение о причинах, эти различия вызвавших.
3. Сделать вывод о возможных вариантах поведения звена.

*Выполнение работы:*

I. Пропорциональное звено:

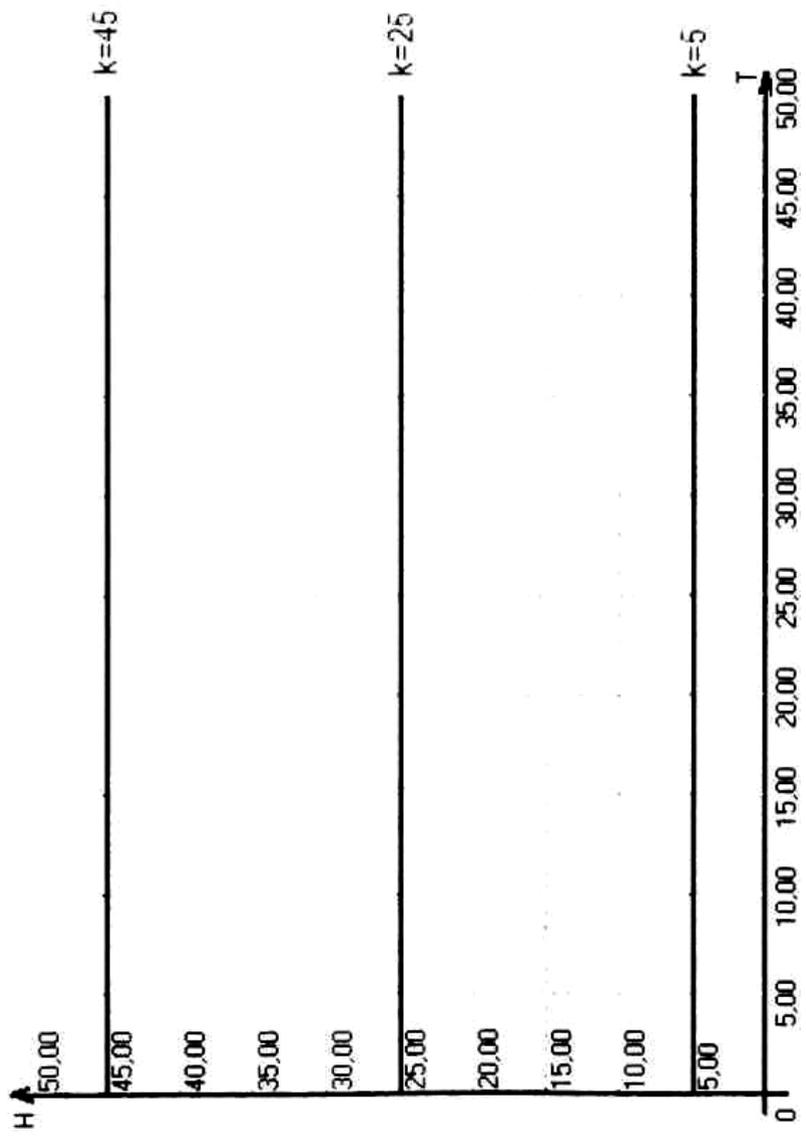
Уравнение звена –  $y(t) = kx(t)$ .

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

Кривая разгона –  $h(t) = k_1(t)$ .

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

Анализируя эти данные, приходим к выводу, что пропорциональное звено лишь «усиливает» входную величину, мгновенно и без искажений воспроизводя ее на выходе.



II. Интегрирующее звено:

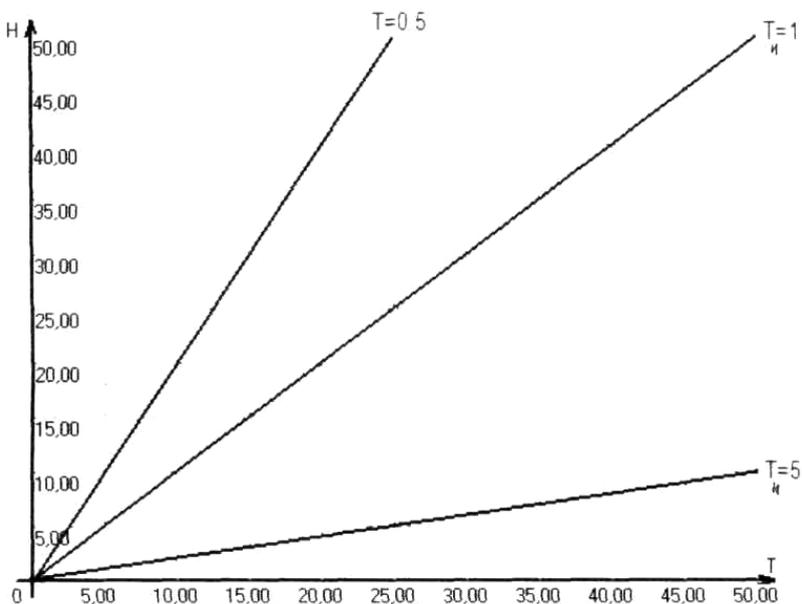
$$\text{Уравнение звена} - y(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t x(\tau) d\tau.$$

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

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

В данном случае изменение во времени кривой разгона обратно-пропорционально постоянной  $T$  и прямо пропорционально переменной времени  $t$ .

