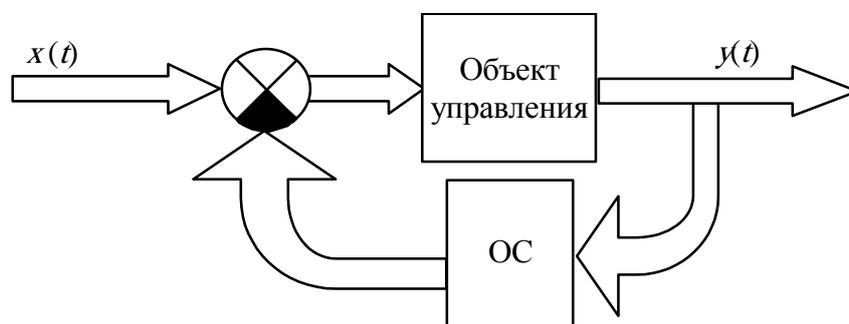


В.П. Пушкарев, Д.Ю. Пелявин

РАДИОАВТОМАТИКА

Учебное методическое пособие



ТОМСК – 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное бюджетное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра средств радиосвязи (СРС)

В.П. Пушкарев, Д.Ю. Пелявин

РАДИОАВТОМАТИКА

Учебно-методическое пособие

2012

Корректор: Осипова Е.А.

Пушкарев В.П., Пелявин Д.Ю.

Радиоавтоматика: Учебно-методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 85 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и вечерней формы обучения радиотехнических специальностей направления «Радиотехника» и «Телекоммуникации», а также и студентов, обучающихся по дистанционной форме обучения высшего профессионального образования.

© Пушкарев В.П., Пелявин Д.Ю., 2012
© Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ	6
2 ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «РАДИОАВТОМАТИКА»	7
2.1 Основные понятия и определения.....	7
Вопросы для самоконтроля	7
2.2 Назначения, состав, основные характеристики, функциональные и структурные схемы систем радиоавтоматики и их элементов.....	8
Вопросы для самоконтроля	9
2.3 Дифференциальные уравнения и передаточные функции систем радиоавтоматики.....	10
Вопросы для самоконтроля	10
2.4 Элементы систем радиоавтоматики и типовые радиотехнические звенья	12
2.5 Устойчивость линейных систем радиоавтоматики.....	15
2.6 Анализ качества систем радиоавтоматики.....	17
2.7 Основы проектирования систем радиоавтоматики	19
3 КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	22
3.1 Общие требования по выполнению контрольных работ	22
3.2 <i>Контрольная работа № 1. Исследование типовых радиотехнических звеньев и структурные преобразования систем радиоавтоматики</i>	<i>23</i>
3.2.1 Краткие методические указания по исследованию типовых радиотехнических звеньев	23
3.2.2 Задание №1	37
3.2.3 Задание №2	45
3.2.4 Задание №3	47
3.2.5 Задание №4	47
3.2.6 Примеры выполнения заданий контрольной работы №1	51
3.3 <i>Контрольная работа № 2. Исследование показателей качества систем радиоавтоматики</i>	<i>66</i>
3.3.1 Краткие методические указания по исследованию показателей качества систем радиоавтоматики	66
3.3.2 Блок заданий №1	71
3.3.3 Блок заданий №2.....	72

3.3.4 Блок заданий №3.....	72
3.3.5 Блок заданий №4.....	73
3.3.6 Примеры выполнения контрольной работы №2	74
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	85

1 ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Радиоавтоматика» является одной из основных профилирующих дисциплин в инженерной подготовке по специальности «Радиотехника». Целью изучения дисциплины является подготовка студентов к разработке и применению систем радиоавтоматики (РА) – систем автоматического регулирования, синхронизации сигналов, стабилизации частоты, амплитуды, фазы и решения других инженерных задач. В процессе работы над курсом студенты овладевают принципами построения систем автоматического управления, методами математического описания систем управления, приобретают навыки расчетов. Изучение дисциплины базируется на физико-математической подготовке студентов, которую они получают при изучении курсов высшей математики, физики, теоретических основ радиотехники, теории радиотехнических цепей и сигналов, основ теории вероятности.

При изучении дисциплины «Радиоавтоматика» студенты должны выполнить две контрольные работы.

Отчетность по дисциплине предполагает сданные контрольные работы, которые являются допуском к экзамену.

2 ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «РАДИОАВТОМАТИКА»

2.1 Основные понятия и определения

Цель и назначение систем радиоавтоматики. Краткие сведения об истории развития теории автоматического управления и систем радиоавтоматики. Классификация систем автоматического управления (регулирования).

Модель объекта управления. Функциональные и структурные схемы систем радиоавтоматики. Основные компоненты функциональной и структурной схемы контура регулирования: объект управления, устройства управления, измеритель рассогласования, чувствительный и преобразующий элементы. Понятия возмущающего (входного) воздействия, управляемой (регулируемой) величины. Виды воздействий на объект в процессе управления.

Классификация систем РА: по принципу построения, по виду возмущающего (входного) сигнала, по виду устройства управления. Классификация систем РА по виду уравнения, описывающего процессы в системах: линейные и нелинейные, непрерывные и дискретные, стационарные и нестационарные системы РА.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова функциональная схема системы автоматического регулирования?
2. Какие системы регулирования являются автоматическими?
3. Какие системы регулирования являются автоматизированными?
4. Что понимается под моделью объекта управления?
5. В чем сущность систем управления по отклонению и возмущению?
6. Каков принцип работы замкнутой автоматической системы управления?
7. К какому классу радиоавтоматики следует отнести системы автоматической стабилизации частоты, напряжения?
8. В чем преимущество и недостаток систем РА, реализующих принцип управления по рассогласованию?

9. Какие преимущества имеют системы РА, в которых реализуется принцип управления по входному воздействию?
10. Что такое замкнутый контур регулирования?
11. Какие функциональные компоненты образуют замкнутый контур автоматического регулирования?
12. Как классифицируются системы РА по характеру задающего воздействия?
13. Какие системы РА называются непрерывными?
14. Какие системы РА называются дискретными?
15. Какие системы РА называются линейными?
16. Какие системы РА называются параметрическими?
17. Какие системы РА называются адаптивными?

2.2 Назначения, состав, основные характеристики, функциональные и структурные схемы систем радиоавтоматики и их элементов

Функциональная схема системы автоматической регулировки усиления (АРУ). Структурная схема разомкнутой инерционной и временной системы АРУ. Структурная схема систем АРУ непрерывного действия с обратной связью. Задержанная, усиленная, мгновенная системы АРУ. Регулировочные характеристики систем АРУ.

Функциональная и структурная схема автоматической подстройки частоты и системы фазовой автоматической подстройки частоты. Дискриминационная характеристика частотного и фазового детекторов.

Функциональная и структурная схема системы автоматического сопровождения цели бортовой радиолокационной станции (РЛС). Диаграмма направленности и пеленгационная характеристика РЛС. Функциональная схема моноимпульсного приемника системы автосопровождения и отсчета РЛС. Временной дискриминатор. Функциональная и структурная схема системы измерения дальности импульсной РЛС.

Обобщенная структурная схема систем радиоавтоматики. Основные элементы систем РА. Дискриминаторы. Управители. Фильтры.

Вопросы для самоконтроля

1. Каково определение понятия «функциональная схема»?
2. Каково определение структурной схемы? Объясните разницу между функциональной и структурной схемой систем РА.
3. Какое назначение имеет система автоматической регулировки усиления?
4. Какова функциональная схема системы автоматической регулировки усиления?
5. Какова структурная схема разомкнутой системы АРУ?
6. Какова структурная схема замкнутой системы АРУ?
7. В чем принципиальная разница между разомкнутой и замкнутой системами АРУ?
8. Какова структурная схема разомкнутой временной системы АРУ?
9. Какова структурная схема АРУ непрерывного действия с совмещенным и отдельным детектированием?
10. Какое назначение имеет система задержанной АРУ?
11. Какие виды регулировочных характеристик систем АРУ вы знаете?
12. Каково назначение системы автоматической подстройки частоты?
13. Какова функциональная схема автоматической подстройки частоты?
14. Какова структурная схема автоматической подстройки частоты?
15. Где используется фазовая автоподстройка частоты?
16. Какова функциональная схема системы ФАПЧ?
17. Какова структурная схема системы ФАПЧ?
18. Каково назначение системы автоматического сопровождения цели бортовой радиолокационной станции?
19. Каков принцип работы системы автоматического сопровождения цели бортовой РЛС?
20. Какой вид имеют диаграмма направленности и пеленгационная характеристика РЛС?
21. Какова функциональная схема моноимпульсного приемника системы автосопровождения РЛС?
22. Какова структурная схема системы автоматического сопровождения РЛС?

23. Назначение системы измерения дальности радиолокационной станции?

24. Какова функциональная схема дальномера импульсной РЛС?

25. Каков принцип работы временного дискриминатора системы измерения дальности РЛС?

26. Какова структурная схема дальномера импульсной РЛС?

27. Какова обобщенная структурная схема системы РА?

28. Какие элементы и узлы входят в состав систем РА?

29. Какое назначение в системах РА имеют дискриминатор, управители и фильтры нижних частот?

2.3 Дифференциальные уравнения и передаточные функции систем радиоавтоматики

Линейные дифференциальные уравнения, описывающие процессы в системах РА. Коэффициенты дифференциальных уравнений, описывающие процессы в стационарных и нестационарных системах РА.

Передаточная функция систем радиоавтоматики. Преобразование Лапласа. Связь передаточной функции с физической реализуемостью системы РА.

