

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Волгоградский государственный технический университет"

Факультет "автоматизированных систем и технологической информатики"  
Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
**Теория автоматического управления**

Направление подготовки 220400.62 "Управление в технических системах"

Профиль подготовки «Системы и технические средства автоматизации и  
управления»

**Факультет подготовки инженерных кадров**

Форма обучения

	Заочная - сокращенная		
Курс		2	3
Семестр		4	5
Число зачетных единиц	9	3	3
Всего часов по учебному плану, час.	324	108	108
Всего часов аудиторных занятий, час.	24	8	16
Лекции, час	10	4	6
Лабораторные занятия, час.	10		10
Практические занятия, час.		4	
Контрольная работа (семестр)	4	4	
Курсовая работа	5		5
Экзамен (семестр)			5
Зачет (семестр)		4	

Разработал доцент

Харькин О.С.

e-mail: app@vstu.ru

Зав. кафедрой АПП

Сердобинцев Ю.П.

Волгоград 2013

## 1 Аннотация дисциплины

Целью изучения дисциплины является ознакомление с основными методами анализа и синтеза систем автоматического управления, что необходимо для разработки и эксплуатации автоматических систем управления.

Учебная дисциплина ТАУ базируется на соответствующих разделах высшей математики, физики, теоретической механики, электротехники, электроники, которые формируют математический аппарат и понимание принципов построения элементов автоматических систем.

Основные положения дисциплины используются при изучении следующих дисциплин: «Технические средства автоматизации», «Проектирование автоматизированных систем», «Автоматизированный электропривод», а также в курсовом проектировании и при выполнении выпускной квалификационной работы.

## 2 Содержание учебной дисциплины «Теория автоматического управления»

Таблица 2.1

№ темы	Название основных тем и вопросов, изучаемых в рамках дисциплины	Кол-во часов, отводимых на лекции
1	2	3
	<i>Семестр 4</i>	
1	Введение. Понятие динамической системы, содержание задач управления. Основные принципы управления. Классификация автоматических систем.	С
2	Линейные непрерывные модели и характеристики систем. Дифференциальные уравнения, передаточные функции, алгоритмические структуры систем. Типовые внешние воздействия. Временные (переходная и весовая) характеристики. Частотные характеристики (АФХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ). Типовые звенья линейных САУ, их характеристики.	1
3	Эквивалентные преобразования алгоритмических схем. Частотные характеристики разомкнутых систем. Замкнутые САУ. Передаточные функции и характеристические уравнения систем по задающему и возмущающему воздействиям, относительно ошибки. Частотные характеристики замкнутых систем.	1
4	Устойчивость линейных САУ. Понятие устойчивости. Условия устойчивости. Алгебраические критерии устойчивости Гурвица и Рауса. Частотные критерии Михайлова и Найквиста. Анализ устойчивости по логарифмическим характеристикам.	1
5	Качество процессов регулирования. Показатели качества. Косвенные оценки качества (корневые, частотные, интегральные).	С
6	Точность САУ. Точность систем при типовых воздействиях. Коэффициенты ошибок.	С
7	Пространство состояний системы. Переменные состояния и уравнения состояния системы. Структурные представления систем, описываемых в пространстве состояний.	1
	<i>Семестр 5</i>	
8	Стабилизация, повышение качества и синтез линейных САУ. Корректирующие устройства, способы включения, виды. Методы синтеза корректирующих устройств. Системы с запаздыванием.	1

1	2	3
9	Классификация автоматических регуляторов. Основные законы регулирования. Инженерные методы расчета оптимальных параметров настроек регуляторов.	1
10	Нелинейные САУ. Структура нелинейных систем, типовые нелинейности. Методы исследования нелинейных систем (фазовых траекторий, приспособывания, гармонической линеаризации). Устойчивость нелинейных систем, второй метод Ляпунова.	1
11	Дискретные системы автоматического управления. Основные понятия, классификация систем. Методы описания дискретных систем. Дискретное преобразование Лапласа. Z - преобразование. Анализ дискретных систем. Цифровые системы управления.	1
12	Оптимальные системы управления. Общие положения, постановка задачи, классификация. Принцип максимума. Метод динамического программирования.	1
13	Адаптивные автоматические системы. Классификация. Самонастраивающиеся системы.	1
	Итого	10

### 3 Лабораторные и практические занятия

#### 3.1 Лабораторные работы

Таблица 3.1

Номер лаб. работы	Наименование лабораторной работы	Объем, час.
1	Исследование временных характеристик линейных динамических звеньев	2
2	Исследование частотных характеристик линейных динамических звеньев	2
3	Исследование статических и динамических свойств систем автоматического управления	4
4	Исследование способов коррекции систем автоматического управления	4
5	Исследование методов настройки регуляторов одноконтурной системы автоматического управления	4
	Итого	10

#### 3.2 Практические занятия

Таблица 3.2

Номер Занятия	Тема практического занятия	Объем, час.
1	Функциональные схемы систем автоматического управления	1
2	Эквивалентные преобразования алгоритмических схем САУ	1
3	Частотные характеристики динамических звеньев и систем	1
4	Анализ устойчивости линейных САУ	1
	Итого	4

## 4 Самостоятельная работа студентов

В течение четвертого семестра студенты выполняют контрольную работу "Анализ линейных систем автоматического управления". Работа выполняется в соответствии с методическими указаниями по самостоятельной работе.

В пятом семестре студенты выполняют курсовую работу. Курсовая работа предусматривает анализ системы автоматического управления и синтез корректирующих устройств. Работа выполняется в соответствии с методическими указаниями по выполнению курсовой работы.

### 4.1 Контрольная работа

#### 4.1.1 Цель работы

Целью контрольной работы является закрепление знаний, полученных в результате изучения теоретического материала, приобретение практических навыков расчета систем автоматического управления.

**Варианты заданий контрольной работы (20 вариантов заданий) выбираются по таблицам 4.1 и 4.2 по двум последним цифрам зачетной книжки (например, вариант 02 при последних цифрах 02, 22, 42, 62, 82, вариант 12 при цифрах 12, 32, 52, 72, 92) и т. д.**

#### 4.1.2 Содержание заданий

##### Задание 1

На рисунке 4.1 приведена структура САУ, состоящая из объекта регулирования 1, исполнительного устройства 2, усилителя - регулятора 3, измерительного преобразователя 4 и элемента сравнения. Дифференциальные уравнения элементов приведены в таблице 4.1

##### Требуется:

1. Определить передаточные функции элементов и указать каким типовым динамическим звеном или соединением типовых звеньев представлен каждый из них.
2. Записать передаточные функции и характеристические уравнения разомкнутой и замкнутой систем.
3. Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы и пользуясь логарифмическим критерием устойчивости, определить устойчивость системы в замкнутом состоянии. Определить запасы устойчивости системы по фазе и амплитуде.