Таким образом, при подаче на вход интегрирующего звена постоянного возмущения выходная координата увеличивается до бесконечности с постоянной скоростью. Скорость эта зависит от коэффициента  $T_{\text{и}}$ .



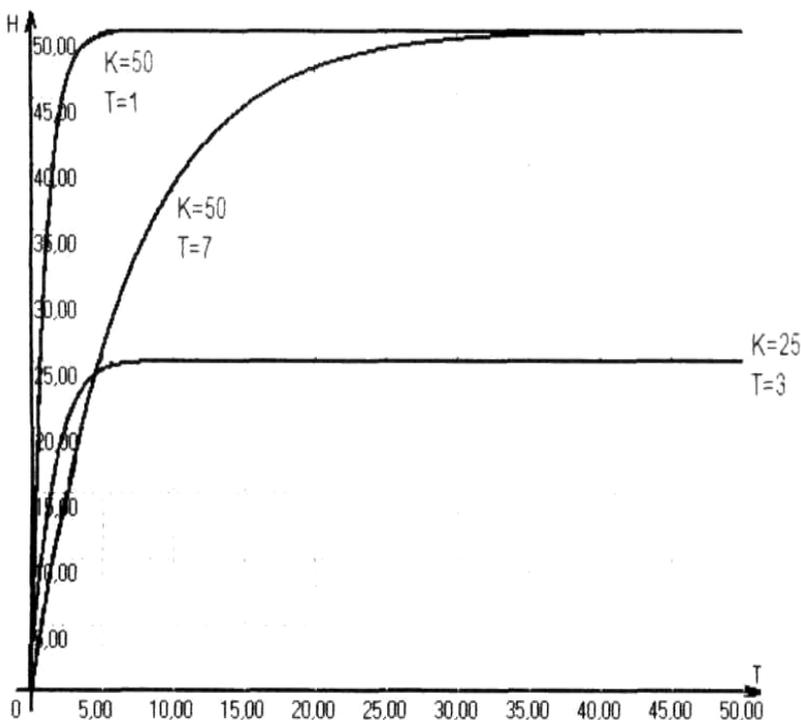
III. Аperiodическое звено 1-го порядка:

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

Передаточная функция –  $W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{Ts + 1}$ .

Кривая разгона –  $h(t) = k[1 - e^{-t/T}]$

На график переходной функции влияют две постоянных величины: передаточный коэффициент (коэффициент усиления)  $K$  и постоянная времени  $T$ . Аperiodическое звено 1-го порядка изменяет входную величину на выходе на коэффициент усиления  $K$  с течением времени. Скорость изменения выходного сигнала тем больше, чем меньше постоянная времени  $T$ .



IV. Аperiodическое звено 2-го порядка:

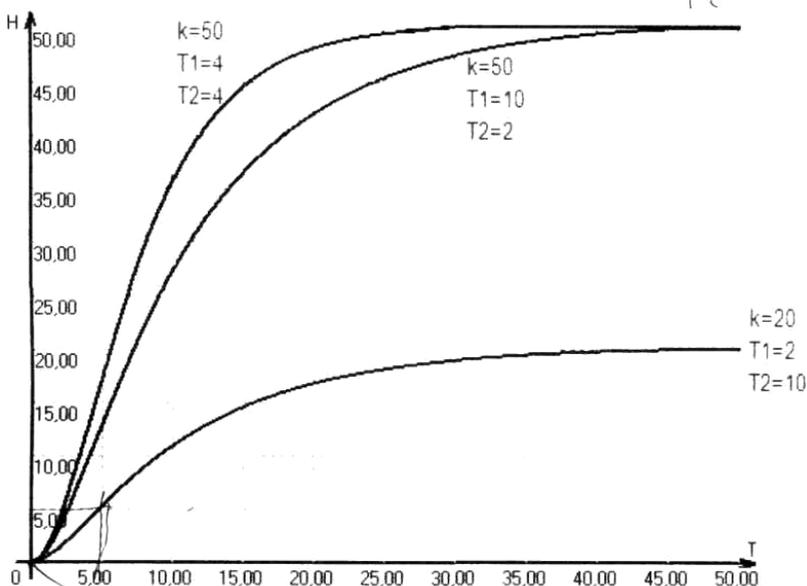
Уравнение звена –  $T_1T_2y''(t) + (T_1 + T_2)y'(t) + y(t) = kx(t)$ .