Переходная и импульсная переходная функции системы РА. Переходной процесс в системе РА. Условия физической реализуемости и устойчивости в системах РА.

Описание выходного сигнала системы радиоавтоматики при произвольном воздействии.

Комплексный коэффициент передачи и частотные характеристики систем РА. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики систем РА. Амплитудно-фазовая частотная характеристика системы РА. Логарифмические частотные характеристики систем РА. Типовые асимптотические логарифмические амплитудно-частотные характеристики.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды дифференциальных уравнений используются при описании процессов в системах РА?

2. Почему процессы, происходящие в системах РА, описывают линейными дифференциальными уравнениями?
3. Каков вид выходного сигнала системы РА при начальных условиях?
4. Каков вид передаточной функции при нулевых начальных условиях?
5. Как называются корни полинома числителя и знаменателя передаточной функции системы РА?
6. Каково расположение нулей и полюсов на плоскости комплексного переменного?
7. При каком виде передаточной функции систему называют минимально-фазовой, а при каком – неминимально-фазовой?
8. Какого вида сигнал используется при исследовании переходного процесса, происходящего в системах РА?
9. Что такое единичная функция, и каким условиям она должна удовлетворять?
10. Что такое переходная функция системы РА?
11. Что такое импульсная переходная функция системы РА?
12. Каким условиям удовлетворяет импульсная переходная функция?
13. Условие физической реализуемости системы РА?
14. Какое условие импульсной переходной характеристики описывает характер устойчивости системы РА?
15. В чем отличие импульсной переходной функции стационарной и нестационарной системы РА?
16. Каков вид выходного сигнала при произвольном воздействии на систему РА?
17. Какой вид имеет комплексный коэффициент передачи системы РА?
18. Что такое амплитудно-фазовая частотная характеристика системы РА?
19. Что такое логарифмическая амплитудно-частотная характеристика системы РА?
20. Какие характерные виды типовых асимптотических логарифмических амплитудно-частотных характеристик могут быть в системах РА?

2.4 Элементы систем радиоавтоматики и типовые радиотехнические звенья

Проблема моделирования и анализа элементов систем радиоавтоматики. Линейная и нелинейная линеаризация характеристик элементов систем РА. Формула Тейлора.

Фазовые детекторы. Назначение фазовых детекторов. Функциональная схема фазового детектора. Векторомерные и параметрические фазовые детекторы. Дискриминационная характеристика фазового детектора. Аналитическое описание сигнала на выходе фазового детектора. Передаточная функция фазового детектора.

Частотные дискриминаторы. Назначение частотного дискриминатора. Функциональная схема частотного дискриминатора. Дискриминационная характеристика частотного дискриминатора. Передаточная функция частотного дискриминатора.

Угловые дискриминаторы. Назначение угловых дискриминаторов. Принцип работы дискриминаторов с коническим сканированием диаграммы направленности и с мгновенным сравнением сигналов. Передаточная функция угловых дискриминаторов. Функциональная схема суммарно-разностного фазового моноимпульсного дискриминатора фазового пеленгатора.

Временные дискриминаторы. Назначение временных дискриминаторов. Принцип работы временного дискриминатора. Дискриминационная характеристика временного дискриминатора.

Исполнительные устройства систем РА. Основные типы исполнительных устройств. Качество работы исполнительного устройства. Регулировочные характеристики регулируемых усилителей и генераторов. Регулировочная характеристика электрического двигателя управления антенной РЛС.

Типовые радиотехнические звенья (ТРЗ). Классификация типовых радиотехнических звеньев. Основные требования, предъявляемые к типовым звеньям. Позиционные, интегрирующие и дифференцирующие звенья. Частотные и переходные передаточные функции типовых радиотехнических звеньев.

Виды соединения типовых радиотехнических звеньев. Основные правила структурного преобразования различных видов

соединений звеньев в эквивалентную структурную схему с результирующей передаточной функцией.

Передаточные функции сложных многоконтурных систем РА. Передаточная функция разомкнутой и замкнутой системы. Передаточная функция ошибки. Правила структурного преобразования многоконтурных систем РА.

Параметры элементов систем РА. Задача идентификации элементов систем РА. Частотный метод идентификации элементов систем. Алгоритм построения логарифмической амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы РА. Идентификация элементов систем переходной передаточной функцией. Статистические методы идентификации элементов систем.

Вопросы для самоконтроля

1. Какая проблема существует на этапе моделирования элементов систем РА?
2. Какой вид имеет линеаризованное уравнение, описывающее процесс регулирования элементов систем РА?
3. Какие элементы систем используются в системах РА?
4. Какое назначение и применение в системах РА имеет фазовый детектор?
5. Какова функциональная схема фазового детектора?
6. Какие типы фазовых детекторов используются в системах РА?
7. Каков вид дискриминационной характеристики фазового детектора?
8. Какой вид имеет линеаризованное нелинейное уравнение, описывающее напряжение на выходе фазового детектора?
9. Какой вид передаточной функции имеет фазовый детектор?
10. Какое назначение и применение в системах РА имеют частотные дискриминаторы?
11. Какова функциональная схема частотного дискриминатора?
12. Каков вид дискриминационной характеристики частотного дискриминатора?

13. Какой вид имеет линеаризованное нелинейное уравнение, описывающее напряжение на выходе частотного дискриминатора?

14. Какой вид передаточной функции имеет частотный дискриминатор?

15. Какое назначение имеют временные дискриминаторы?

16. Каков принцип работы временного дискриминатора?

17. Какой вид имеет дискриминационная характеристика временного дискриминатора?

18. Какое назначение в системах РА имеют исполнительные механизмы?

19. Какой вид имеет регулировочная характеристика регулируемого усилителя, и какое аналитическое выражение его описывает?

20. Какой вид имеет регулировочная характеристика перестраиваемого генератора, и какое аналитическое выражение его описывает?

21. Какова схема электрического двигателя постоянного тока системы управления антенной РЛС?

22. Какой вид имеет регулировочная характеристика и передаточная функция электрического двигателя постоянного тока системы управления антенной РЛС?

23. Указать причину использования моделей элементов систем РА в виде типовых радиотехнических звеньев.

24. Какие допущения предъявляются к типовым радиотехническим звеньям при их моделировании?

25. Какие группы типовых радиотехнических звеньев вы знаете?

26. Какой вид дифференциального уравнения и передаточной функции имеет идеальное (безынерционное) усилительное звено?

27. Какой вид дифференциального уравнения и передаточной функции имеет апериодическое (инерционное) звено?

28. Чем отличается идеальное дифференцирующее звено от форсирующего идеального звена?

29. Чем отличается идеальное интегрирующее звено от апериодического звена?

30. Каково условие вырождения колебательного звена в консервативное?

31. Какой вид имеют частотные и переходные функции типовых радиотехнических звеньев?

32. Что такое частота среза ω_c и критическая частота $\omega_{кр}$ в типовых радиотехнических звеньях?

33. Какие виды соединений типовых радиотехнических звеньев вы знаете?

34. Какие правила структурного преобразования различных видов соединений звеньев в эквивалентную структурную схему вы знаете?

35. Чем вызвана необходимость преобразования сложного соединения типовых радиотехнических звеньев в простое?

36. Какие методы идентификации параметров элементов систем вы знаете?

37. В чем суть частотного метода идентификации элементов систем РА?

2.5 Устойчивость линейных систем радиоавтоматики

Основные понятия и определения. Переходные характеристики устойчивых и неустойчивых систем радиоавтоматики. Импульсная переходная характеристика устойчивой системы радиоавтоматики.

Условие устойчивости линейных систем РА. Характеристическое уравнение устойчивой системы радиоавтоматики. Необходимое и достаточное условие решения характеристического уравнения устойчивой системы РА.

Критерии устойчивости. Алгебраический критерий устойчивости Гурвица. Матрица Гурвица. Условие устойчивости системы радиоавтоматики по критерию Гурвица.

Частотный критерий устойчивости Михайлова. Определение критерия Михайлова. Годограф Михайлова для устойчивой, неустойчивой систем РА.

Критерий устойчивости Найквиста. Условие устойчивости системы радиоавтоматики по критерию Найквиста. Годограф

Найквиста для устойчивой и неустойчивой систем РА. Частотные характеристики для критерия Найквиста для устойчивых и неустойчивых систем радиоавтоматики.

Логарифмическая форма критерия Найквиста. Условие устойчивости системы радиоавтоматики по логарифмическим частотным характеристикам.

Области и запасы устойчивости. Основные понятия и определения запаса устойчивости. Определение области устойчивости систем по заданным параметрам. Частотные оценки запаса по амплитудно-фазовым и логарифмическим частотным характеристикам систем. Корневые оценки запаса устойчивости систем РА. Оценка запаса устойчивости методом D -разбиения.

Вопросы для самоконтроля

1. Вид переходных характеристик для устойчивых и неустойчивых систем радиоавтоматики.

2. Какой вид имеет импульсная переходная характеристика устойчивой системы РА?

3. Какой вид имеет система уравнений, описывающая систему РА при задающем $g = g(t)$ и возмущающем воздействиях $f = f(t)$?

4. Сформулируйте условие устойчивости линейных систем?

5. Показать расположение корней характеристического уравнения устойчивой системы радиоавтоматики.

6. Показать расположение корней характеристического уравнения системы радиоавтоматики, находящейся на границе устойчивости.

7. Почему критерий устойчивости Гурвица называют алгебраическим?

8. Сформулируйте критерий устойчивости по Гурвицу.

9. Почему критерий устойчивости по Михайлову называют графоаналитическим?

10. Сформулируйте критерий устойчивости по Михайлову.