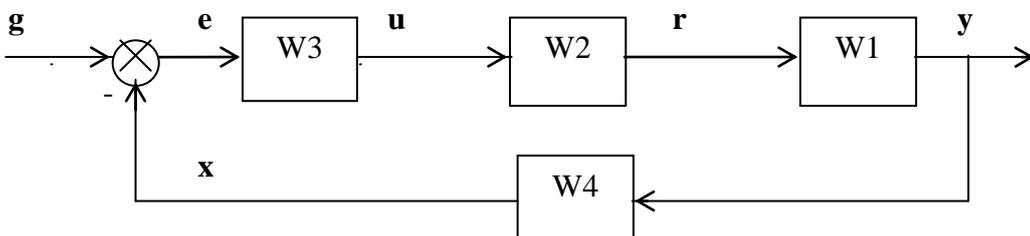


Рисунок 4.1 - Алгоритмическая схема САУ

**Задание 2**

Дифференциальные уравнения (таблица 4.2), описывающие систему представить в виде блок-схемы в соответствии с рисунком 4.2 (предпоследняя цифра зачетной книжки - четная) или рисунком 4.3 (предпоследняя цифра зачетной книжки - нечетная). Рассчитать коэффициенты блок-схемы и записать дифференциальные уравнения в матричной форме в виде системы уравнений состояния.

