

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Курганский государственный университет

*Кафедра автоматизации производственных процессов*

## **Исследование линейных систем автоматического управления**

Методические указания к выполнению комплекса лабораторных работ по курсам «Теория автоматического управления», «Основы теории автоматического регулирования», «Автоматизация контроля, измерений и испытаний» для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 220301.65 «Автоматизация технологических процессов и производств», 151001.65 «Технология машиностроения», 150202.65 «Оборудование и технология сварочного производства», 140211.65 «Электроснабжение», 200503.65 «Стандартизация и сертификация», 220601.65 «Управление инновациями» и направлений 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», 151900.62 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 150700.62 «Машиностроение», 220400.62 «Управление в технических системах», 220700.62 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Курган 2012

Кафедра автоматизации производственных процессов

Дисциплины: «Теория автоматического управления»

«Основы теории автоматического регулирования»

«Автоматизация контроля, измерений и испытаний»

Составила: канд. техн. наук, доцент О.В. Дмитриева

Утверждено на заседании кафедры «6» сентября 2012 г.

Рекомендовано методическим советом университета «28» сентября 2012 г.

## Содержание

Введение.....	4
Лабораторная работа №1. Классическая система авторегулирования Уатта.....	6
Лабораторная работа №2. Исследование линейных систем.....	8
Лабораторная работа №3. Система автоматического регулирования.....	10
Оформление отчета .....	13
Список литературы.....	14

## Введение

Комплекс программ ТАУ для компьютерного обеспечения учебного процесса по курсам “Теория автоматического управления”, “Основы теории автоматического регулирования”, “Автоматизация контроля, измерений и испытаний”, разработан научно-методическим отделом ассоциации “Математика и кибернетика на персональном компьютере для студентов и учащихся”.

При создании комплекса ТАУ в основу были положены следующие принципы:

1. “ТАУ” является программным средством для проведения лабораторных работ и курсового проектирования по курсу “Теория автоматического управления”.

2. “ТАУ” построен по модульному принципу. Каждый модуль – это пакет (т.е. программа, работающая вне языковой среды), предназначенный для решения задач одного или нескольких разделов курса “Теории автоматического управления” и независим от других пакетов.

3. При разработке “ТАУ” ставилась цель создать такое программное средство, которое сможет использовать в учебном процессе как можно более широкий круг преподавателей и студентов. Поэтому “ТАУ” не ориентирован на какой-либо конкретный способ построения курса, методику изложения тех или иных вопросов курса, ту или иную постановку лабораторных работ. Модульный принцип построения “ТАУ” позволяет преподавателям самим решать вопрос о применении программы в учебном процессе и ставить с её помощью различные лабораторные работы.

4. “ТАУ” – не обучающая программа и не содержит средств контроля знаний. Предполагается, что студент работает с “ТАУ” под руководством преподавателя, который ставит задачу и оценивает результаты работы.

Комплекс ТАУ имеет следующую структуру. Составляющие комплекс пакеты разделяются на группы в зависимости от разделов курса, в которых они используются.

### 1. Вводный курс.

1.1. “Классическая система авторегулирования Уатта” (файл **watt.exe**). Во вводном курсе используются первый и второй (частично) разделы этого пакета, предназначенного для применения в двух различных разделах ТАУ.

1.2. “Исследование линейных систем” (файл **linsys.exe**). Пакет предназначен для первоначального знакомства с линейными системами.

### 2. Основы теории авторегулирования.

2.1. “Система автоматического регулирования” (файл **control.exe**).

2.2. “Импульсная САР с цифровым регулятором” (файл **impuls.exe**).

2.3. “Спектральные свойства линейных систем” (файл **spectr.exe**).

2.4. “Многосвязная система регулирования” (файл **mvacs.exe**).

С помощью пакетов этой группы студент изучает важнейшие свойства систем авторегулирования объектов с одной и двумя регулируемыми величинами.

В каждом из четырех пакетов система авторегулирования задается структурной схемой, изображенной на экране. Вид передаточных функций студент выбирает из библиотеки пакета и задает значения числовых коэффициентов. Аналогично производится выбор из библиотеки формы входных сигналов и типовых нелинейных элементов.