Передаточная функция – 
$$W(s) = \frac{k}{T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$
.

Кривая разгона –  $h(t) = C_0 + C_1e^{-t/T_1} + C_2e^{-t/T_2}$

Кривая разгона представляет собой кривую, имеющую одну точку перегиба и стремящуюся к значению  $k$  при  $t \rightarrow \infty$ .

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

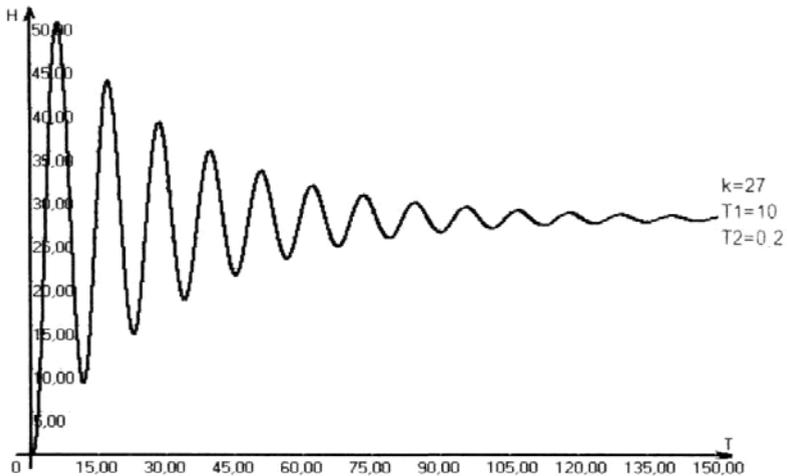
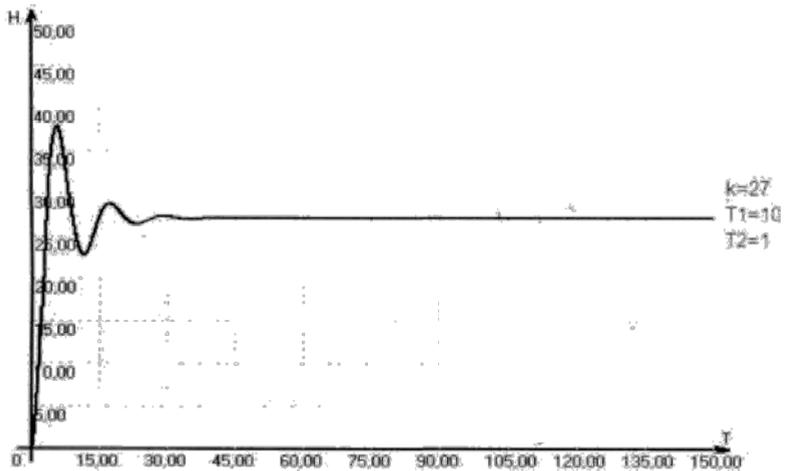


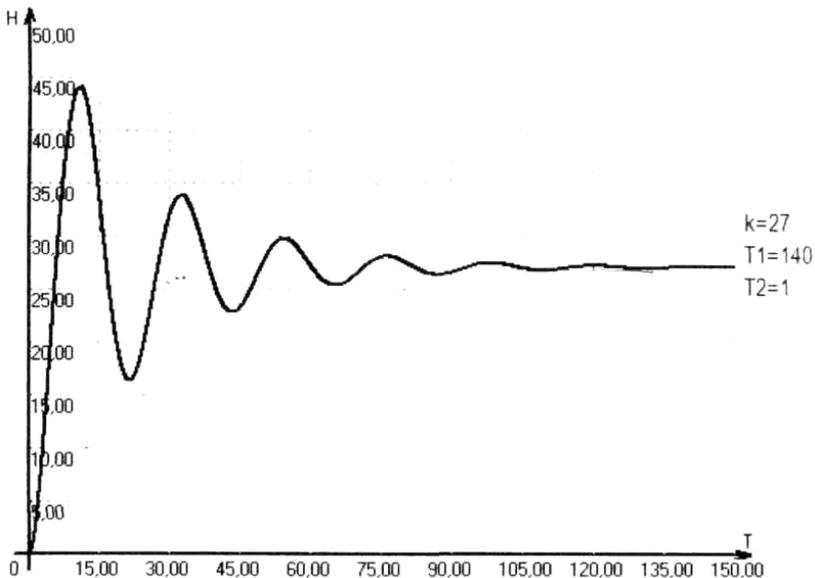
V. Колебательное звено:

Уравнение звена –  $T_k^2 y''(t) + T_D y'(t) + y(t) = kx(t)$ .