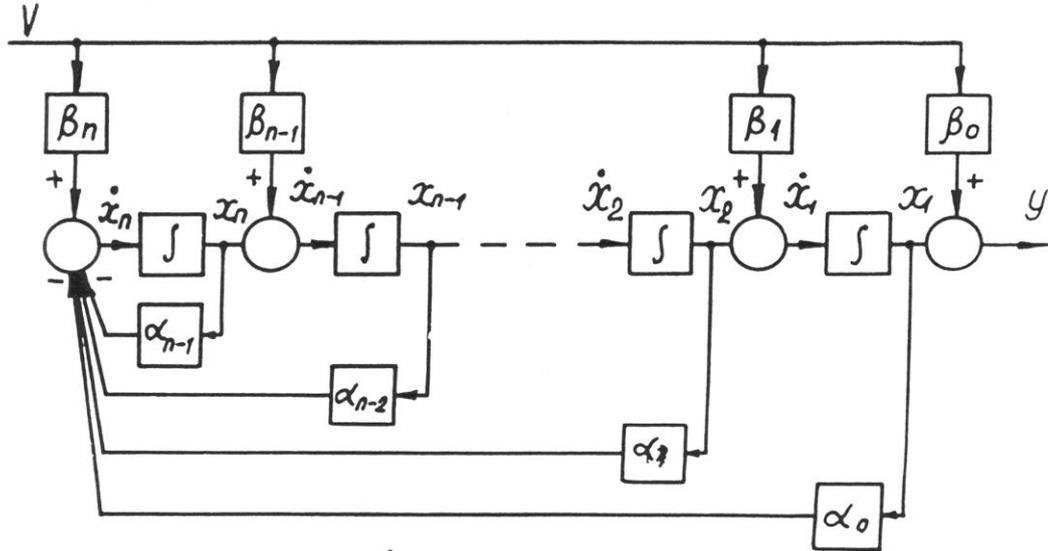


Рисунок 4.2

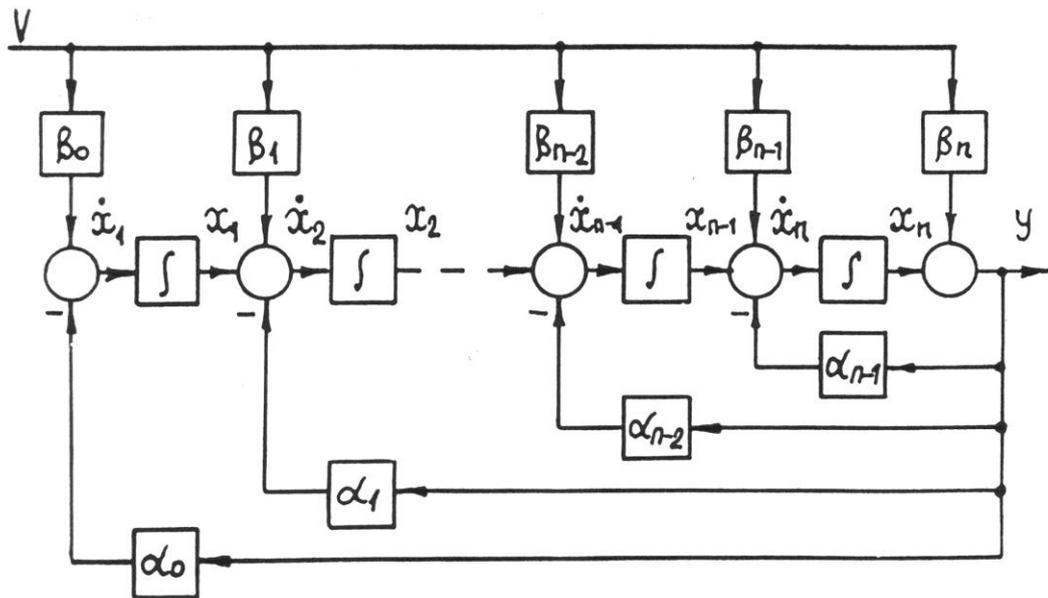


Рисунок 4.3

## Варианты задания 1

Таблица 4.1

Вариант	Звено	Дифференциальное уравнение
1	W1	$0,1dy/dt + y = 5r$
	W2	$0,05dr/dt + r = 2(0,02du/dt + u)$
	W3	$0,01d^2u/dt^2 + du/dt = 50e$
	W4	$x = 0,02y$
2	W1	$0,04d^2y/dt^2 + 0,4dy/dt + y = 4r$
	W2	$0,1dr/dt + r = 2u$
	W3	$du/dt = 25(0,05de/dt + e)$
	W4	$x = 0,1y$
3	W1	$0,2d^2y/dt^2 + dy/dt = 2r$
	W2	$0,1dr/dt + r = 5u$
	W3	$0,1du/dt + u = 40(0,05de/dt + e)$
	W4	$x = 0,025y$
4	W1	$0,25dy/dt + y = 2,5r$
	W2	$0,1d^2r/dt^2 + dr/dt = 8u$
	W3	$u = 5(0,05de/dt + e)$
	W4	$0,01dx/dt + x = 0,2y$
5	W1	$0,16d^2y/dt^2 + 0,32dy/dt + y = 8r$
	W2	$0,1d^2r/dt^2 + dr/dt = u$
	W3	$0,25du/dt + u = 4e$
	W4	$x = 0,1y$
6	W1	$0,5d^2y/dt^2 + dy/dt = 10r$
	W2	$0,2dr/dt^2 + r = 2,5(0,1du/dt + u)$
	W3	$0,05du/dt + u = 20e$
	W4	$x = 0,04y$
7	W1	$0,2dy/dt + y = 2r$
	W2	$0,1dr/dt + r = 2,5(0,05du/dt + u)$
	W3	$0,02d^2u/dt^2 + du/dt = 20e$
	W4	$x = 0,25y$
8	W1	$0,25d^2y/dt^2 + 0,8dy/dt + y = 2,5r$
	W2	$0,2dr/dt + r = 4(0,1du/dt + u)$
	W3	$0,05du/dt + u = 50e$
	W4	$x = 0,2y$
9	W1	$0,25d^2y/dt^2 + dy/dt = 8r$
	W2	$0,2dr/dt + r = 0,5u$
	W3	$0,1du/dt + u = 50(0,05de/dt + e)$
	W4	$x = 0,5y$
10	W1	$0,25d^2y/dt^2 + 0,8dy/dt + y = 5r$
	W2	$0,2dr/dt + r = 2u$
	W3	$0,25d^2u/dt^2 + du/dt = 4e$
	W4	$x = 0,4y$

Продолжение таблицы 4.1

Вариант	Звено	Дифференциальное уравнение
11	W1	$0,16d^2y / dt^2 + 0,64dy / dt + y = 2,5r$
	W2	$dr / dt = 20(0,1du / dt + u)$
	W3	$0,05du / dt + u = e$
	W4	$x=0,2y$
12	W1	$0,25d^2y / dt^2 + 0,8dy / dt + y = 4r$
	W2	$0,2dr / dt + r = 5u$
	W3	$du / dt = 20(0,1de / dt + e)$
	W4	$x=0,025y$
13	W1	$0,0025d^2y / dt^2 + 0,08dy / dt + y = 2r$
	W2	$dr / dt = 10(0,04du / dt + u)$
	W3	$0,4du / dt + u = 2e$
	W4	$x=0,25y$
14	W1	$0,0004d^2y / dt^2 + 0,02dy / dt + y = 5r$
	W2	$0,5dr / dt + r = 4u$
	W3	$du / dt = 10(0,05de / dt + e)$
	W4	$x=0,1y$
15	W1	$0,64d^2y / dt^2 + 0,8dy / dt + y = 2r$
	W2	$0,05dr / dt + r = 5(0,2du / dt + u)$
	W3	$0,1du / dt + u = 40e$
	W4	$x=0,025y$
16	W1	$0,16d^2y / dt^2 + 0,64dy / dt + y = 2,5r$
	W2	$0,1dr / dt + r = 20u$
	W3	$0,2du / dt + u = 5(0,5de / dt + e)$
	W4	$x=0,08y$
17	W1	$0,01dy / dt + y = 2r$
	W2	$0,2dr / dt + r = 5(0,1du / dt + u)$
	W3	$0,5d^2u / dt^2 + du / dt = 10e$
	W4	$x = 0,2y$
18	W1	$0,01d^2y / dt^2 + 0,4dy / dt + y = 2r$
	W2	$0,05dr / dt + r = 4u$
	W3	$du / dt = 20(0,5de / dt + e)$
	W4	$x = 0,5y$
19	W1	$0,1d^2y / dt^2 + dy / dt = 5r$
	W2	$0,2dr / dt + r = 4u$
	W3	$0,05du / dt + u = 0,01de / dt + e$
	W4	$x = 0,8y$
20	W1	$0,2dy / dt + y = 2r$
	W2	$0,01d^2r / dt^2 + dr / dt = 5u$
	W3	$0,1du / dt + u = 2(de / dt + e)$
	W4	$x = 0,4y$