Для исследования зависимости свойств системы от её параметров (коэффициентов усиления, постоянных времени, величины чистого запаздывания, периода квантования в импульсной системе, параметров нелинейных элементов) в пакетах предусмотрено символьное задание двух параметров с помощью двух букв А и В. В пакете “Многосвязная система регулирования” добавляется возможность символьно задать третий параметр с помощью буквы С. Символьные параметры неравноценны. Для построения фрагмента корневого годографа используется только буква А, для исследования по критерию Рауса или поиска минимума по интегральному критерию – буквы А и В. Число шагов при изменении параметра ограничено девятью.

### 3. Специальные вопросы теории авторегулирования.

3.1. “Асимптотические свойства линейных систем” (файл **asympt.exe**). Изучаются свойства систем при неограниченном увеличении коэффициента усиления.

3.2. “Аналитическое конструирование регуляторов” (файл **anacn.exe**). Пакет используется для решения задачи Летова в развитие раздела “Интегральные оценки качества регулирования”.

3.3. “Классическая система авторегулирования Уатта” (файл **watt.exe**). Второй и третий разделы пакета используются для изучения процессов в нелинейных системах.

3.4. “Задача быстродействия” (файл **optim.exe**). Изучаются предельные возможности уменьшения времени регулирования для линейных объектов в зависимости от ограничения управляющего сигнала.

### 4. Управление линейными объектами в пространстве состояний.

4.1. “Аналитическое конструирование регуляторов” (файл **anacn2.exe**). Решается задача Калмана-Летова конструирования регулятора, минимизирующего квадратичный функционал.

4.2. “Управление в пространстве состояний” (файл **kalman.exe**). Пакет решает задачи модального управления и использования фильтра Калмана при стохастических возмущениях.

4.3. “Задача быстродействия. Несколько управляющих величин” (файл **optim2.exe**).

### 5. Сервисные пакеты.

5.1. “Обратное преобразование Лапласа” (файл **rlt.exe**). Пакет вычисляет аналитическое выражение для обратного преобразования Лапласа дробно-рациональной функции и строит график по этому выражению. (Степень числителя функции не должна превышать 19, а знаменателя – 20).

5.2. “Корни многочленов” (файл **servis.exe**). Пакет вычисляет корни многочлена не выше 20-го порядка, а также восстанавливает многочлен по заданным корням.

По команде: **tay** (файл **tay.bat**) вызывается программа-диспетчер **menu.exe**, которая позволяет выбрать одну из программ:

**watt** – Классическая система авторегулирования Уатта;

**linsys** – Исследование линейных систем;

**control** – Система автоматического регулирования;

**impuls** – Импульсная САР с цифровым регулятором;

**mvacs** – Многосвязная система регулирования;

**asympt** – Асимптотические свойства линейных систем;

**spectr** - Спектральные свойства линейных систем;

**anacon** – Аналитическое конструирование регуляторов;

**anacon2** – то же, несколько управляющих воздействий;

**optim** – Задача быстрогодействия;

**optim2** – то же, несколько управляющих воздействий;

**kalman** – Управление в пространстве состояний;

**servis** – Корни многочленов (сервисные программы);

**rlt** – Обратное преобразование Лапласа;

Список программ выводится на экран. Двигая засветку, нужно выбрать строку и нажать [**Enter**]. Во всех случаях, когда на экране построен график, его можно сохранить в файле. Все графики в комплексе ТАУ снабжаются меню, содержащим команды, которые позволяют изменять область построения графика. В одних координатных осях строится не более двух графиков.

