

Министерство образования и науки РФ

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

Факультет **автоматизированных систем и технологической информатики**

Кафедра "**Автоматизации производственных процессов**"

**ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Теория автоматического управления**

Направление подготовки 15900.62 " Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств"

Профиль подготовки «Технология машиностроения»

**Факультет подготовки инженерных кадров**

|                                      | Заочная сокращенная |
|--------------------------------------|---------------------|
| Курс                                 | 3                   |
| Семестр                              | 5                   |
| Число зачетных единиц                | 3                   |
| Всего часов по учебному плану, час.  | 108                 |
| Всего часов аудиторных занятий, час. | 10                  |
| Лекции, час                          | 4                   |
| Лабораторные занятия, час.           | 4                   |
| Контрольная работа, семестр          | 5                   |
| Экзамен (семестр)                    | 5                   |

Разработал доцент

Барабанов В.Г.

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, которые формируют математический аппарат и понимание принципов построения элементов автоматических систем.

Основные положения дисциплины используются при изучении следующих дисциплин: «Технические средства автоматизации и управления», «Проектирование автоматизированных систем», «Автоматизированный электропривод», "Управление в автоматизированном производстве", 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                                 |
| 1      | Введение. Понятие динамической системы, содержание задач управления. Основные принципы управления. Классификация САУ.  |                                   |
| 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). | 0,5                               |
| 3      | Типовые звенья линейных САУ, их характеристики. Эквивалентные преобразования алгоритмических схем. Частотные характеристики разомкнутых систем.  | 0,5                               |
| 4      | Замкнутые САУ и их характеристики. Передаточные функции и характеристические уравнения систем по задающему и возмущающему воздействиям, относительно ошибки. Частотные характеристики замкнутых систем.  | 0,5                               |
| 5      | Устойчивость линейных САУ. Понятие устойчивости. Критерии устойчивости (алгебраические и частотные). Анализ устойчивости по логарифмическим характеристикам.   | 0,5                               |
| 6      | Качество процессов регулирования. Показатели качества. Косвенные оценки качества (корневые, частотные, интегральные).  | 0,5                               |
| 7      | Точность САУ. Точность систем при типовых воздействиях. Коэффициенты ошибок.   | 0,5                               |
| 8      | Стабилизация, повышение качества и синтез линейных САУ.  | 0,5                               |
| 9      | Корректирующие устройства, способы включения, виды. Методы синтеза корректирующих устройств.   | 0,5                               |
|        | Итого  | 4                                 |

### 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           |
|                   | Итого  | 4           |

### 4 Самостоятельная работа студентов

В течение пятого семестра студенты выполняют контрольную работу, которая включает в себя одно задание, которое предусматривает анализ линейных систем автоматического управления и построение логарифмических частотных характеристик. Работа выполняется в соответствии с методическими указаниями по самостоятельной работе.

#### 4.1 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 таблице 4.1 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.**

#### 4.2 Содержание заданий

##### Задание

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.

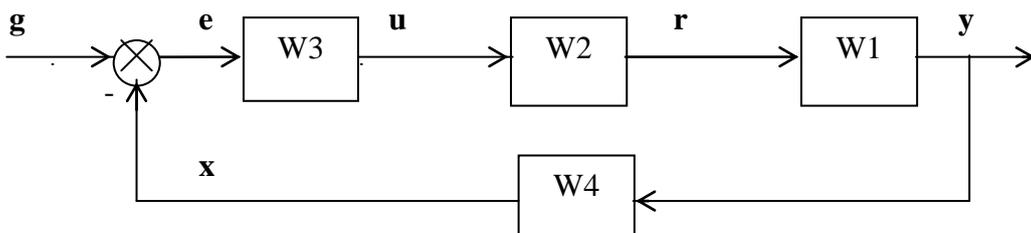


Рисунок 4.1 - Алгоритмическая схема САУ

## Варианты задания

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    | $x = 0,4y$                                 |

### 4.3 Методические указания

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°.

## **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; ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 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.

### ***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.

## **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 САР. Системы прямого и непрямого регулирования. Одноконтурные и многоконтурные, одномерные и многомерные, непрерывные и дискретные, линейные и нелинейные системы. Стабилизирующие, программные, следящие САР.

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, изодромные 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 САР.

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.

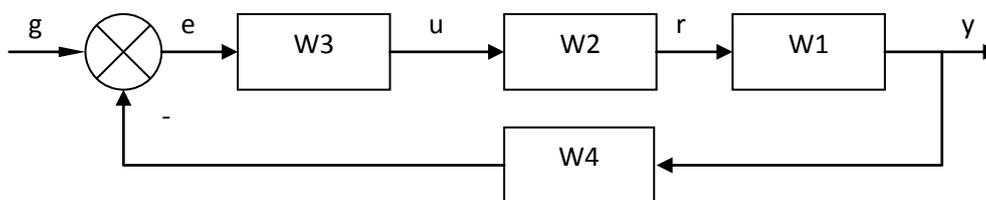
26 Реализация корректирующих устройств. Пассивные и активные четырехполюсники постоянного тока, дифференцирующий трансформатор, тахогенератор постоянного тока.

## Приложение А

### Пример выполнения задания 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 -  $\varphi = 21^\circ$