## Варианты задания 2

Таблица 4.2

Вариант	Дифференциальное уравнение
1	$d^3y/dt^3 + d^2y/dt^2 + 2dy/dt + 3y = 4d^3v/dt^3 + 3d^2v/dt^2 + 3dv/dt + v$
2	$d^3y/dt^3 + 2d^2y/dt^2 + 3dy/dt + 4y = 5d^3v/dt^3 + 4d^2v/dt^2 + 2v$
3	$d^3y/dt^3 + 3d^2y/dt^2 + 4dy/dt + 5y = 6d^3v/dt^3 + 4dv/dt + 3v$
4	$d^3y/dt^3 + 4d^2y/dt^2 + 5dy/dt + 6y = 6d^2v/dt^2 + 5dv/dt + 3v$
5	$d^3y/dt^3 + 5d^2y/dt^2 + 6dy/dt + 7y = 8d^3v/dt^3 + 7d^2v/dt^2 + 6dv/dt + 5v$
6	$d^3y/dt^3 + 6d^2y/dt^2 + 7dy/dt + 8y = 9d^3v/dt^3 + 8d^2v/dt^2 + 7dv/dt + 6v$
7	$d^3y/dt^3 + 7d^2y/dt^2 + 8dy/dt + 9y = d^3v/dt^3 + 2d^2v/dt^2 + 4v$
8	$d^3y/dt^3 + 3d^2y/dt^2 + 2dy/dt + y = 2d^3v/dt^3 + 3d^2v/dt^2 + 4dv/dt + 5v$
9	$d^3y/dt^3 + 4d^2y/dt^2 + 3dy/dt + 2y = 3d^3v/dt^3 + 5dv/dt + 6v$
10	$d^3y/dt^3 + 5d^2y/dt^2 + 4dy/dt + 3y = 4d^3v/dt^3 + 5d^2v/dt^2 + 6dv/dt + 7v$
11	$d^3y/dt^3 + 6d^2y/dt^2 + 5dy/dt + 4y = 5d^3v/dt^3 + 6d^2v/dt^2 + 8v$
12	$d^3y/dt^3 + 7d^2y/dt^2 + 6dy/dt + 5y = 6d^3v/dt^3 + 8dv/dt + 9v$
13	$d^3y/dt^3 + 8d^2y/dt^2 + 7dy/dt + 6y = 2d^2v/dt^2 + 4dv/dt + 6v$
14	$d^3y/dt^3 + 9d^2y/dt^2 + 8dy/dt + 7y = 2d^3v/dt^3 + 4d^2v/dt^2 + 6dv/dt + 8v$
15	$d^3y/dt^3 + 2d^2y/dt^2 + 4dy/dt + 6y = d^3v/dt^3 + 3d^2v/dt^2 + 5dv/dt + 7v$
16	$d^3y/dt^3 + d^2y/dt^2 + 3dy/dt + 5y = 3d^3v/dt^3 + 5d^2v/dt^2 + 7dv/dt + 9v$
17	$d^3y/dt^3 + 4d^2y/dt^2 + 6dy/dt + 8y = 2d^3v/dt^3 + 4d^2v/dt^2 + 6v$
18	$d^3y/dt^3 + 3d^2y/dt^2 + 5dy/dt + 7y = 3d^3v/dt^3 + 9d^2v/dt^2 + 7dv/dt + 5v$
19	$d^3y/dt^3 + 8d^2y/dt^2 + 6dy/dt + 4y = 3d^3v/dt^3 + 9dv/dt + 7v$
20	$d^3y/dt^3 + 9d^2y/dt^2 + 7dy/dt + 5y = 5d^3v/dt^3 + 6d^2v/dt^2 + 8dv/dt + 4v$

### 4.1.3 Методические указания

#### Задание 1

Передаточные функции звеньев системы находятся из уравнений элементов системы как отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях

$$W(p) = X_{\text{вых}}(p) / X_{\text{вх}}(p). \quad (1.1)$$

Формально переход от дифференциальных уравнений к операторной форме записи осуществляется заменой оператора дифференцирования  $d/dt$  на  $p$  а самих переменных их изображениями.

Например, если  $x(t)$  и  $y(t)$  - соответственно входная и выходная величины звена и его дифференциальное уравнение имеет вид  $Tdy/dt + y = kx$ , то, производя замену  $d/dt = p$ ,  $x(t) \rightarrow X(p)$ ,  $y(t) \rightarrow Y(p)$ , получим уравнение в операторной форме

$$(Tp + 1)Y(p) = kX(p) \quad (1.2)$$

Передаточная функция звена будет иметь следующий вид:  $W(p) = k / (Tp + 1)$

Передаточную функцию любой линейной системы можно преобразовать к такому виду, чтобы многочлен в скобках имел степень не выше второй, а его свободный член был равен единице. Такая запись позволяет представить системы в виде последовательного соединения нескольких типовых динамических звеньев. К типовым динамическим звеньям относятся: усилительное, инерционное, интегрирующее, дифференцирующее, форсирующее, колебательное.

При анализе линейных автоматических систем находят применение частотные характеристики и, в частности, логарифмические амплитудные (ЛАЧХ) и фазовые (ЛФЧХ) характеристики.

При построении логарифмических частотных характеристик по оси абсцисс откладывают частоту в логарифмическом масштабе, при этом на отметках, соответствующих значению  $\lg \omega$  указывают само значение  $\omega$ . Интервал изменения частоты в 10 раз называется декадой.

По оси ординат ЛАЧХ откладывают логарифмическую амплитуду  $L(\omega) = 20 \lg W(\omega)$  в децибеллах.

ЛФЧХ строится также в логарифмическом масштабе частот по оси абсцисс и в натуральном масштабе (градусы или радианы) для фазы по оси ординат.

При исследовании и проектировании автоматических систем используют логарифмические характеристики разомкнутых систем, передаточные функции которых можно представить в виде произведения передаточных функций типовых динамических звеньев. Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ системы необходимо построить и просуммировать характеристики входящих в систему типовых звеньев. При построении ЛАЧХ системы рассматривают асимптотические ЛАЧХ типовых звеньев.

Результирующие ЛФЧХ рекомендуется строить под ЛАЧХ с тем, чтобы изменение фазы можно было сопоставить с изменением амплитуды. В этом случае удобно применять логарифмический критерий устойчивости, а также определять запасы устойчивости системы по фазе и амплитуде.

Условием устойчивости является пересечение ЛАЧХ оси абсцисс ранее, чем ЛФЧХ пересекает линию фазового сдвига -  $180^\circ$ .

## Задание 2

В качестве первичной математической модели можно принять систему уравнений следующего вида:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \sum_{k=1}^m b_{ik} v_k, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

$$y_i = \sum_{i=1}^n c_{ii} x_i, \quad i = 1, \dots, s,$$

называемую *описанием в нормальной форме* или *описанием в пространстве состояний*.

В модели (2.1) имеется  $n$  взаимосвязанных дифференциальных уравнений 1-го порядка, в правую часть которых входят  $m$  различных внешних воздействий  $V_k$ , а также  $s$  алгебраических соотношений, связывающих  $s$  выходных (управляемых) процессов  $Y_i$  с переменными состояниями  $X_i$ , число которых ( $n$ ) совпадает с числом уравнений.

С точки зрения математики подход, основанный на понятии переменных состояния, представляет собой использование методов матричного исчисления и векторного анализа для операций с большим числом переменных, входящих в исследуемые задачи.

При анализе и синтезе систем представляется целесообразным разделить все переменные, характеризующие систему на три группы:

1) входные переменные или входные воздействия  $v_i$ ; представляющие сигналы, генерируемые системами, внешними по отношению к исследуемой;

2) выходные переменные или переменные, характеризующие реакцию системы  $y_i$ , позволяющие описать некоторые аспекты поведения системы;

3) переменные (координаты) состояния или промежуточные переменные  $x_k$ , характеризующие динамическое поведение исследуемой системы.