## Лабораторная работа №1 Классическая система авторегулирования Уатта

В восьмидесятих годах восемнадцатого века Джеймс Уатт применил изобретенный им центробежный регулятор для поддержания постоянной скорости вращения паровой машины при изменении нагрузки. Изучение динамики созданной Уаттом системы авторегулирования имело фундаментальное значение для развития теории автоматического управления. Тот факт, что Уатт работал с паровыми машинами, давно канувшими в лету, не имеет значения, так как изучалась система “двигатель без самовыравнивания – центробежный регулятор”. Именно эта модель была в линейном приближении изучена А.И. Вышнеградским (1876,1877 г.). Следующий шаг был сделан в 1947г. А.А. Андроновым и А.Г. Майером, которые методом точечных преобразований исследовали динамику нелинейной системы, получаемой из модели Вышнеградского при учете кулоновского трения в регуляторе. Л.С. Понтрягин в учебнике по обыкновенным дифференциальным уравнениям исследовал систему авторегулирования Уатта на основе нелинейной системы уравнений, но без учета кулоновского трения в муфте. Эта модель в 1979 г. была изучена американским математиком Б. Хэссардом на основе современной теории бифуркаций. Поэтому система авторегулирования Уатта может и должна изучаться в различных разделах курса ТАУ.

Пакет “Классическая система авторегулирования Уатта” состоит из трех частей.

**Первая часть** вызывается командой **Главного меню** “**Модель системы**”. Она представляет собой программу последовательной анимации: двигателя, центробежного измерителя скорости, замкнутой системы авторегулирования “двигатель – центробежный регулятор”, реагирующей на скачок возмущающего воздействия.

Эта часть используется в начале курса ТАУ для наглядного знакомства с принципом обратной связи. Цель работы состоит в том, чтобы наглядно познакомиться на примере системы авторегулирования Уатта с основными понятиями теории автоматического управления.

**Во второй части** студент работает с моделью системы:

$$\frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi},$$

$$\frac{d\dot{\phi}}{dt} = n^2 \omega^2 \sin(\phi) \cos(\phi) - \frac{g}{L} \sin(\phi) - \frac{b}{m \cdot L} \dot{\phi},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k}{J} \cos(\phi) - \frac{F}{J}$$

$$F = P - P_1(\phi^0) + k \cos(\phi^0)$$

где  $m$ - масса шаров,  $n$  – передаточное число,  $J$  – момент инерции,  $L$  – длина стержней,  $b$  – постоянная трения,  $F$  – сумма моментов сил,  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $\omega$  – угловая скорость вала двигателя,  $\phi$  – угол отклонения от вертикали стержней регулятора,  $\dot{\phi}$ - скорость изменения угла отклонения,  $P_1$  – момент силы двигателя,  $P$  – момент силы нагрузки.

Для работы со второй частью используются команды **Главного меню**:

- “**Задание параметров**”,
- “**Линеаризация системы**”,
- “**Фазовый портрет**”,
- “**Процесс авторегулирования**”.

В работе исследуется динамика системы при значениях параметров, соответствующих устойчивости линеаризованной системы, и процессы в системе при таких значениях параметров, когда линеаризованная система неустойчива. Студент имеет возможность исследовать и сравнить процессы в линеаризованной и в исходной нелинейной модели. Пакет предоставляет возможность построить процесс регулирования как функцию времени и на фазовой плоскости. Одна линия соответствует линеаризованной системе, а вторая – исходной.

В третьей части пакета студент работает с моделью системы, рассмотренной А.А.Андроновым:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = F(x_1, x_2, x_3),$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -x_1.$$

$$F(x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} -Ax_1 - Bx_2 + x_3 - C, & \text{если } x_2 > 0 \\ \text{или если } x_2 = 0 \text{ и } -Ax_1 + x_3 > C \\ -Ax_1 - Bx_2 + x_3 + C & \text{если } x_2 < 0 \\ \text{или если } x_2 = 0 - Ax_1 + x_3 < -C \\ 0, & \text{если } x_2 = 0 \text{ и } -C < -Ax_1 + x_3 < C, C = 0,5 \end{cases}$$

где А, В и С – приведенные безразмерные параметры.

Как и во второй части строятся графики процесса регулирования в функции времени и на фазовой плоскости.

*Контрольные вопросы.*

Какой физический смысл имеют понятия “объект управления”, “система”, “структура системы”, “обратная связь”?

Что в системе является объектом регулирования?

Какова его выходная координата (регулируемая величина)?