11. Представьте вид годографа Михайлова устойчивой системы радиоавтоматики 3-го порядка?

12. Представьте вид годографа Михайлова системы радиоавтоматики, находящейся на границе устойчивости.

13. Сформулируйте частотный критерий устойчивости Найквиста.

14. В чем заключается отличие анализа устойчивости по Найквисту от анализа устойчивости по Михайлову?

15. В чем заключается суть исследования на устойчивость по логарифмическим амплитудной и фазочастотной характеристикам системы радиоавтоматики?

16. Каковы достоинства и недостатки логарифмической формы критерия Найквиста?

17. Что такое запас устойчивости системы радиоавтоматики по амплитуде?

18. Что такое запас устойчивости системы радиоавтоматики по фазе?

19. Каков вид переходного процесса системы радиоавтоматики, обладающей большим запасом устойчивости?

20. В чем заключается суть метода D -разбиения?

21. Как влияет интегрирующее звено на устойчивость работы системы радиоавтоматики?

22. Как влияет дифференцирующее звено на устойчивость работы системы радиоавтоматики?

2.6 Анализ качества систем радиоавтоматики

Постановка задачи исследования качества работы системы радиоавтоматики. Вид воздействия при анализе переходного процесса в системах РА. Вид воздействия при анализе частотных показателей качества систем РА.

Показатели качества переходного процесса. Основные параметры систем РА, характеризующие качество переходного процесса в системах РА.

Частотные показатели качества. Основные параметры систем РА, характеризующие частотные свойства систем РА.

Анализ точности работы системы радиоавтоматики. Классификация систем при анализе точности работы систем РА. Понятие ошибки и точности работы систем РА. Временная зависимость статической и астатической систем РА. Передаточные функции статической и астатической систем РА. Временная зависимость динамической и переходной ошибок систем РА. Сум-

марная ошибка систем РА. Среднеквадратическая ошибка системы РА. Формирующий фильтр. Схема включения формирующего фильтра.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой тестовый сигнал используется для исследования переходного процесса и статической ошибки системы РА?

2. Какой тестовый сигнал используется для исследования динамической ошибки системы РА?

3. Какой тестовый сигнал используется для исследования частотных свойств систем РА?

4. Как определяется качество работы системы РА относительно случайных сигналов и помех?

5. Перечислите достоинства и недостатки косвенных методов исследования качества работы системы РА, базирующихся на вычислении интегральных оценок.

6. Дайте определение длительности переходного процесса системы РА.

7. Что такое перерегулирование системы РА?

8. Какой параметр системы РА характеризует время установления первого максимума?

9. Что понимается под частотой колебаний переходного процесса системы РА?

10. Дайте определение колебательности переходного процесса системы РА.

11. Укажите вид переходного процесса статической системы радиоавтоматики.

12. Укажите вид переходного процесса астатической системы радиоавтоматики.

13. Перечислите виды частотных показателей качества системы РА.

14. Что понимается под полосой пропускания системы РА?

15. Что такое резонансная частота системы РА?

16. Дайте ориентировочную количественную оценку показателя колебательности нормально работающей системы РА.

17. Что такое статическая ошибка системы радиоавтоматики?

18. Чему равна ошибка астатической системы в установившемся режиме?

19. Чему равна ошибка статической системы РА в установившемся режиме?

20. Укажите временную зависимость ошибки статической системы радиоавтоматики.

21. Укажите временную зависимость ошибки астатической системы радиоавтоматики.

22. Что такое динамическая ошибка системы радиоавтоматики?

23. Что такое переходная ошибка системы радиоавтоматики?

24. Укажите назначение формирующего фильтра при проведении исследования показателей качества систем РА.

2.7 Основы проектирования систем радиоавтоматики

Постановка задачи. Основные критерии и требования, предъявляемые к системам на этапе проектирования. Критерий качества. Условия обеспечения допустимых ошибок. Функционал сложности систем радиоавтоматики.

Синтез передаточной функции разомкнутой системы радиоавтоматики. Необходимые условия для решения задач синтеза систем радиоавтоматики. Основные этапы проектирования. Желаемая передаточная функция разомкнутой системы. Желаемая передаточная функция систем с астатизмом первого и второго порядков. Методика нахождения параметров желаемой передаточной функции.

Определение передаточных функций корректирующих устройств систем радиоавтоматики. Исходная передаточная функция. Основные способы включения корректирующих устройств. Условие определения числа радиотехнических звеньев, включаемых в состав желаемой передаточной функции систем радиоавтоматики. Желаемая передаточная функция системы с корректирующим устройством, включенным в цепь обратной связи. Желаемая передаточная функция системы с корректирующим устройством, включенным последовательно и параллельно элементам систем. Схемы и логарифмические частотные характери-

ки корректирующих устройств с отставанием и опережением по фазе. Схема и логарифмическая характеристика комбинированного корректирующего устройства. Жесткая и гибкая корректирующие обратные связи.

Синтез систем с неполной информацией о воздействии. Робастные (грубые) системы радиоавтоматики. Синтез робастных систем на основе средних квадратических значений управляющего воздействия и его производных. Ограничения на вид амплитудно-частотной характеристики разомкнутой проектируемой системы в условиях действия помехи.

Комплексные системы. Определение понятия комплексных систем. Область применения комплексных систем радиоавтоматики. Типовая структурная схема комплексной измерительной системы РА. Условие инвариантности комплексных систем радиоавтоматики относительно измеряемого сигнала. Многоканальная схема фильтрации комплексных систем радиоавтоматики. Передаточная функция и коэффициенты ошибок комплексной системы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие показатели качества системы РА необходимы для начала этапа проектирования?
2. В чем заключается сущность динамического синтеза систем РА?
3. Запишите желаемую передаточную функцию разомкнутой системы РА.
4. Запишите передаточную функцию системы РА с астатизмом первого порядка.
5. Запишите передаточную функцию системы РА с астатизмом второго порядка.
6. Какие способы включения корректирующих устройств используются в системах РА?
7. Почему корректирующие устройства систем РА должны работать на постоянном токе?
8. Когда в системах РА используют корректирующее устройство с отставанием по фазе?
9. Когда в системах РА используют корректирующее устройство с опережением по фазе?

10. В чем принципиальное различие систем РА, использующих «жесткую» или «мягкую» обратную связь?

11. Какие основные схемы в системах РА используются в качестве дифференцирующих устройств?

12. Каким образом формируется передаточная функция разомкнутой проектируемой системы РА?

13. Как определяются передаточные функции корректирующих устройств?

14. В чем заключается особенность синтеза систем с неполной информацией о воздействиях?

15. Что означает запретная область ЛЧХ относительно динамической ошибки?

16. В чем заключается синтез робастных систем РА?

17. Какие существуют ограничения на вид АЧХ разомкнутой системы РА при действии на нее помехи с известной спектральной плотностью?

18. Какие системы РА относятся к комплексным?

19. Что называют условием инвариантности для комплексной системы РА?

20. Каково условие физической реализуемости комплексных систем РА?

21. Как можно достичь повышения порядка астатизма в комплексных системах РА?

22. Перечислите условия синтеза комплексных систем РА.

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

3.1 Общие требования по выполнению контрольных работ

Студент, изучающий дисциплину «Радиоавтоматика», должен выполнить две контрольных работы. Варианты контрольных работ выбираются по общим правилам, контрольная работа содержит 80 вариантов по следующим темам анализа систем радиоавтоматики:

- преобразование структурных схем;
- построение передаточных функций систем РА;
- построение ЛАЧХ и ЛФЧХ;
- исследование устойчивости систем РА;
- определение запасов устойчивости систем РА;
- определение показателей качества работы систем РА.

Номер варианта задания определяет номер схемы или блока в некоторых заданиях контрольных работ (таблица 3.1).

Таблица 3.1

№ схе- мы, блока	Номер варианта																			
	1	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57	61	65	69	73
2	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74	78
3	3	7	11	15	19	23	27	31	35	39	43	47	51	55	59	63	67	71	75	79
4	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80

Контрольная работа № 1. Тема: исследование типовых радиотехнических звеньев и структурные преобразования систем радиоавтоматики.

Для выполнения этой работы необходимо:

- 1) определить передаточную функцию сложной системы радиоавтоматики, для чего произвести структурные преобразования;
- 2) построить линеаризованную ЛАЧХ и ЛФЧХ системы радиоавтоматики;
- 3) определить устойчивость заданной системы РА по её передаточной функции разными критериями;
- 4) определить качественные показатели системы РА.

Результаты исследования представляются в соответствии с предложенными ниже рекомендациями.

Контрольная работа № 2. Исследование показателей качества систем радиоавтоматики.

В данной работе необходимо провести комплексную оценку показателей качества системы радиоавтоматики, предложенных в соответствии с заданием. Работа включает в себя анализ устойчивости, определение запаса устойчивости и качественных показателей исследуемой системы радиоавтоматики и обеспечение заданного запаса устойчивости. Данными к исследованию являются структурная схема системы радиоавтоматики и электрические принципиальные схемы основных ее узлов.

Результаты решения контрольных работ необходимо представлять в электронном виде по *E-mail* (электронной почте) в числовом, текстовом или формульном вариантах. Форматы представления результатов оговариваются в каждом задании и примере отдельно. Общим в представлении промежуточных и окончательных результатов является то, что текстовая часть контрольной работы должна быть выполнена в текстовом формате или текстовом редакторе *Word* версии 6 или выше, формульная часть – средствами псевдографики или в формате *MathType*. В общих или не оговоренных случаях действуют правила, принятые ТМЦ ДО.