Для удобства оперирования с многомерными величинами представим: совокупность входных переменных - в виде *вектора входа*  $\mathbf{v}$ ; совокупность выходных переменных - в виде *вектора выхода*  $\mathbf{y}$ ; и совокупность переменных состояния - в виде *вектора состояния*  $\mathbf{x}$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}.$$

Согласно понятию векторного пространства, множество всех значений, которые может принять вектор входа  $\mathbf{v}$  в момент  $t$ , образует *пространство входа* системы. Аналогично, множество всех значений, которые может принять вектор выхода  $\mathbf{y}$  в момент  $t$ , образует *пространство выхода* системы, и множество всех значений, которые может принять вектор состояния  $\mathbf{x}$  в момент  $t$ , образует *пространство состояний* системы.

В любой момент времени  $t$  состояние системы является функцией начального состояния  $\mathbf{x}(t_0)$  и вектора входа  $\mathbf{v}(t_0, t)$ , т.е.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t_0); \mathbf{v}(t_0, t)]. \quad (2.2)$$

Вектор выхода также является однозначной функцией такого же аргумента и может быть записан как

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}[\mathbf{x}(t_0); \mathbf{v}(t_0, t)]. \quad (2.3)$$

Здесь  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{g}$  однозначные функции своих аргументов.

Указанные уравнения называют уравнениями состояния системы.

Если система описывается линейными дифференциальными уравнениями, то уравнения состояния сводятся к следующим:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{v}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{v}(t), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $A(t)$  - матрица коэффициентов;  $B(t)$  - матрица управления;  
 $C(t)$  - матрица выхода;  $D(t)$  - матрица обхода системы.

В общем виде блок - схема, соответствующая этим уравнениям, представлена на рисунке 4.4. В случае системы с постоянными коэффициентами матрицы постоянные и могут записываться просто как  $A, B, C, D$ .

Математические уравнения, описывающие систему, удобно представлять в виде блок - схемы, подобной, вычерчиваемой для моделирования на аналоговых вычислительных устройствах. Такая схема состоит из блоков, внутри которых указывается функция, моделируемая блоком. Чаще всего в качестве основных элементов используются идеальные интегрирующие звенья, усилительные и суммирующие звенья. Используемый при построении блок - схемы линейного дифференциального уравнения метод состоит в последовательном интегрировании наивысших производных уравнения, получении всех производных низшего порядка и зависимых переменных. Производные умножаются на соответствующие коэффициенты, и эти члены суммируются, образуя «замкнутую цепь». Обозначения названных выше блоков представлены на рисунке 4.5.

В качестве примера изобразим блок-схему системы, описываемой дифференциальным уравнением

$$y'' + ay' + by = v,$$

где  $v$  - входная, а  $y$  - выходная величины.

Разрешая уравнение относительно старшей производной  $y''$ , имеем

$$y'' = v - ay' - by.$$

Интегрируя  $y''$  дважды, получим в соответствии с рисунком 4.6  $y'$  и  $y$ . Замкнутый контур образуется из условия удовлетворения дифференциальному уравнению.

Удобно в качестве переменных состояния выбрать выходы интеграторов, т.е.  $y$  и  $y'$ .

Пусть  $x_1 = y$ ,  $x_2 = y'$ , откуда

$$x_1' = x_2, \quad x_2' = -bx_1 - ax_2 + v.$$

Данная система уравнений в векторной форме имеет вид

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b & -a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot v,$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \cdot v.$$

Следовательно,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b & -a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}.$$

Во втором примере требуется начертить блок-схему системы, описываемой дифференциальным уравнением  $y'' + ay' + by = v' + v$ .

Изменение по сравнению с предыдущей блок - схемой состоит в добавлении звена, соответствующего члену  $v'$ . Однако блок, реализующий дифференцирование, как правило, не используется. Чтобы исключить из схемы дифференцирующее звено, предположим, что вход первого интегратора равен  $y'' - v'$ . Поэтому

$$y'' - v' = v - ay' - by$$

Это уравнение моделируется, как показано на рисунке 4.7. Выход первого интегратора равен  $y' - v$ . Суммируя с  $v$ , получим  $y'$ . Окончательно схема строится, как и в предыдущем примере.