Как осуществляется управляющее воздействие на объект? Возмущающее воздействие на объект?

Какие сигналы на входе и выходе регулятора?

Как сигнал с выхода регулятора воздействует на вход объекта?

Как реализуется в данной системе принцип отрицательной обратной связи?

*Порядок выполнения работы:*

1. Изучить иллюстрацию физической модели и математическую модель системы.

2. Ответить на контрольные вопросы.

3. Проанализировать математическую модель и задать параметры для получения наилучшего переходного процесса.

4. Сформулировать выводы.

## Лабораторная работа №2 Исследование линейных систем

В общем случае какой-либо объект в теории автоматического управления описывается передаточной функцией, содержащей полиномы от  $p$  произвольного порядка в числителе и знаменателе. Но если передаточная функция объекта содержит только простой множитель в числителе

(знаменатель при этом представляет собой действительное число) либо только простой множитель в знаменателе (числитель представляет собой действительное число), то объект называется типовым динамическим звеном.

Из курса алгебры известно, что полином любого порядка можно разложить на простые множители. То есть любую САУ можно представить в виде последовательного соединения типовых звеньев. С другой стороны, реальные звенья САУ могут иметь самую разнообразную физическую основу (электронные, механические, гидравлические, электромеханические и т.п.) и конструктивное выполнение, но иметь одинаковые передаточные функции и являться одинаковыми типовыми звеньями. Поэтому знание характеристик звеньев столь же необходимо для расчетов САУ, как знание таблицы умножения в арифметике.

Пакет предназначен для первоначального знакомства студентов с базовыми свойствами линейных систем (разомкнутых и замкнутых), поэтому его интерфейс предельно нагляден и прост.

Студент выбирает для исследования разомкнутую систему (рис.1) или замкнутую систему (рис.2).

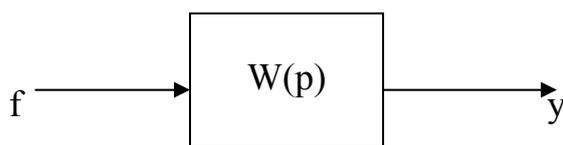


Рис.1. Структурная схема разомкнутой системы

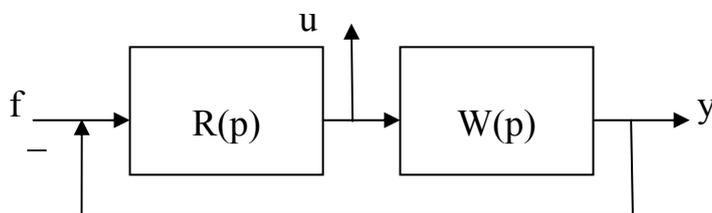


Рис.2. Структурная схема замкнутой системы

Передаточные функции задаются выбором степени числителя и знаменателя, а затем задаваясь значениями коэффициентов или нулями и полюсами. Задав передаточные функции, студент может получить

следующую информацию: нули и полюса функции на комплексной плоскости, график амплитудно-частотной характеристики, график весовой функции и график переходной функции. Если исследуется замкнутая система, то одновременно с графиком переходной функции рисуется график управляющего сигнала.

Предусматривается возможности изменения масштаба в каждом окне и развертывания выделенного окна на весь экран.

Используя полученные данные, можно исследовать САУ на устойчивость.

Система называется устойчивой, если:

1) после снятия воздействия по окончании переходного процесса система возвращается в исходное равновесное состояние;

2) после изменения воздействия на постоянную величину по окончании переходного процесса система приходит в новое равновесное состояние.

Общим условием затухания переходного процесса в целом является отрицательность действительных частей всех корней характеристического уравнения системы.

Если хотя бы один корень имеет положительную действительную часть, он даст расходящуюся составляющую переходного процесса, и система будет неустойчивой.

Изображая корни характеристического уравнения точками на комплексной плоскости, условие устойчивости можно сформулировать так: условием устойчивости САУ является расположение всех корней характеристического уравнения в левой комплексной полуплоскости.

#### *Контрольные вопросы.*

Какие достоинства имеют способы описания процессов с использованием передаточных функций?