Передаточная функция –  $W(s) = \frac{k}{T_k^2 s^2 + T_D s + 1}$ .

Кривая разгона –  $h(t) = k[1 + A e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \beta)]$ .





Кривая разгона колеблется вокруг значения  $k$ , стремясь к нему при  $t \rightarrow \infty$ , т.е. со временем колебания «затихают». При увеличении параметра  $T_1$  происходит увеличение амплитуды колебаний и периода колебания. При увеличении параметра  $T_2$  происходит увеличение амплитуды колебаний и частоты колебания.

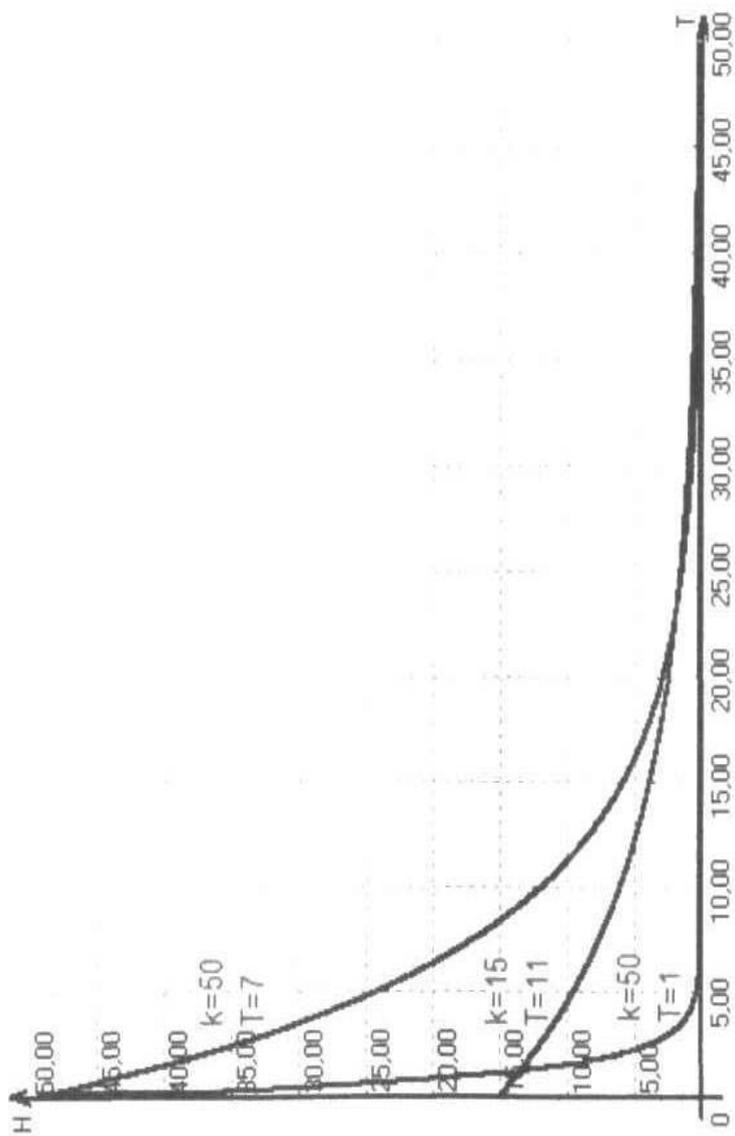
VI. *Реальное дифференцирующее звено:*

Уравнение звена –  $Ty'(t) + y(t) = T_d x'(t)$ .

Передаточная функция –  $W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{T_d s}{1 + Ts}$ .

Кривая разгона –  $h(t) = \frac{T_d}{T} e^{-t/T}$

На график переходной функции влияют две постоянные величины: передаточный коэффициент (коэффициент усиления)  $K$  и постоянная времени  $T$ . Реальное дифференцирующее звено изменяет входную величину на выходе на коэффициент усиления  $K$ , с течением времени кривая разгона уменьшается и обращается в ноль при  $t \rightarrow \infty$ . Скорость изменения выходного сигнала тем больше, чем меньше постоянная времени  $T$ .