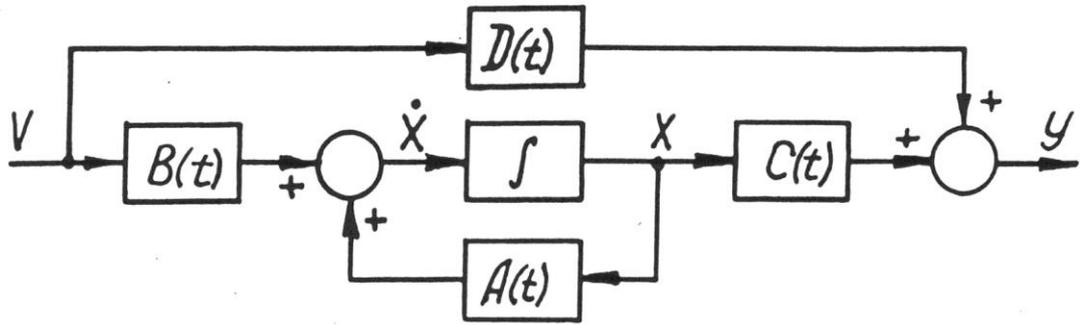


Рисунок 4.4

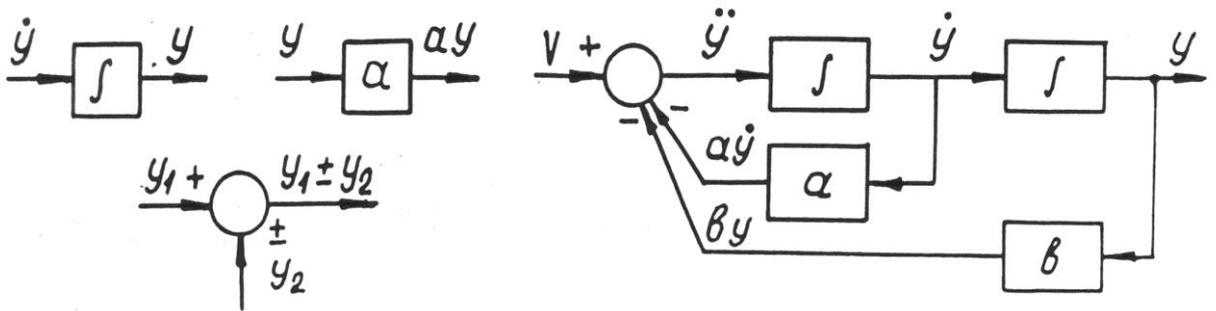


Рисунок 4.5

Рисунок 4.6

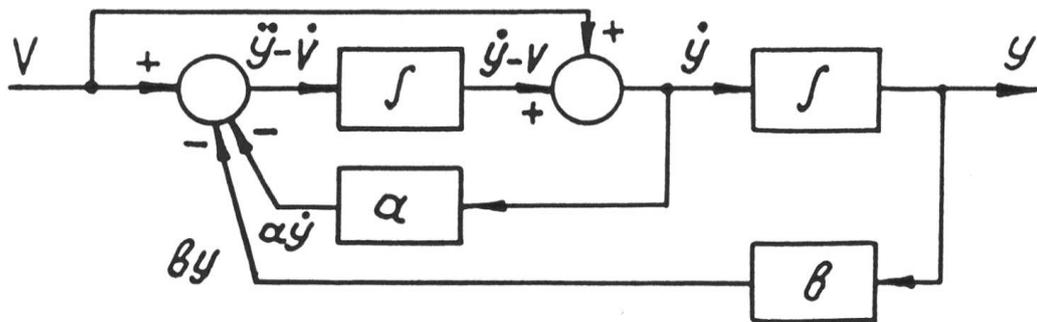


Рисунок 4.7

## 4.2 Курсовая работа

Целью курсовой работы является приобретение навыков анализа замкнутых линейных систем автоматического управления (САУ) и синтеза корректирующих устройств, удовлетворяющих заданному качеству работы.

Курсовая работа выполняется в соответствии с индивидуальным заданием, выданным студенту руководителем проектирования. В задании предусматривается проектирование системы управления конкретным объектом управления.

**Варианты задания курсовой работы выбираются по двум последним цифрам зачетной книжки. По последней цифре выбирается номер схемы, по предпоследней цифре числовые значения для расчета в соответствующей таблице варианта задания.**

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки и графической части и в общем случае включает следующие разделы:

Исходные данные. Требования к САУ

Введение

1 Функциональная схема САУ

2 Алгоритмическая схема САУ

3 Анализ устойчивости исходной САУ

4 Синтез корректирующих устройств САУ

5 Анализ характеристик скорректированной системы

Заключение

Список использованной литературы

Пояснительная записка оформляется на белой бумаге формата А4 (210x297), должна начинаться с титульного листа. Далее следует бланк задания и содержание. Основное содержание работы приводится в последовательности, приведенной выше.

Все расчеты следует выполнять в международной системе единиц (СИ). В случае необходимости в пояснительной записке приводятся рисунки и чертежи, поясняющие ход расчетов. При оформлении пояснительной записки следует руководствоваться ГОСТ 2.105 – 95 «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам»

Графическая часть курсовой работы должна выполняться в объеме, достаточном для пояснения всех разделов пояснительной записки, и включает следующие основные разделы:

принципиальные, функциональные и алгоритмические схемы;

логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики;

построения, поясняющие исследование устойчивости САУ и синтеза корректирующих устройств;

графики переходных процессов.

Графическая часть оформляется на листах чертежной бумаги стандартного формата (в случае необходимости на миллиметровой бумаге). При выполнении и оформлении схем следует руководствоваться стандартами седьмой классификационной группы ЕСКД.

При выполнении курсовой работы следует руководствоваться методическими указаниями по выполнению курсовой работы

## **5 Основная и дополнительная литература**

### ***Основная***

- 1 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 312 с.
- 2 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 441 с.
- 3 Теория автоматического управления: Учеб. для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2003. – 567 с.
- 4 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – изд. 4-е перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
- 5 Савин М.М. Теория автоматического управления: учеб. пособие / М.М. Савин, В.С. Елсуков, О.Н. Пятина; под ред. В.И. Лачина. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 469 с.

### ***Дополнительная***

- 6 Петраков Ю.В., Драчев О.И. Теория автоматического управления технологическими системами: учебное пособие для студентов вузов. - М.: Машиностроение, 2008. - 336 с.
- 7 Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал).- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
- 8 Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высш. шк., 2004. - 365 с.

### **Перечень методических указаний**

- 1 Основы теории линейных систем автоматического управления: Учеб. пособие. / Ю.П. Сердобинцев, В.Г. Барабанов; ВолГТУ. – Волгоград, 2007. – 164 с.
- 2 Исследование временных характеристик линейных динамических звеньев: метод. указ. к лаб. работе / сост. Харькин О.С., 2005.
- 3 Исследование частотных характеристик линейных динамических звеньев: метод. указ. к лаб. работе / сост. Харькин О.С., 2005.
- 4 Исследование статических и динамических свойств систем автоматического управления метод: указ. к лаб. работе / сост. Харькин О.С., 2006.
- 5 Исследование способов коррекции систем автоматического управления: метод. указ. к лаб. работе / сост. Харькин О.С., 2005.
- 6 Исследование методов настройки регуляторов одноконтурной САУ: метод. указ. к лаб. работе / сост. О.С. Харькин / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – 16с.

### **Другие учебно-методические материалы**

- 1 Система автоматизированного моделирования и параметрической оптимизации (СИАМ). Пакет программ. М.: Учебно-инженерный центр МВТУ-ФЕСТО ДИДАКТИК.
- 2 ТАУ 2. Комплекс программ для компьютерного обеспечения учебного процесса по дисциплине ТАУ. Математика и кибернетика на ПК для студентов и учащихся. М.: ГАНГ им. И.М. Губкина.
- 3 ПК "МВТУ, версия 3,7". Программный комплекс "Моделирование в технических устройствах". М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

## **6 Вопросы к экзамену по дисциплине "Теория автоматического управления"**

1 Теория управления. Основные понятия и определения. Задачи теории автоматического управления.

2 Основные принципы регулирования. Регулирование по разомкнутому циклу. Регулирование по возмущению. Регулирование по отклонению (по ошибке). Обратная связь.

3 Типовая функциональная схема САУ. Назначение и характеристика функциональных элементов.

4 Классификация САУ. Системы прямого и непрямого регулирования. Одноконтурные и многоконтурные, одномерные и многомерные, непрерывные и дискретные, линейные и нелинейные системы. Стабилизирующие, программные, следящие САУ.