Приведите примеры основных частотных характеристик звеньев.

Перечислите типовые входные сигналы, применяемые при анализе САУ.

Что понимается под качеством процесса управления, и каковы его основные показатели?

В чем заключается физический смысл понятия устойчивость?

#### *Порядок выполнения работы.*

1. Задать передаточные функции и параметры системы по согласованию с преподавателем.

2. Получить временные и частотные характеристики.

3. Исследовать влияние параметров системы на устойчивость и качество переходных процессов.

4. Ответить на контрольные вопросы.

5. Сформулировать выводы.

### Лабораторная работа №3 Система автоматического регулирования

Структурная схема системы автоматического регулирования изображена на рисунке 3.

На схеме приняты следующие обозначения:

$W$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $H$  - линейные блоки, задаваемые передаточными функциями  $W(p)$ ,  $R(p)$ ,  $G(p)$ ,  $H(p)$ . Студент имеет возможность выбрать вид передаточной функции из библиотеки и задать числовые значения коэффициентов. Порядок системы не должен превышать 20.

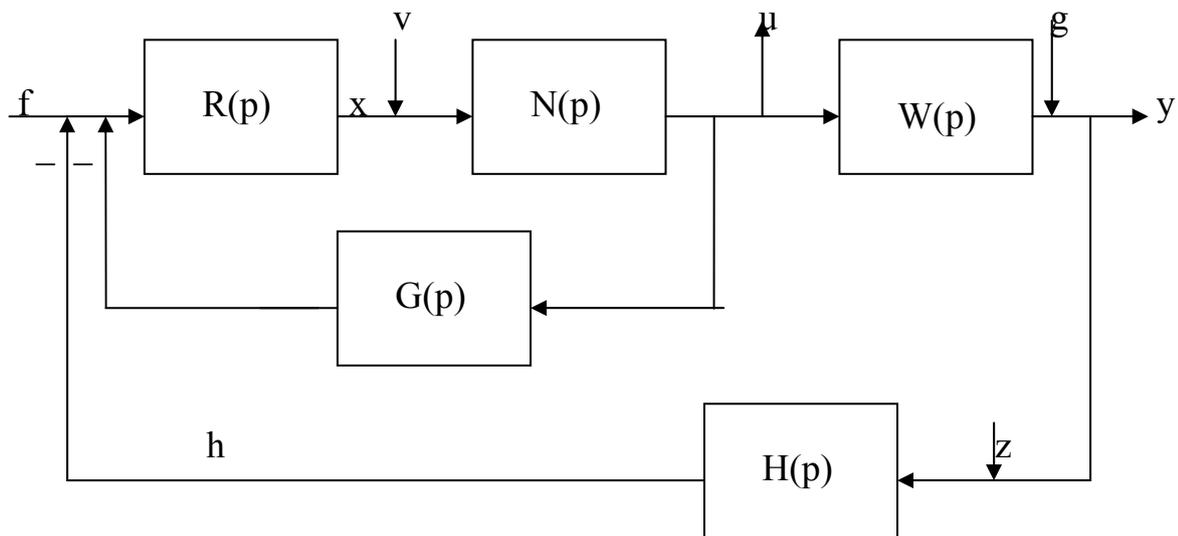


Рис.3 Структурная схема исследуемой системы

N - блок работает в двух режимах. При исследовании линейных систем он становится прозрачным – осуществляет тождественную передачу сигнала. Для исследования нелинейных систем студент выбирает типовой нелинейный элемент (звено) из библиотеки и задает числовые значения параметров. Блок N может быть переставлен местами с блоком R.

$f, v, g, z$  - входные воздействия. Студент выдирает функции  $f(t), v(t), g(t), z(t)$  из библиотеки функций и задает значения их коэффициентов.

$y$  - выходной сигнал.

$h, u, x$  - координаты системы.

В процессе исследования системы студент может построить графики выходного и входного сигналов, а также изменения значений некоторых координат:  $y(t), f(t), g(t), h(t), u(t), v(t), x(t), z(t)$ .