3.2 Контрольная работа № 1. Исследование типовых радиотехнических звеньев и структурные преобразования систем радиоавтоматики

3.2.1 Краткие методические указания по исследованию типовых радиотехнических звеньев

В теории линейных систем по уравнению системы можно рассчитать её реакцию на любое входное воздействие. Для оценки качества работы системы в теории управления широкое распространение получили два тестовых сигнала: гармоническое воздействие и единичная ступенчатая функция. Связь входного и выходного гармонических сигналов устанавливается передаточ-

ной функцией $W(j\omega)$, реакция системы на единичную функцию есть её переходная характеристика $h(t)$.

Получить уравнение системы проще всего по структурной схеме исследуемой системы. По несложной структурной схеме обычно удается составить операторное уравнение системы управления и затем определить её передаточную функцию. Такой метод называется методом структурных преобразований, он наиболее эффективен.

Основой метода структурных преобразований является преобразование структурной схемы системы в эквивалентную одноконтурную или вообще не имеющую обратных связей, что не вызывает затруднений. Необходимые для этого правила детализованы и сведены в таблицы [4]. Недостаток метода структурных преобразований заключается в необходимости вычерчивать структурную схему почти после каждого действия (этапа её упрощения), что делает данный метод громоздким, особенно при сложных многоконтурных структурных схемах с перекрестными обратными связями.

Поэтому сложные структурные схемы целесообразно рассматривать с позиции теории графов, и определять передаточные функции, например, с помощью формулы Мезона [4].

Рассмотрим еще один метод построения передаточной функции системы по её структурной схеме, основанный на теории графов.

Суть метода заключается в объединении метода структурных преобразований и теории графов. Структурная схема исследуемой системы разбивается на простые составляющие (как в методе структурных преобразований), и каждая из составляющих описывается с позиции теории графов.

Рассмотрим применение данного метода на встречно-параллельном соединении звеньев:

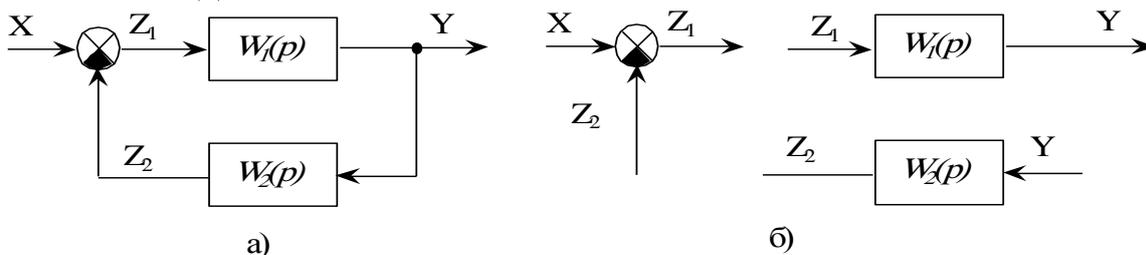


Рис. 3.1 – Структурная схема системы со встречно-параллельным соединением звеньев а) и её составные части б)

Структурную схему исследуемой системы (рис. 3.1, а) разбиваем на простые интуитивно-понятные составляющие (рис. 3.1, б), затем в соответствии с правилами структурных преобразований запишем передаточные функции всех составных частей структурной схемы и сведем их в систему

$$\begin{cases} X - Z_2 = Z_1, \\ Z_1 \cdot W_1 = Y, \\ Y \cdot W_2 = Z_2, \end{cases}$$

далее решим полученную систему и выделим необходимый нам сигнал выхода Y

$$\begin{cases} (X - Z_2) \cdot W_1 = Y, \\ Y \cdot W_2 = Z_2, \\ (X - Y \cdot W_2) \cdot W_1 = Y, \\ Y = \frac{X \cdot W_1}{1 - W_1 \cdot W_2}, \end{cases}$$

Передаточная функция равна отношению выходного сигнала Y к входному X

$$W = \frac{Y}{X} = \frac{X \cdot W_1}{X \cdot (1 - W_1 \cdot W_2)} = \frac{W_1}{1 - W_1 \cdot W_2}.$$

Далее необходимо подставить в полученную формулу передаточной функции формулы её составных частей W_1 и W_2 и привести полученное выражение к требуемой форме.

Для того чтобы построить частотные характеристики системы радиоавтоматики по заданной передаточной функции $W(p)$

например, $W(p) = \frac{k(1 + T_1 p) p}{(1 + T_2 p)^2 (1 + T_3 p)}$ необходимо разбить на

произведение передаточных функций «типовых звеньев» [1, 2]; в нашем примере можно выделить пять звеньев

$W(p) = k \cdot p \cdot (1 + T_1 p) \cdot \left(\frac{1}{(1 + T_2 p)} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1 + T_3 p)}$, затем, подставив кон-

критические значения $W(p) = 10 \cdot p \cdot (1 + 0.01p) \cdot \left(\frac{1}{(1 + 0.05p)} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1 + 0.1p)}$,

построить на одном графике логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) всех входящих в искомую систему звеньев (рис. 3.2).

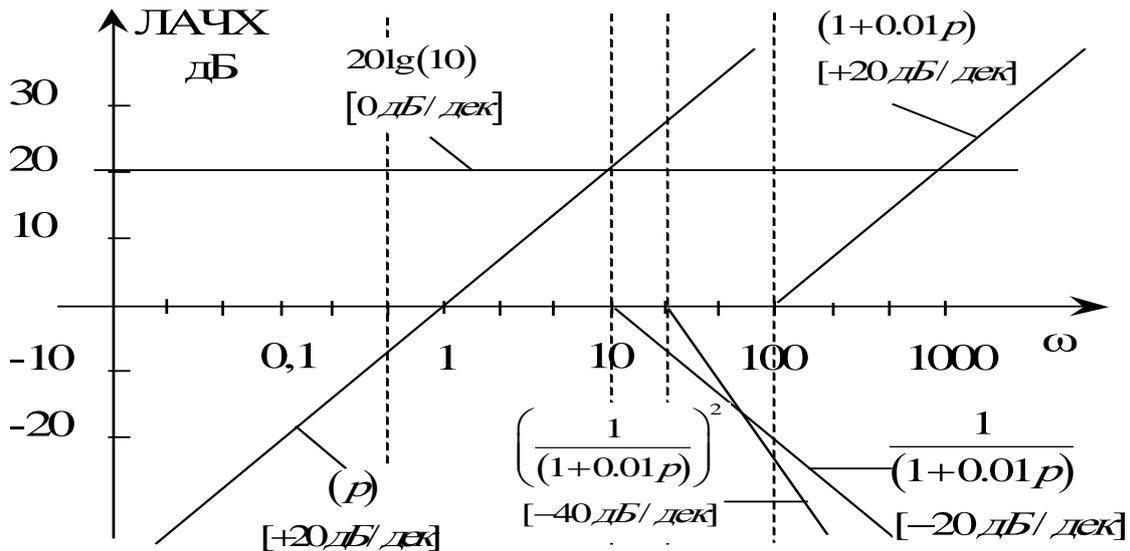


Рис. 3.2 – Построение аппроксимированных ЛАЧХ отдельных типовых радиотехнических звеньев системы радиоавтоматики, входящих в систему

Затем сложить координаты всех графиков на частотах сопряжения и соединить полученные точки прямыми линиями. На всех участках характеристики между точками сопряжения наклоны суммарной характеристики будут равны сумме наклонов характеристик, входящих в эту характеристику типовых звеньев (рис. 3.3). Это и будет линеаризованная АЧХ системы.

Логарифмическая фазочастотная характеристика (ЛФЧХ) системы строится аналогично, строим на одном графике фазочастотные характеристики (ФЧХ) всех входящих в искомую систему звеньев. Причем фазочастотная характеристика пропорционального звена одинакова во всем диапазоне частот и равна нулю, поэтому она не вносит изменений в суммарную фазовую характеристику, и мы можем её проигнорировать. Характеристики остальных звеньев покажем на рис. 3.4.