VI. Интегро-дифференцирующее звено:

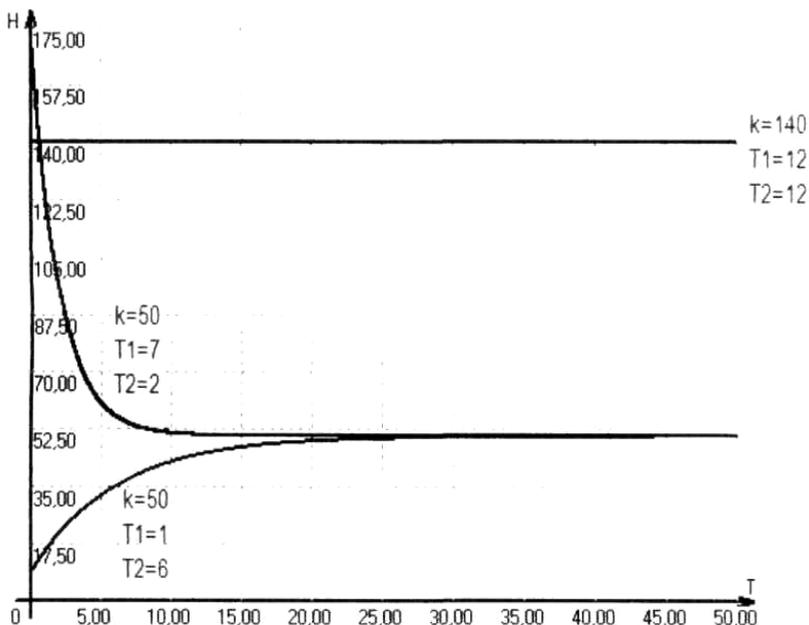
Уравнение звена –  $Ty'(t) + y(t) = k[T_0x'(t) + x(t)]$ .

Передаточная функция –  $W(s) = \frac{y(t)}{x(t)} = k \frac{T_0s + 1}{Ts + 1}$ .

Кривая разгона –  $h(t) = k \left( 1 + \left( \frac{T_d}{T} - 1 \right) e^{-t/T} \right)$ .

Из графика видно, что если  $T_1 > T_2$ , то данное звено ведет себя подобно дифференциальным звеньям. Если же  $T_1 < T_2$ , то звено ведет себя подобно интегральным и инерционным звеньям. Если же  $T_1 = T_2$ , то мы получаем ни что иное, как усилительное пропорциональное звено.

Значение переходной функции в начальной точке времени равняется произведению коэффициента усиления  $k$  и отношения  $T_1$  к  $T_2$ . От соотношения  $T_1$  и  $T_2$  так же зависит скорость изменения выходного значения, т.е. крутизна кривой разгона.

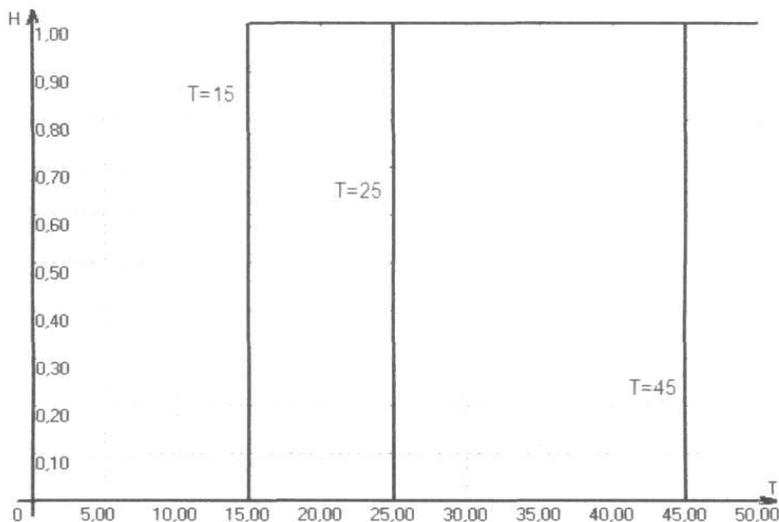


VII. Звено чистого запаздывания:

Уравнение звена –  $y(t) = x(t - \tau)$ .

Передаточная функция –  $W(s) = e^{-s\tau}$ .

Кривая разгона –  $h(t) = 1(t - \tau)$ .



Очевидно, что данное звено не искажает и не увеличивает входной сигнал. Оно лишь задерживает этот сигнал на время  $T$ , без изменений воспроизводя его на выходе.