В начале работы с пакетом студент выбирает:

Установить базовый вариант  
Повторить последний счет

Если выбран базовый вариант, то автоматически устанавливается  $G(p), H(p), N=1, f(t)=1, g(t)=v(t)=z(t)=0$ . Фактически в этом случае студент работает со структурной схемой (рис.4).

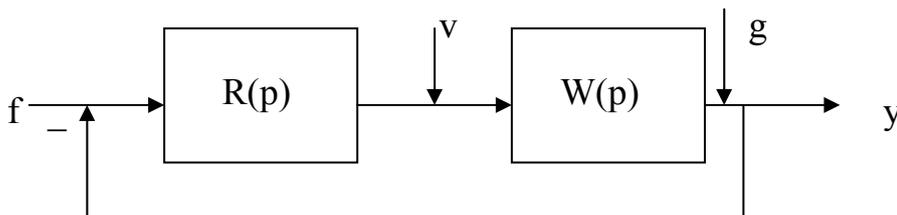


Рис.4. Структурная схема преобразованной системы

На следующем этапе он может перейти к системе со структурной схемой (рис.5), позволяющей изучить влияние местной обратной связи на динамику системы.

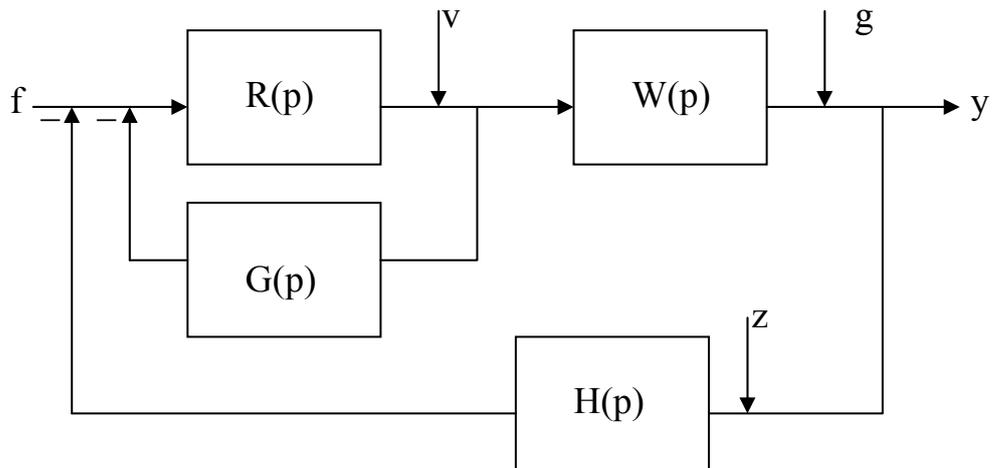


Рис.5. Структурная схема исследуемой системы

Изучение нелинейных систем обычно проводится сначала на основе структурной схемы (рис.6), а затем “включают” местную обратную связь G(p).

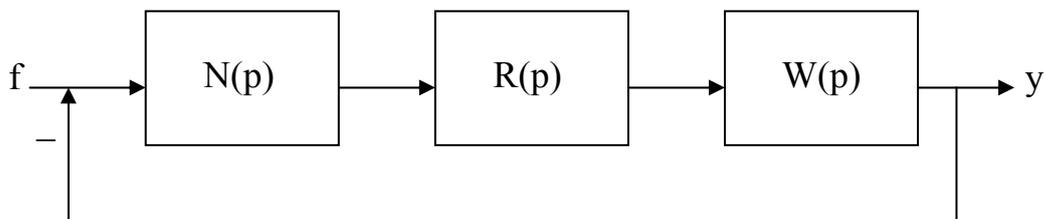


Рис.6. Структурная схема нелинейной системы

Пакет не перерисовывает основную структурную схему в соответствии с рассматриваемым частным случаем. На экране сохраняется изображение основной структурной схемы.

Входные сигналы и нелинейные элементы студент выбирает из соответствующих библиотек (табл. 1).