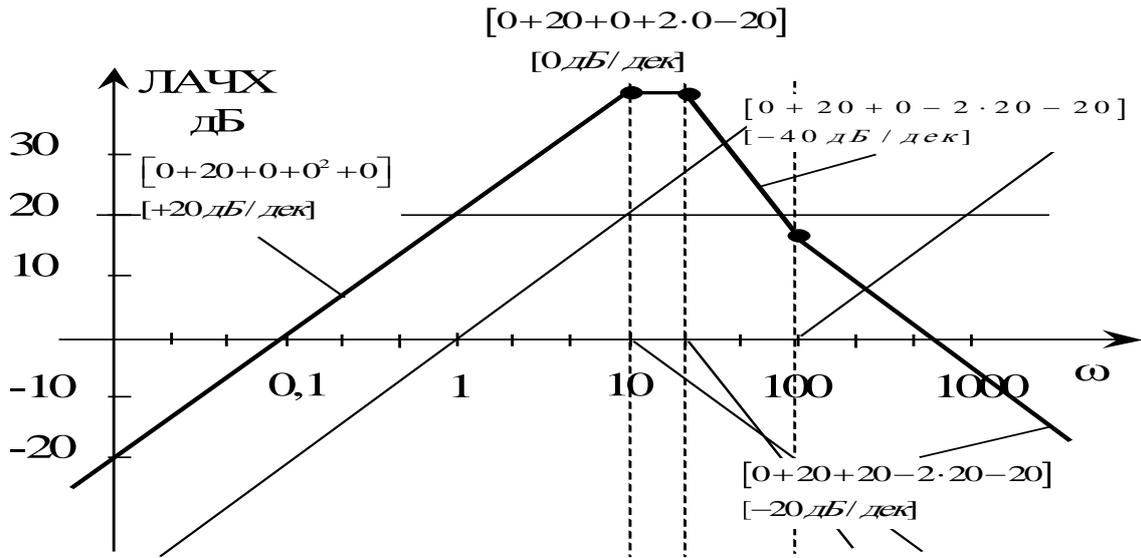


Рис. 3.3 – Построение аппроксимированной ЛАЧХ системы радиоавтоматики

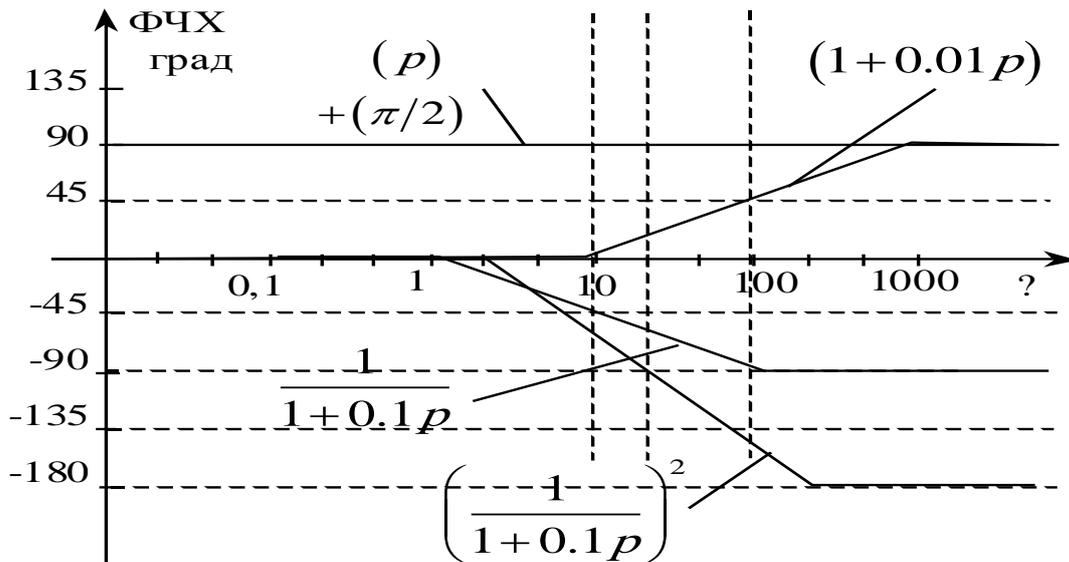


Рис. 3.4 – Построение аппроксимированных ЛФЧХ отдельных типовых радиотехнических звеньев

Затем сложим почастотно координаты всех входящих в систему характеристик и получим суммарную линейризованную фазочастотную характеристику заданной системы (рис. 3.5).

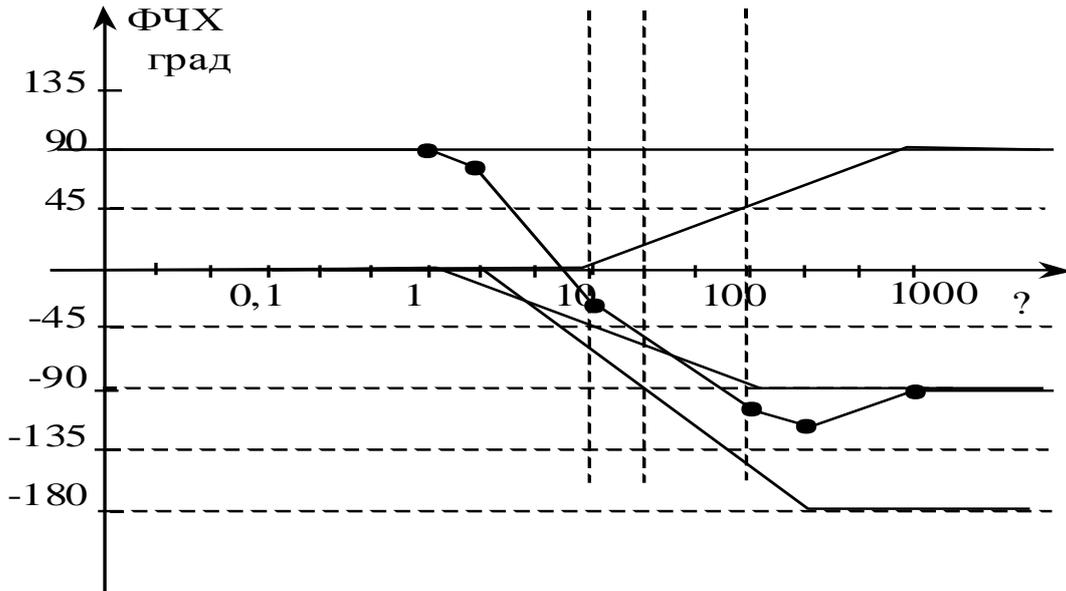


Рис. 3.5 – Построение аппроксимированных ЛФЧХ отдельных типовых радиотехнических звеньев

В качестве проверки посчитаем фазовые сдвиги на «самых» низких и «самых» высоких частотах. Для этого разложим передаточную функцию нашей системы:

$$W(p) = 10 \cdot p \cdot (1 + 0.01p) \cdot \left(\frac{1}{(1 + 0.05p)} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1 + 0.1p)}$$

и сложим фазовые сдвиги на нулевой частоте, даваемые входящими в систему типовыми звеньями. Получим: «Пропорциональное» – 0° , «Дифференцирующее» – $+90^\circ$, «Форсирующее» – 0° , «Апериодическое в квадрате» – 0° , «Апериодическое» – 0° , или $0^\circ + 90^\circ + 0^\circ + 0^\circ + 0^\circ = 90^\circ$. На «самой» высокой частоте фазовые сдвиги соответственно – $0^\circ + 90^\circ + 90^\circ - 180^\circ - 90^\circ = -90^\circ$, что соответствует кривой, представленной на рис. 3.5.

Определение устойчивости в радиоавтоматике можно провести разными способами согласно критериям устойчивости [1, 2, 4]. Рассмотрим два наиболее известных и распространенных критерия устойчивости – алгебраический критерий Гурвица и графоаналитический критерий Найквиста (в том числе его логарифмическую форму).

Критерий Гурвица. Определим характеристическое уравнение заданной системы, для этого запишем *данную в задании передаточную функцию разомкнутой системы*, например:

$$W_p(p) = \frac{k(1 + T_1 p)}{(1 + T_2 p)(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)};$$

где

$$k = 50;$$

$$T_1 = 0.05;$$

$$T_2 = 0.1;$$

$$T_3 = 2;$$

$$T_4 = 0.25,$$

или

$$W_p(p) = \frac{50(1 + 0.05 p)}{(1 + 0.1 p)(1 + 2 p)(1 + 0.25 p)} = \frac{B(p)}{A(p)},$$

где

$$B(p) = 50(1 + 0.05 p);$$

$$A(p) = (1 + 0.1 p)(1 + 2 p)(1 + 0.25 p).$$

Замкнем передаточную функцию, для этого воспользуемся

формулой $W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)}$:

$$W_3(p) = W(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{\frac{B(p)}{A(p)}}{1 + \frac{B(p)}{A(p)}} = \frac{\frac{B(p)}{A(p)}}{\frac{A(p)}{A(p)} + \frac{B(p)}{A(p)}} = \frac{B(p)}{A(p) + B(p)};$$

или

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p) + B(p)} = \frac{50(1 + 0.05 p)}{50(1 + 0.05 p) + (1 + 0.1 p)(1 + 2 p)(1 + 0.25 p)};$$

раскроем скобки

$$W(p) = \frac{50 + 2.5p}{50 + 2.5p + 1 + 2.35p + 0.725p^2 + 0.05p^3} =$$

$$= \frac{50 + 2.5p}{51 + 4.85p + 0.725p^2 + 0.05p^3};$$

тогда характеристическое уравнение:

$$D(p) = 51 + 4.85p + 0.725p^2 + 0.05p^3 = 0;$$

(В данном случае можно было просто сложить числитель и знаменатель разомкнутой передаточной функции) прим. автора.