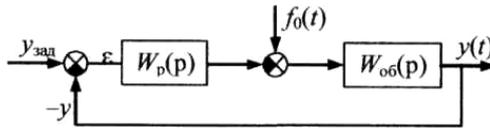
*Заключение:*

Исследование типовых звеньев и их соединений показало разнообразность поведения графиков их передаточных функций. Возможность воздействовать на сигнал многими звеньями, а также возможность изменять их постоянные коэффициенты позволяет автоматической системе добиться оптимальных результатов на выходе.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПИД-ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Цель работы:*

1. Знакомство с ПИД-законом регулирования в системах автоматического управления.
2. Приобретение навыков исследования качества регулирования в системах автоматического управления с ПИД-регулятором.
3. Расчет корневых показателей качества регулирования в системах с ПИД-регулятором.
4. Анализ качества регулирования одноконтурной системы автоматического управления при использовании ПИД-законов регулирования.
5. Расчет оценок запаса устойчивости в системе автоматического управления при использовании ПИД-регулятора.



### Порядок выполнения

Зададим передаточную функцию объекта регулирования и регулятора.

$$W_{об}(s) = \frac{(1 + 3s)e^{-0,2s}}{s^3 + 3s^2 + 4s + 2};$$

$$W_p(s) = -\left( S_1 + \frac{S_0}{s} + S_2s \right).$$

Интегральный квадратичный критерий определяется формулой  $J_o = \int_0^{\infty} y^2(t)dt$  и зависит от параметров объекта и настроек регулятора.

Для заданного объекта  $J_{\text{кв}}$  будет зависеть только от параметров настройки регулятора ( $S_0, S_1, S_2$ ). Таким образом, требуется отыскать такие настройки регулятора, при которых величина  $J_{\text{кв}}$  была бы минимальной.

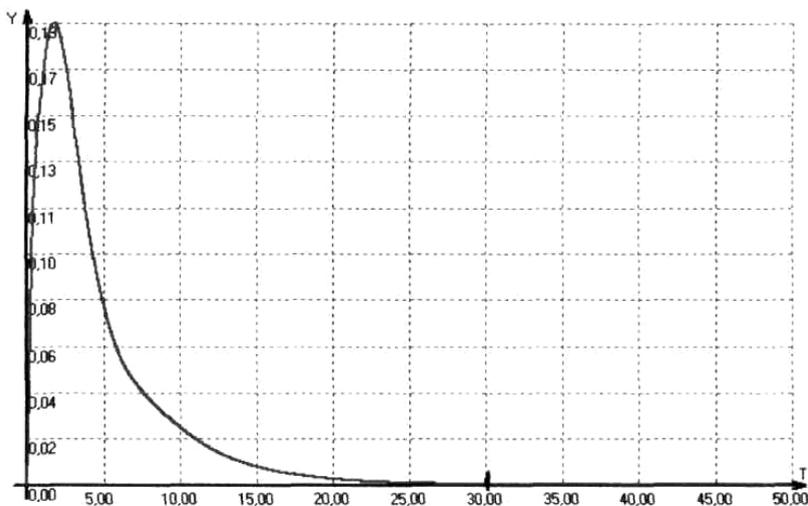
Данная задача относится к классу задач многомерной оптимизации на отыскание минимума функции многих переменных. Для ее решения воспользуемся методом координатного спуска.

*Описание решения:*

1. Задаются начальные значения переменных  $S_0, S_1, S_2$ .
2. Меняют  $S_1$  до тех пор, пока  $J_{\text{кв}}$  не будет минимальным и любое изменение этой переменной приводило к увеличению  $J_{\text{кв}}$ .
3. Меняют  $S_2$  до тех пор, пока  $J_{\text{кв}}$  не будет минимальным и любое изменение этой переменной приводило к увеличению  $J_{\text{кв}}$ .
4. Меняют  $S_3$  до тех пор, пока  $J_{\text{кв}}$  не будет минимальным и любое изменение этой переменной приводило к увеличению  $J_{\text{кв}}$ .
5. Повторяют п. 2, 3, 4 до достижения минимума функции, что определяется по тому, что переменные на последующих шагах мало отличаются от значений на предыдущих.

Представим такую последовательность действий в виде таблиц.

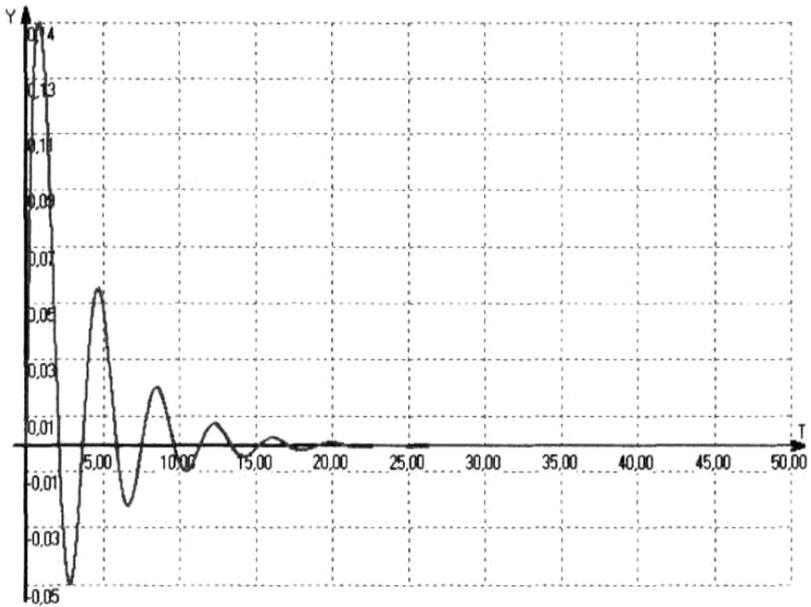
$$1. S_0 = 1,0 \quad S_1 = 1,0 \quad S_2 = 1,0 \quad J_{\text{кв}} = 0,11223$$