5 Статическое и астатическое регулирование. Передаточные функции и основные характеристики статических и астатических систем.

6 Математическое описание элементов и систем автоматического управления. Дифференциальные уравнения звеньев и систем. Линеаризация нелинейных зависимостей.

7 Преобразование Лапласа в применении к теории автоматического управления. Понятие передаточной функции системы.

8 Типовые внешние воздействия. Временные характеристики звеньев и систем. Частотные характеристики. Основные понятия и определения, виды характеристик.

9 Алгоритмические (структурные) схемы САУ. Передаточные функции типовых соединений звеньев. Эквивалентные преобразования алгоритмических схем.

10 Передаточная функция разомкнутой САУ. Передаточная функция замкнутой САУ относительно задающего, возмущающего воздействий и ошибки регулирования. Характеристические уравнения систем.

11 Типовые динамические звенья и их характеристики (безынерционное, инерционное, интегрирующее, дифференцирующее, колебательное, форсирующее). Реальные интегрирующие и дифференцирующие звенья. Интегро -дифференцирующие, издромные звенья.

12 Понятие пространства состояний. Метод пространства состояний в теории линейных систем.

13 Основные законы регулирования. Типовые передаточные функции автоматических регуляторов.

14 Получение и построение частотных характеристик. Построение АФХ разомкнутой системы. Связь между частотными характеристиками разомкнутой и замкнутой систем. Построение логарифмических частотных характеристик разомкнутой САУ.

15 Устойчивость линейных систем автоматического регулирования. Необходимое и достаточное условия устойчивости.

16 Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.

17 Частотный критерий устойчивости Михайлова.

18 Критерий устойчивости Найквиста. Особенности применения для астатических систем.

19 Логарифмический критерий устойчивости. Оценка запаса устойчивости по фазе и амплитуде.

20 Точность систем автоматического регулирования. Установившаяся ошибка при различных типовых воздействиях. Коэффициенты ошибок.

21 Качество процессов регулирования. Основные показатели качества. Косвенные (корневые, частотные, интегральные) оценки качества.

22 Пути повышения точности систем автоматического регулирования.

23 Обеспечение устойчивости, увеличение запасов устойчивости линейных систем автоматического регулирования.

24 Синтез линейных систем автоматического регулирования. Последовательные, параллельные корректирующие устройства, корректирующие обратные связи (жесткие и гибкие).

25 Частотные методы синтеза корректирующих устройств. Синтез желаемой ЛАЧХ. Синтез последовательных и встречно -параллельных корректирующих устройств.

26 Реализация корректирующих устройств. Пассивные и активные четырехполюсники постоянного тока, дифференцирующий трансформатор, тахогенератор постоянного тока.

27 Системы автоматического управления с запаздыванием. Запаздывающее звено и его характеристики. Особенности оценки устойчивости систем с запаздыванием.

28 Нелинейные системы. Типовые нелинейности, методы исследования нелинейных систем.

29 Дискретные САУ. Их особенности, классификация.

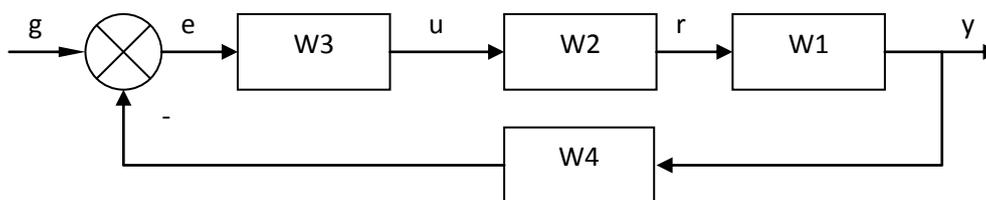
30 Оптимальные системы. Классификация, методы анализа.

## Приложение А

### Пример выполнения задания 1 контрольной работы

На рисунке приведена структура САР, состоящая из объекта регулирования 1, исполнительного механизма 2, усилителя 3, измерительного преобразователя 4 и элемента сравнения. Дифференциальные уравнения элементов системы приведены в таблице.

W1	$0,0004d^2 y / dt^2 + 0,02dy / dt + y = 5r$
W2	$0,5dr / dt + r = 4u$
W3	$du/dt = 10(0,05de / dt + e)$
W4	$x = 0,1y$



Требуется:

- 1 Определить передаточные функции элементов и указать каким типовым динамическим звеном или соединением типовых звеньев представлен каждый из них.
- 2 Записать передаточные функции и характеристические уравнения разомкнутой и замкнутой систем.
- 3 Построить логарифмические (асимптотическую амплитудную и фазовую частотную) характеристики разомкнутой системы и, пользуясь логарифмическим критерием устойчивости, определить устойчивость системы в замкнутом состоянии. Определить запасы устойчивости системы по фазе и амплитуде.

Решение

Передаточные функции звеньев системы находятся как отношение изображения по Лапласу выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях

$$W(p) = X_{\text{вых}}(p)/X_{\text{вх}}(p)$$

Произведя замену в дифференциальных уравнениях  $d/dt$  на  $p$ ,  $y(t)$  на  $Y(p)$ ,  $r(t)$  на  $R(p)$ ,  $u(t)$  на  $U(p)$ ,  $e(t)$  на  $E(p)$  и  $x(t)$  на  $X(p)$ , получим уравнения в операторной форме

для 1 звена:

$$(0,0004p^2 + 0,02p + 1)Y(p) = 5R(p)$$

$$W_1(p) = \frac{5}{(0,0004p^2 + 0,02p + 1)} = \frac{5}{(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)}$$

Это колебательное звено с  $T = 0,02$  и  $\xi = 0,5$ .