Получив характеристическое уравнение:

$$D(p) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + a_3p^3$$

и проконтролировав положительность всех коэффициентов, заполним матрицу Гурвица, для системы третьего порядка (по максимальной степени p в характеристическом уравнении):

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix};$$

или в нашем случае:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0.725 & 51 & 0 \\ 0.05 & 4.85 & 0 \\ 0 & 0.725 & 51 \end{vmatrix};$$

согласно критерию Гурвица, система устойчива, если все диагональные миноры матрицы Гурвица имеют один знак, проверим:

$$\Delta_1 = |0.725| = 0.725 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0.725 & 51 \\ 0.05 & 4.85 \end{vmatrix} = 0.725 \cdot 4.85 - 0.05 \cdot 51 = 3.51625 - 2.55 = 0.96625 > 0;$$

$$\Delta_3 = \Delta_2 \cdot a_0 = \Delta_2 \cdot 51 = 0.96625 \cdot 51 = 49.27875 > 0.$$

Следовательно, данная система – устойчива. Найдем запас устойчивости в данной системе по коэффициенту передачи, для этого запишем характеристическое уравнение системы в общем виде:

$$\begin{aligned}
D(p) &= k(1 + T_1 p) + (1 + T_2 p)(1 + T_3 p)(1 + T_4 p) = \\
&= k + kT_1 p + 1 + (T_2 + T_3 + T_4)p + (T_2 T_3 + T_3 T_4 + T_2 T_4)p^2 + T_2 T_3 T_4 p^3 \\
&= k + 1 + (kT_1 + T_2 + T_3 + T_4)p + (T_2 T_3 + T_3 T_4 + T_2 T_4)p^2 + T_2 T_3 T_4 p^3;
\end{aligned}$$

подставим в характеристическое уравнение значения всех параметров, кроме того, по которому необходимо определить запас.

$$\begin{aligned}
D(p) &= (k+1) + (0.05 \cdot k + 0.1 + 2 + 0.25)p + (0.1 \cdot 2 + 2 \cdot 0.25 + 0.1 \cdot 0.25)p^2 \\
&+ (0.1 \cdot 2 \cdot 0.25)p^3 = (k+1) + (0.05 \cdot k + 2.35)p + 0.725p^2 + 0.05p^3;
\end{aligned}$$

снова заполним матрицу Гурвица:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0.725 & k+1 & 0 \\ 0.05 & 0.05 \cdot k + 2.35 & 0 \\ 0 & 0.725 & k+1 \end{vmatrix};$$

согласно критерию Гурвица, система находится на границе устойчивости, если хотя бы один диагональный минор матрицы Гурвица был равен нулю:

$$\Delta_1 = |0.725 \cdot k| = 0;$$

выполняется при любом k

$$\begin{aligned}
\Delta_2 &= \begin{vmatrix} 0.725 & 1+k \\ 0.05 & 0.05 \cdot k + 2.35 \end{vmatrix} = 0.725 \cdot (0.05 \cdot k + 2.35) - 0.05 \cdot (1+k) = \\
&= 0.03625 \cdot k + 3.075 - 0.05 - 0.05 \cdot k = k(0.03625 - 0.05) + 3.075 - 0.05 \geq 0 \\
&= 3.025 - 0.01375 \cdot k \geq 0;
\end{aligned}$$

$$k = \frac{3.025}{0.01375} \leq 220;$$

$$\Delta_3 = \Delta_2 \cdot a_0 = \Delta_2 \cdot (1+k) = (3.025 - 0.01375 \cdot k)(1+k) \geq 0;$$

$$\Delta_3 = 3.025 + 3.025 \cdot k - 0.01375 \cdot k - 0.01375 \cdot k^2 \geq 0;$$

$$\Delta_3 = 3.025 + 3.01125 \cdot k - 0.01375 \cdot k^2.$$

Получилось квадратное уравнение, решим его:

$$\Delta_3 = 3.025 + 3.01125 \cdot k - 0.01375 \cdot k^2 = 0.$$

Получены корни уравнения -1 и 220 , но так как $\Delta_3 \geq 0$, то $220 \geq k \geq -1$. Далее выбираем диапазон изменения коэффициента передачи системы, удовлетворяющий всем условиям:

$$\begin{cases} k \leq 220; \\ 220 \geq k \geq -1; \end{cases}$$

$$220 \geq k \geq -1.$$

Коэффициент передачи не должен быть отрицательным, т.к. в этом случае отрицательная обратная связь в системе станет положительной и начальные условия анализа системы станут не верны. Поэтому коэффициент передачи системы при условии устойчивой работы может быть не более 220 раз.

Для определения запаса устойчивости системы по заданному параметру, выберем значение параметра из полученных выше, которое ближе остальных к исходному значению (в нашем случае $k=50$). Напомню, что параметры элементов схемы могут быть только положительными! Запас устойчивости по коэффициенту передачи будет отношение максимально возможного коэффициента

передачи к исходному: $запас = \frac{k_{\max}}{k} = \frac{220}{50} = 4.4 \text{ раз.}$

Критерий Найквиста. Согласно критерию Найквиста можно судить об устойчивости замкнутой системы по характеристическому уравнению разомкнутой. Определим характеристическое уравнение заданной разомкнутой системы, для этого запишем *данную в задании передаточную функцию разомкнутой системы*, возьмем тот же пример:

$$W_p(p) = \frac{k(1 + T_1 p)}{(1 + T_2 p)(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)},$$

где

$$k = 50;$$

$$T_1 = 0.05;$$

$$T_2 = 0.1;$$

$$T_3 = 2;$$

$$T_4 = 0.25.$$

Критерий Найквиста гласит: для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы «годограф Найквиста» – амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы – при движении p по часовой стрелке не охватывал точку $[-1; j0]$. Построим «годограф Найквиста» (АФХ разомкнутой системы) см. рис. 3.6.

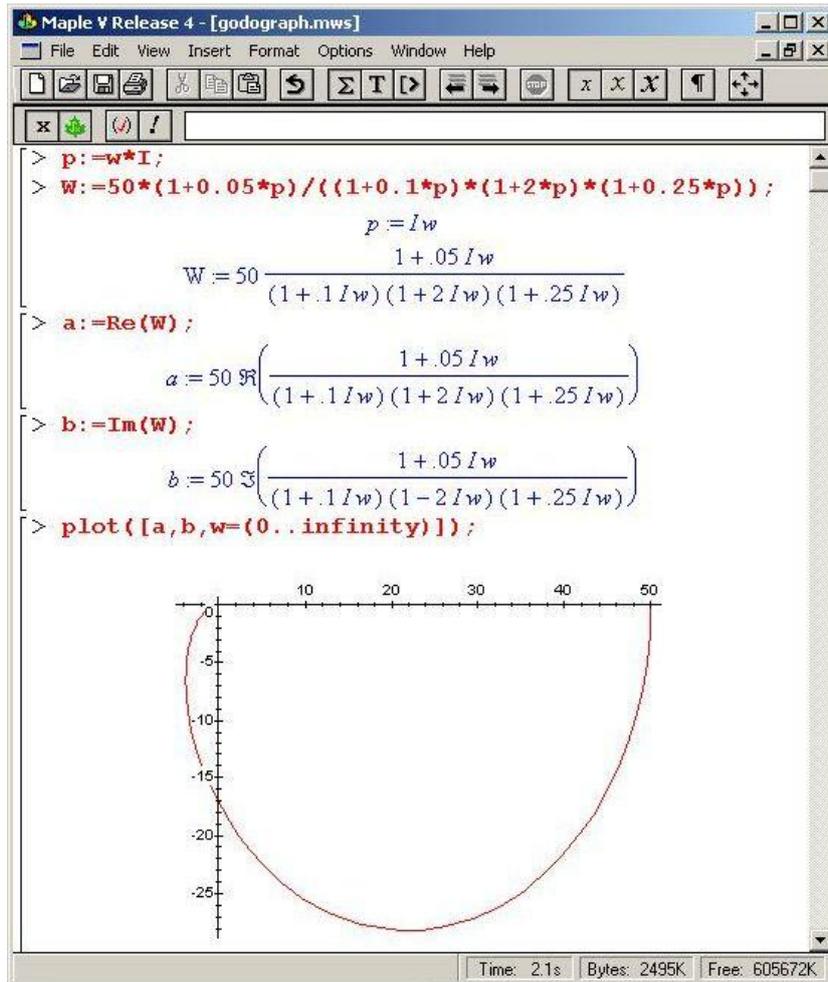


Рис. 3.6 – Построение годографа Найквиста

Или более подробно нужный участок, рис. 3.7.

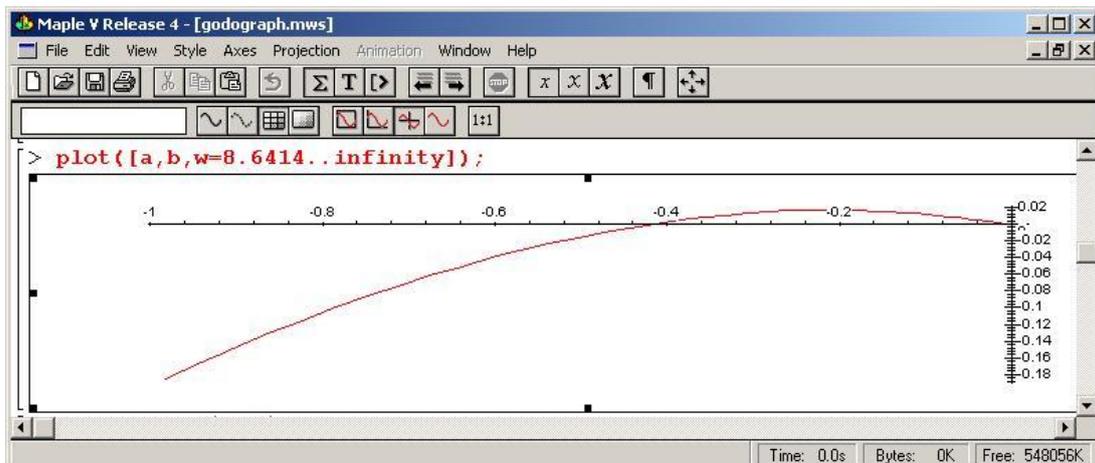


Рис. 3.7 – Фрагмент годографа Найквиста

Из рис. 3.6 видно, что «годограф Найквиста» представляет собой кривую, начинающуюся на реальной оси, и без разрывов заканчивается в начале координат по часовой стрелке. При этом годограф не охватывает точку $[-1;j0]$, что хорошо видно на рис. 3.7, из чего делаем вывод: *исследуемая замкнутая система – устойчива.*

Для нахождения запаса устойчивости по усилению (коэффициенту передачи) воспользуемся логарифмической формой критерия Найквиста. Для определения запасов устойчивости согласно логарифмической форме критерия Найквиста построим ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы в одинаковом масштабе по частоте, для этого воспользуемся методикой, описанной выше, график исследуемой системы представлен на рисунке (рис. 3.8).