2.

$S_0$	$S_1$	$S_2$	$J_{KB}$
1	1	1	0,11223
2	1	1	0,04801
3	1	1	0,03169
4	1	1	0,02680
4,2	1	1	0,02660
4,3	1	1	0,02659
4,4	1	1	0,09276

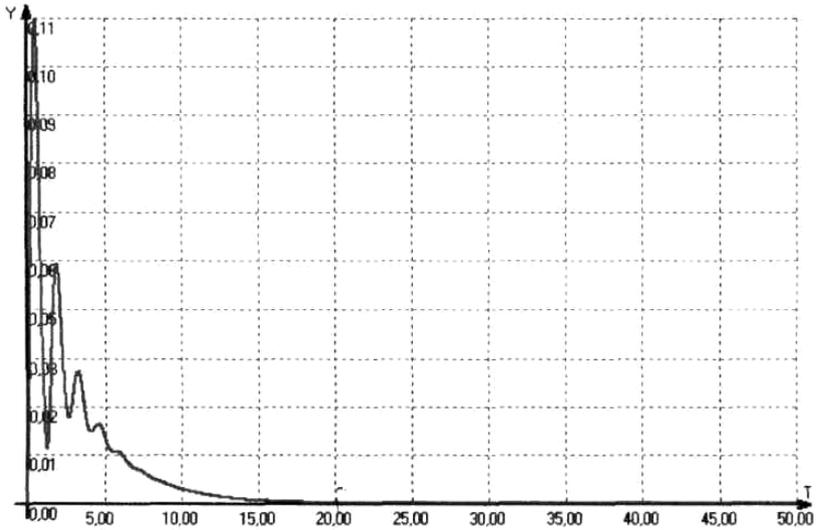
$$S_0 = 4,3 \quad S_1 = 1,0 \quad S_2 = 1,0 \quad J_{KB} = 0,02659$$



3.

$S_0$	$S_1$	$S_2$	$J_{KB}$
4,3	1	1	0,02659
4,3	2	1	0,01599
4,3	3	1	0,01268
4,3	4	1	0,01114
4,2	5	1	0,01049
4,3	5,1	1	0,01047
4,3	5,2	1	0,01047
4,3	5,3	1	0,01047
4,3	5,4	1	0,01048

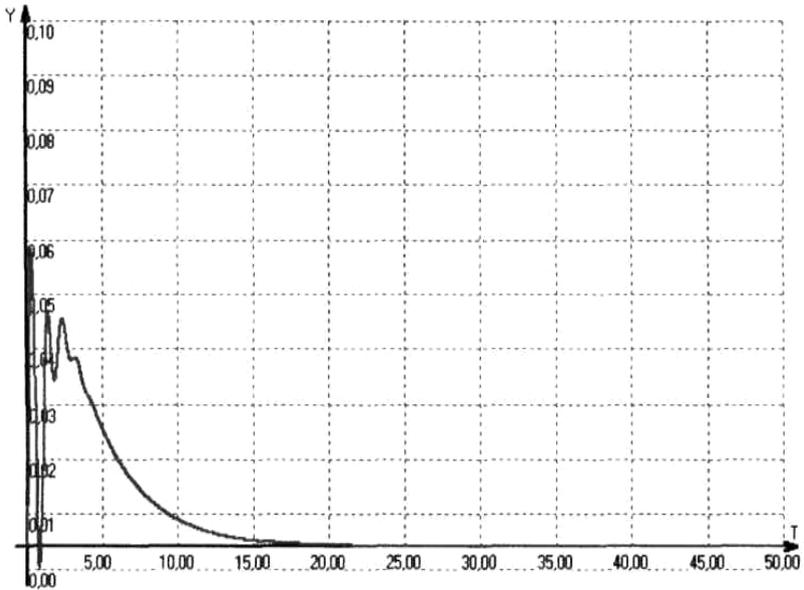
$S_0 = 4,3$      $S_1 = 5,2$      $S_2 = 1,0$      $J_{KB} = 0,01047$



4.