Таблица 1

Библиотека передаточных функций

$k$	$\frac{k}{Tp+1}$	$\frac{p}{Tp+1}$
$k \frac{(T_1p+1)(T_2p+1)}{(T_3p+1)(T_4^2p^2+2\lambda T_4p+1)} e^{-\varphi}$		$k \frac{1}{p(Tp+1)(T_1^2p^2+2\lambda T_1p+1)} e^{-\varphi}$
$k \frac{Tp+1}{(T_1p+1)(T_2p+1)} e^{-\varphi}$		$k \frac{(T_1p+1)(T_2p+1)}{p(Tp+1)}$
$k \frac{Tp+1}{p}$		$k_1 + k_2 \frac{1}{p} + k_3 \frac{p}{Tp+1}$
$k \frac{a_0p^8 + a_1p^7 + a_2p^6 + a_3p^5 + a_4p^4 + a_5p^3 + a_6p^2 + a_7p + a_8}{b_0p^9 + b_1p^8 + b_2p^7 + b_3p^6 + b_4p^5 + b_5p^4 + b_6p^3 + b_7p^2 + b_8p + b_9}$		

Сформировав необходимую схему, можно исследовать полученную систему на устойчивость, воспользовавшись критериями Найквиста или Рауса, а также корневым годографом, который показывает на комплексной плоскости корни характеристического уравнения при изменении одного из параметров.

В соответствии с критерием устойчивости Найквиста об устойчивости замкнутых САУ можно судить по АФЧХ разомкнутой цепи, а также по ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой цепи.

Для устойчивой работы замкнутой САУ необходимо, чтобы АФЧХ не охватывала точку  $(-1, j0)$ , или ЛАЧХ разомкнутой цепи должна пересекать ось абсцисс раньше, чем фаза перейдет за значение  $-\pi$ .

*Контрольные вопросы.*

Какая связь между годографом и ЛАЧХ с ЛФЧХ?

Как определить устойчивость системы, пользуясь критерием Найквиста?

Как определить запас устойчивости?

Как изменяется запас устойчивости при увеличении (уменьшении) общего коэффициента передачи системы?

Какие виды корректирующих устройств вы знаете?

*Порядок проведения работы.*

1. Сформировать элементы схемы.

2. Исследовать устойчивость системы на частотах от 0,1 до 1000 Гц с шагом 1.

3. Разомкнуть систему в точке  $h$ .

4. Изменить корректирующие устройства и повторить проверку устойчивости.

5. Исследовать влияние нелинейных элементов методом фазового портрета.

6. Ответить на контрольные вопросы.

7. Сформулировать выводы.

### Оформление отчета

Отчет по лабораторным работам оформляется группой студентов (2-3 чел) по всем лабораторным работам и должен содержать следующие материалы:

1. Название лабораторной работы.

2. Структурные схемы.

3. Передаточные функции с указанием изменяемых параметров.

4. Временные характеристики.

5. Частотные характеристики.

6. Выводы по работе.

## Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. - 3-е изд. - СПб.: Профессия, 2003. - 750 с.
2. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования. – М.: Высшая школа, 2004.- 365с.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления.- М.: Машиностроение, 2004.-573с.
4. Теория автоматического управления/Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 2003.-270с.
5. Лозинский Л.Д. Рутковская А.Ю. Краткое описание комплекса программ ТАУ: Учебное пособие. – М., 1996 – 40с.

Дмитриева Ольга Венедиктовна

## **Исследование линейных стационарных систем**

Методические указания к выполнению комплекса лабораторных работ по курсам «Теория автоматического управления», «Основы теории автоматического регулирования», «Автоматизация контроля, измерений и испытаний» для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 220301.65 «Автоматизация технологических процессов и производств», 151001.65 «Технология машиностроения», 150202.65 «Оборудование и технология сварочного производства», 140211.65 «Электроснабжение», 200503.65 «Стандартизация и сертификация», 220601.65 «Управление инновациями» и направлений 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», 151900.62 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 150700.62 «Машиностроение», 220400.62 «Управление в технических системах», 220700.62 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Авторская редакция

---

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл. печ. л. 1,0	Уч.-изд. л. 1,0
Заказ	Тираж 20	Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.