Запас устойчивости по коэффициенту передачи согласно логарифмической форме критерия Найквиста определяется как коэффициент передачи (в децибелах *дБ*) на критической частоте (частота на которой фазовый сдвиг в системе достигает -180°) [1]. По графику запас устойчивости можно определить только приблизительно (в нашем случае примерно 6–8 *дБ*), для получения более точного ответа необходимо записать аналитическое выражение. Сначала надо найти критическую частоту из условия равенства фазовой характеристики ста восьмидесяти градусам, а затем найти коэффициент передачи в децибелах на этой частоте.

$$\begin{cases} \varphi(\omega_{кр}) = 180^\circ; \\ L(\omega_{кр}). \end{cases}$$

Фазовая характеристика:

$$\varphi(\omega_{кр}) = \arctan \frac{\operatorname{Im}(W(j\omega_{кр}))}{\operatorname{Re}(W(j\omega_{кр}))} = 180^\circ;$$

$$\frac{\operatorname{Im}(W(j\omega_{кр}))}{\operatorname{Re}(W(j\omega_{кр}))} = \tan(180^\circ) = 0.$$

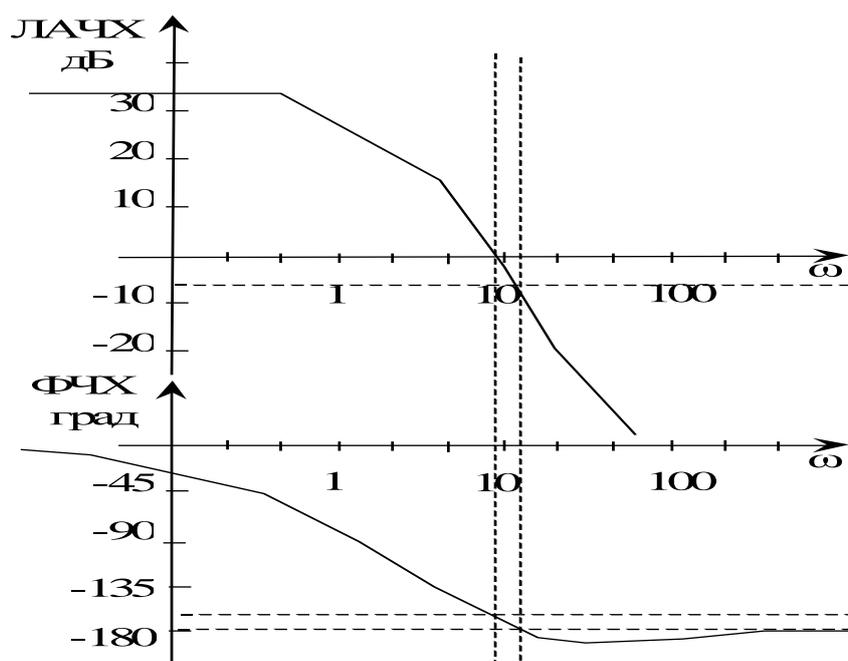


Рис. 3.8 – Линеаризованные логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики (диаграмма Бode) исследуемой системы

Для расчета продолжим начатую программу, рис. 3.9.

```

Maple V Release 4 - [godograph.mws]
File Edit View Insert Format Options Window Help
C 2D Output Times New Roman 12
> ws := solve(b/a=0, w);
ws = 12.93339581
> L := 50*(1+0.05*I*ws)/((1+0.1*I*ws)*(1+2*I*ws)*(1+0.25*I*ws));
L = -.4157218446 - .1541748758 10^-10 I
> abs(L);
.4157218446
Time: 4.5s Bytes: 3263K Free: 513528K

```

Рис. 3.9 – Расчет критической частоты и коэффициента передачи на этой частоте

Расчет показывает, что критическая частота для исследуемой системы равна 12,933 радиан в секунду, коэффициент передачи системы на критической частоте 0,416 раз или $A(\omega_{кр}) = 20 \cdot \log(0.4157218446) = -7.62394$ дБ. Запас устойчивости по амплитуде (коэффициенту передачи) может быть выражен

как в размах $\Delta L = 1/0.4157218446 = 2.4054$ раз, так и в децибелах $\Delta L = 1/A(\omega_{кр}) = 0 - 20 \cdot \log(0.4157218446) = 7.62394$ дБ.

Расчет запаса устойчивости по фазе также может быть определен как по графику, так и аналитически. Графически запас устойчивости по фазе равен разности фазового сдвига в системе на частоте среза (частоте, на которой коэффициент передачи системы равен единице) и ста восьмидесяти градусов. Аналитически расчет проводят так: определяют частоту среза; находят фазовый сдвиг в системе на этой частоте и вычитают его из ста восьмидесяти градусов.

$$\begin{cases} \Delta L = A(\omega_{cp}) = 1; \\ \varphi(\omega_{cp}); \end{cases}$$

АЧХ

$$\Delta L = \sqrt{\operatorname{Re}(W(j\omega_{cp})) + \operatorname{Im}(W(j\omega_{cp}))} = 1;$$

$$\Delta \varphi = 180^\circ - \varphi(\omega_{cp}) = \pi - \arctan \frac{\operatorname{Im}(W(j\omega_{cp}))}{\operatorname{Re}(W(j\omega_{cp}))};$$

запас устойчивости по фазе может быть выражен как в градусах, так и в радианах.

Аналитически переходную характеристику, кроме непосредственного решения дифференциального уравнения, можно определить по переходной функции с помощью преобразования Лапласа:

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{p} W(p) \right]_{t \geq 0},$$

где $L^{-1}[\]$ – оператор обратного преобразования Лапласа.

В литературе имеются подробные таблицы преобразований Лапласа, упрощающие расчет переходной функции $h(t)$.

Экспериментально, переходная характеристика может наблюдаться на пример, на экране осциллографа, при подаче на вход системы последовательности прямоугольных импульсов длительностью, заведомо большей длительности переходных процессов в системе. Вид переходной характеристики показан на рис. 3.10.

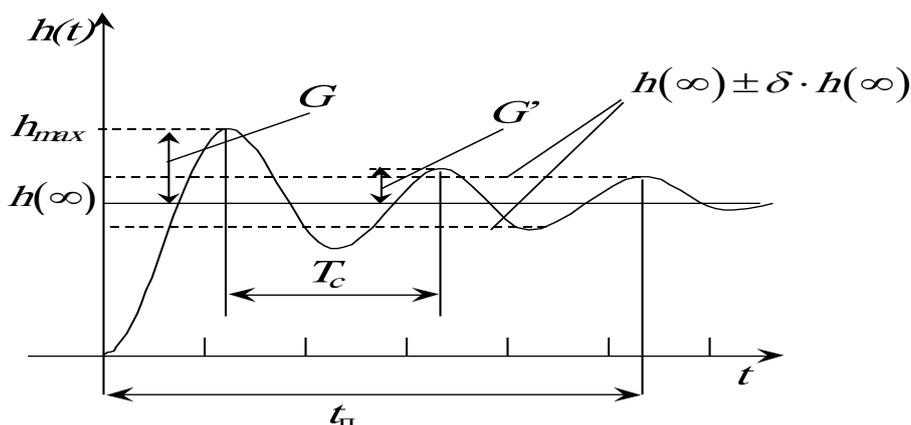


Рис. 3.10 – Переходная характеристика системы управления

По переходной характеристике можно определить следующие показатели качества работы системы:

- длительность переходного процесса;
- величину перерегулирования;
- колебательность переходного процесса;
- период собственных колебаний системы;
- число колебаний в течение переходного процесса

и другие.

Длительность переходного процесса t_{π} , определяемого как интервал времени от момента подачи единичного сигнала на вход системы до момента, когда отклонение выходного сигнала от установившегося значения будет достаточно мало (в пределах заданной ошибки), $t_{\pi} = f(h(\infty) \cdot \delta)$.

Величина перерегулирования σ , характеризующая максимальное отклонение выходного сигнала h_{max} от установившегося значения $h(\infty)$ $\sigma = \frac{h_{max} - h(\infty)}{h(\infty)} \cdot 100\%$.

Колебательность переходного процесса, равная отношению соседних максимумов переходной характеристики $C = \frac{G'}{G} \cdot 100\%$.

Период собственных колебаний системы определяется как временной отрезок между соседними максимумами T_c .

3.2.2 Задание №1

Для выполнения задания необходимо преобразовать структурную схему системы радиоавтоматики и получить передаточ-

ную функцию системы в общем виде. Структурная схема исследуемой системы выбирается из таблицы (табл. 3.2) по номеру варианта и номеру схемы задания (табл. 3.1). Вид типовых радиотехнических звеньев исследуемой системы выбирается из таблицы 3.3, параметры звеньев – из таблицы 3.4. Пример выполнения первого задания первой контрольной работы приведен в п. 3.2.6.