$S_0$	$S_1$	$S_2$	$J_{KB}$
4,3	5,2	1	0,01047
4,3	5,2	1,1	0,00906
4,3	5,2	1,2	0,00806
4,3	5,2	1,3	0,00737
4,2	5,2	1,4	0,00692
4,3	5,2	4,5	0,00668
4,3	5,2	1,6	0,00662
4,3	5,2	1,7	0,00673

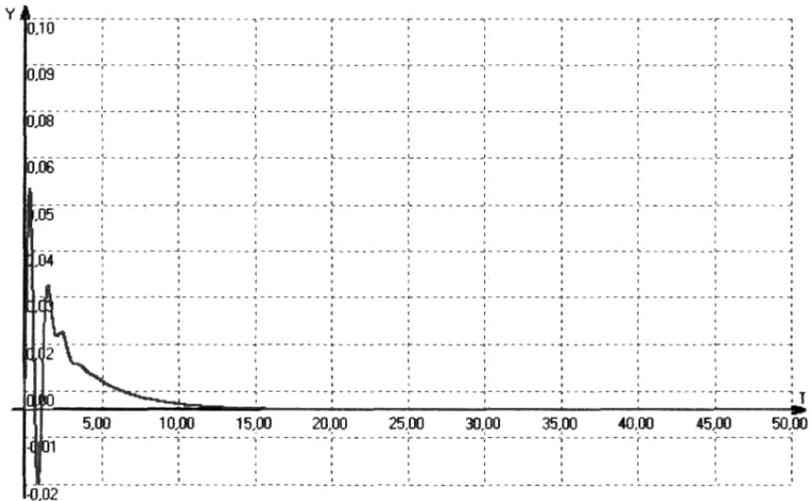
$S_0 = 4,3$      $S_1 = 5,2$      $S_2 = 1,6$      $J_{KB} = 0,00662$



5.

$S_0$	$S_1$	$S_2$	$J_{KB}$
4,3	5,2	1,6	0,00662
5	5,2	1,6	0,00534
6	5,2	1,6	0,00417
7	5,2	1,6	0,00343
8	5,2	1,6	0,00296
9	5,2	1,6	0,00266
10	5,2	1,6	0,00247
10,1	5,2	1,6	0,00245
10,2	5,2	1,6	0,00244
10,3	5,2	1,6	0,00246

$S_0 = 10,2$      $S_1 = 5,2$      $S_2 = 1,6$      $J_{KB} = 0,00244$



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Юревич, Е. И.** Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – 4-е изд., пер. и доп. – СПб. : BHV, 2016. – 560 с.
2. **Коновалов, Б. И.** Теория автоматического управления : учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – СПб. : Лань, 2017. – 224 с.
3. **Ким, Д. П.** Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – 2-е изд., испр. и доп. / Д. П. Ким. – М. : Физматлит, 2017. – 312 с.
4. **Власов, К. П.** Теория автоматического управления. Основные положения. Программы расчета / К. П. Власов. – М. : Гуманитарный Центр, 2017. – 544 с.
5. **Методы** классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 3-х т. Т. 1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / под ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 748 с.
6. **Лазарева, Т. Я.** Основы теории автоматического управления : учебное пособие / Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Лабораторная работа № 1.	
<b>Типовые элементарные звенья</b> .....	4
Лабораторная работа № 2.	
<b>Снятие амплитудно-фазовых характеристик</b> .....	8
Лабораторная работа № 3.	
<b>Исследование статических и астатических систем регулирования</b> .....	16
Лабораторная работа № 4.	
<b>Исследование качества систем автоматического регулирования</b> .....	29
Лабораторная работа № 5.	
<b>Определение запаса устойчивости по модулю и фазе</b> .....	41
Лабораторная работа № 6.	
<b>Исследование ПИД-закона регулирования</b> .....	51
ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ .....	59
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	75







Учебное издание

МАРТЕМЬЯНОВ Юрий Федорович  
МУРОМЦЕВ Дмитрий Юрьевич  
ЩЕРБИНИН Павел Алексеевич

# ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова  
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

**ISBN 978-5-8265-2189-2**



Подписано в печать 22.12.2020.

Дата выхода в свет 25.01.2021.

Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л.

Тираж 300 экз. (1-й з-д 40) Заказ № 42

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.  
Телефон (4752) 63-81-08.

E-mail: izdatelstvo@tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А  
Телефон (4752) 63-07-46.

E-mail: tipo\_tstu68@mail.ru