для 2 звена:

$$(0,5p + 1)R(p) = 4U(p)$$

$$W_2(p) = \frac{4}{(0,5p + 1)} \quad \text{это апериодическое звено}$$

для 3 звена:

$$pU(p) = 10(0,05p + 1)E(p)$$

$$W_3(p) = \frac{10(0,05p + 1)}{p} \quad \text{это изодромное звено.}$$

для 4 звена:

$$X(p) = 0,1Y(p)$$

$$W_4(p) = 0,1 \quad \text{безинерционное (усилительное) звено}$$

Передаточная функция разомкнутой цепи равна произведению передаточной функции прямой ветви и передаточной функции обратной связи. Тогда

$$\begin{aligned} W(p) &= W_1(p)W_2(p)W_3(p)W_4(p) = \frac{5}{(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)} \cdot \frac{4}{0,5p + 1} \cdot \frac{10(0,05p + 1)}{p} \cdot 0,1 = \\ &= \frac{20(0,05p + 1)}{p(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)(0,5p + 1)} = \frac{20}{p} \cdot \frac{1}{(0,5p + 1)} \cdot (0,05p + 1) \cdot \frac{1}{(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)} \end{aligned}$$

Характеристическое уравнение разомкнутой системы будет

$$p(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)(0,5p + 1) = 0$$

$$0,0002p^4 + 0,0104p^3 + 0,52p^2 + p = 0$$

Передаточная функция замкнутой цепи с отрицательной обратной связью равна передаточной функции прямой цепи, деленной на единицу плюс передаточная функция разомкнутой цепи

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)}{1 + W(p)} = \frac{200(0,05p + 1)}{p(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)(0,5p + 1) + 20(0,05p + 1)} = \\ &= \frac{200(0,05p + 1)}{p(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)(0,5p + 1) + 20(0,05p + 1)} \end{aligned}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы будет

$$p(0,02^2 p^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,02p + 1)(0,5p + 1) + 20(0,05p + 1) = 0$$

$$0,0002p^4 + 0,0104p^3 + 0,52p^2 + 2p + 20 = 0$$

Построим логарифмические амплитудную и частотную характеристики разомкнутой системы. При  $\omega = 1$  вычисляем ординату  $20 \lg K = 20 \lg 20 = 26$  дБ. Сопрягающие частоты  $w_1 = 1/0,5 = 2 \text{ с}^{-1}$ ;  $w_2 = 1/0,05 = 20 \text{ с}^{-1}$ ;  $w_3 = 1/0,02 = 50 \text{ с}^{-1}$ . ЛАЧХ неизменяемой части состоит из четырех асимптот.

Фазовую характеристику определим по формуле

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctg 0,5\omega + \arctg 0,05\omega - 2\arctg 0,02\omega$$

$\omega, \text{ с}^{-1}$	1	2	4	5	10	20	40	50	100
$\varphi(\omega), \text{ град}$	-116	-133,9	-151,3	-155,6	-164,7	-172,9	-191	-199,5	-227

ЛАЧХ пересекает линию 0 дБ на частоте  $w_c = 6,3 \text{ с}^{-1}$ , т.е. на более низкой частоте, чем фазовая характеристика пересекает линию  $-180^\circ$  на частоте  $28 \text{ с}^{-1}$ .

Следовательно, замкнутая система устойчива.

Запас устойчивости по амплитуде 23 дБ, по фазе -  $\varphi = 21^\circ$

## Приложение Б

### Пример выполнения задания 2 контрольной работы

Рассмотрим общий случай линейной системы с постоянными коэффициентами, одним входом и выходом, описываемой уравнением

$$\ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 y + a_0 v = b_3 \ddot{v} + b_2 \dot{v} + b_1 v + b_0 v \quad (3.1)$$

Блок - схема моделирования этой системы изображена на рисунке 4.2. В качестве переменных состояния выбираются выходы интеграторов. Постоянные величины  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  должны быть выражены через  $a_i$  и  $b_i$  из условия удовлетворения схемы уравнению.

Непосредственно из схемы моделирования следует

$$y = x_1 + \beta_0 v \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 + \beta_1 v \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 + \beta_2 v \quad (3.4)$$

$$\dot{x}_3 = \beta_3 v - \alpha_0 x_1 - \alpha_1 x_2 - \alpha_2 x_3 \quad (3.5)$$

Дифференцируя  $y$  получим

$$\dot{y} = \dot{x}_1 + \beta_0 \dot{v}$$

Последующая подстановка  $\dot{x}_1$  из уравнения (3.3) дает

$$\dot{y} = x_2 + \beta_1 v + \beta_0 \dot{v}$$

Согласно приводимой процедуре вторая и старшие производные  $y$  равны

$$\ddot{y} = \dot{x}_2 + \beta_1 \dot{v} + \beta_0 \ddot{v} = x_3 + \beta_2 v + \beta_1 \dot{v} + \beta_0 \ddot{v}$$

$$\ddot{y} = \dot{x}_3 + \beta_2 \dot{v} + \beta_1 \ddot{v} + \beta_0 \ddot{v} = \beta_3 v + \beta_2 \dot{v} + \beta_1 \ddot{v} + \beta_0 \ddot{v} - \alpha_0 x_1 - \alpha_1 x_2 - \alpha_2 x_3$$

Выразим переменные состояния  $x$  из выражений 3.2 ... 3.4

$$x_1 = y - \beta_0 v$$

$$x_2 = \dot{x}_1 - \beta_1 v = \dot{y} - \beta_0 \dot{v} - \beta_1 v$$

$$x_3 = \dot{x}_2 - \beta_2 v = \ddot{y} - \beta_0 \ddot{v} - \beta_1 \dot{v} - \beta_2 v$$

и подставив в уравнение для  $\ddot{y}$  получим

$$\ddot{y} = \beta_3 v + \beta_2 \dot{v} + \beta_1 \ddot{v} + \beta_0 \ddot{v} - \alpha_0 y + \alpha_0 \beta_0 v - \alpha_1 \dot{y} + \alpha_1 \beta_0 \dot{v} + \alpha_1 \beta_1 v - \alpha_2 \ddot{y} + \alpha_2 \beta_0 \ddot{v} + \alpha_2 \beta_1 \dot{v} + \alpha_2 \beta_2 v$$

Сопоставляя уравнения исходной системы и модели, получим выражения для  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  в виде

$$\alpha_0 = a_0 \quad \alpha_1 = a_1 \quad \alpha_2 = a_2$$

$$\beta_0 = b_3 \quad b_2 = \alpha_2 \beta_0 + \beta_1 \quad \text{откуда} \quad \beta_1 = b_2 - \alpha_2 \beta_0 = b_2 - a_2 b_3$$

$$\beta_2 = b_1 - \alpha_1 \beta_0 - \alpha_2 \beta_1 \quad \beta_3 = b_0 - \alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2$$

Окончательно уравнения в переменных состояния запишутся следующим образом

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} v$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \beta_0 v$$