Таблица 3.2

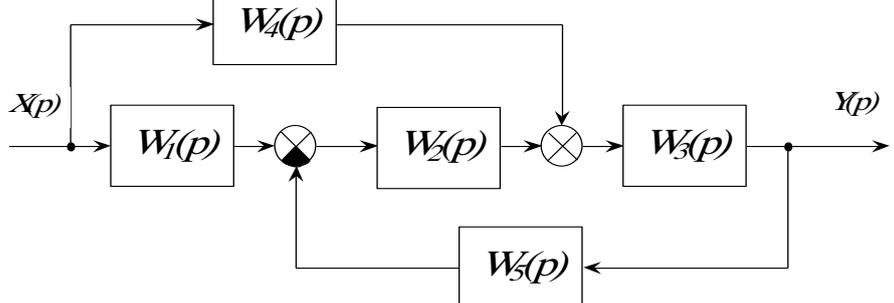
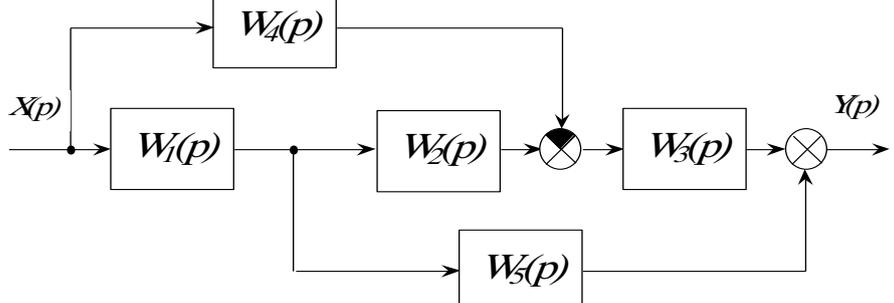
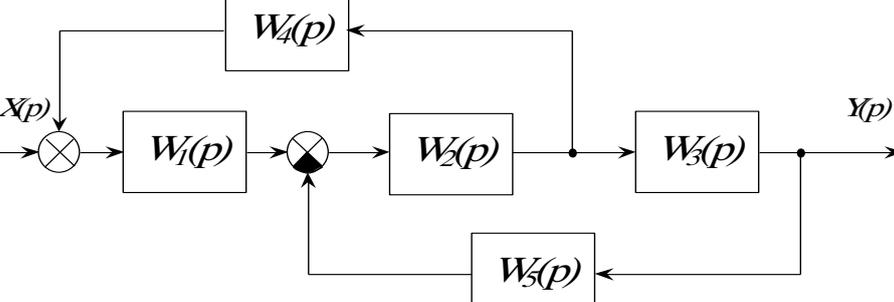
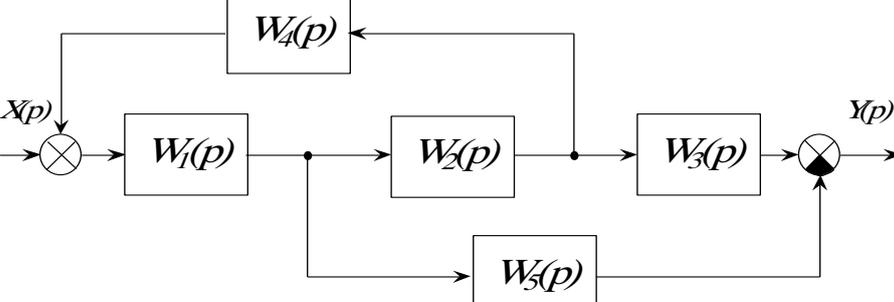
№ схемы	Структурная схема системы
1	
2	
3	
4	

Таблица 3.3

№	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	$W_5(p)$	Примечание
1	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{1}{T_3 p}$	k_4	$T_5 p$	
2	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{1}{T_3 p}$	$T_4 p$	k_5	
3	e^{-pT_1}	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
4	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	e^{-pT_3}	$T_4 p$	k_5	
5	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{1}{T_3 p}$	k_4	$T_5 p$	
6	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
7	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{1}{T_3 p}$	k_4	$T_5 p$	
8	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{1}{T_3 p}$	$T_4 p$	k_5	
9	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
10	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{1}{T_3 p}$	$T_4 p$	k_5	
11	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{1}{T_3 p}$	k_4	$T_5 p$	
12	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
13	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	k_4	$T_5 p$	
14	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	$T_4 p$	k_5	
15	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
16	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{1}{T_3 p}$	$T_4 p$	k_5	
17	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	k_4	$T_5 p$	

Продолжение табл. 3.3

№	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	$W_5(p)$	Примечание
18	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
19	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$(1+T_2 p)$	$(1+T_3 p)$	k_4	$T_5 p$	
20	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	k_5	
21	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
22	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	$T_4 p$	k_5	
23	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	k_4	$T_5 p$	
24	$(1+T_1 p)$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
25	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$(1+T_3 p)$	k_4	$T_5 p$	
26	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	k_5	
27	$(1+T_1 p)$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
28	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$(1+T_2 p)$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	k_5	
29	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	k_4	$T_5 p$	
30	$\frac{1}{T_1 p}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
31	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$(1+T_2 p)$	e^{-pT_3}	k_4	$T_5 p$	
32	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	e^{-pT_3}	$T_4 p$	k_5	
33	$\frac{1}{T_1 p}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
34	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	k_5	

Продолжение табл. 3.3

№	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	$W_5(p)$	Примечание
35	$(1+T_1p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2T_2p+T_2^2p^2}$	e^{-pT_3}	k_4	T_5p	
36	e^{-pT_1}	$(1+T_2p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3T_3p+T_3^2p^2}$	T_4p	k_5	
37	$\frac{k_1}{1+2\xi_1T_1p+T_1^2p^2}$	$\frac{1}{T_2p}$	e^{-pT_3}	k_4	T_5p	
38	$\frac{1}{T_1p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2T_2p+T_2^2p^2}$	e^{-pT_3}	T_4p	k_5	
39	e^{-pT_1}	$(1+T_2p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3T_3p+T_3^2p^2}$	k_4	k_5	
40	$\frac{k_1}{1+2\xi_1T_1p+T_1^2p^2}$	$(1+T_2p)$	e^{-pT_3}	T_4p	k_5	
41	$\frac{1}{T_1p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2T_2p+T_2^2p^2}$	e^{-pT_3}	k_4	T_5p	
42	e^{-pT_1}	$\frac{1}{T_2p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3T_3p+T_3^2p^2}$	T_4p	k_5	
43	$\frac{k_1}{1+2\xi_1T_1p+T_1^2p^2}$	$(1+T_2p)$	$\frac{1}{T_3p}$	k_4	T_5p	
44	$(1+T_1p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2T_2p+T_2^2p^2}$	$\frac{1}{T_3p}$	T_4p	k_5	
45	e^{-pT_1}	$\frac{1}{T_2p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3T_3p+T_3^2p^2}$	k_4	k_5	
46	$\frac{k_1}{1+2\xi_1T_1p+T_1^2p^2}$	$\frac{1}{T_2p}$	e^{-pT_3}	T_4p	k_5	
47	$(1+T_1p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2T_2p+T_2^2p^2}$	$\frac{1}{T_3p}$	k_4	T_5p	
48	$(1+T_1p)$	$\frac{1}{T_2p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3T_3p+T_3^2p^2}$	T_4p	k_5	
49	$\frac{k_1}{1+2\xi_1T_1p+T_1^2p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2p)}$	$\frac{k_3}{(1+T_3p)}$	k_4	T_5p	
50	$\frac{k_1}{(1+T_1p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2T_2p+T_2^2p^2}$	$\frac{k_3}{(1+T_3p)}$	T_4p	k_5	
51	$(1+T_1p)$	$\frac{1}{T_2p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3T_3p+T_3^2p^2}$	k_4	k_5	

Продолжение табл. 3.3

№	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	$W_5(p)$	Примечание
52	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{1}{T_3 p}$	$T_4 p$	k_5	
53	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	k_4	$T_5 p$	
54	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
55	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	k_4	$T_5 p$	
56	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	$T_4 p$	k_5	
57	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
58	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	$T_4 p$	k_5	
59	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	k_4	$T_5 p$	
60	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
61	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$(1+T_3 p)$	k_4	$T_5 p$	
62	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	k_5	
63	$(1+T_1 p)$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
64	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	$T_4 p$	k_5	
65	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	k_4	$T_5 p$	
66	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
67	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p + T_1^2 p^2}$	$T_2 p$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p + T_3^2 p^2}$	k_4	$T_5 p$	
68	$\frac{1}{T_1 p}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p + T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	$T_5 p$	

Окончание табл. 3.3

№	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	$W_5(p)$	Примечание
69	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$(1+T_2 p)$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
70	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	k_5	
71	$T_1 p$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	$\frac{1}{T_3 p}$	$T_4 p$	$T_5 p$	
72	e^{-pT_1}	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
73	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	e^{-pT_3}	k_4	$T_5 p$	
74	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	e^{-pT_3}	$T_4 p$	k_5	
75	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$T_2 p$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	k_4	k_5	
76	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	$\frac{1}{T_2 p}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
77	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	e^{-pT_3}	k_4	$T_5 p$	
78	e^{-pT_1}	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	$T_4 p$	k_5	
79	$\frac{k_1}{1+2\xi_1 T_1 p+T_1^2 p^2}$	k_2	$\frac{k_3}{1+2\xi_3 T_3 p+T_3^2 p^2}$	k_4	$T_5 p$	
80	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{1+2\xi_2 T_2 p+T_2^2 p^2}$	$(1+T_3 p)$	$T_4 p$	$T_5 p$	

Таблица 3.4

Параметры элементов схемы: (W_1, W_2, W_3) к таблицам 3.2 и 3.3.														
№	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	ξ_1	ξ_2	ξ_3	Примечание
1	10	-	-	1	-	1	10	0,1	-	0,2	0,5	-	-	
2	-	6	-	-	1	3	0.1	0.5	0.3	-	-	0.8	-	
3	-	10	12	3	5	0.01	0.3	2	-	-	-	-	0.1	
4	20	5	-	-	1	0.1	0.3	0.2	0.5	-	0.1	-	-	
5	-	7	-	1	-	0.2	0.1	0.5	-	2	-	0.1	-	
6	-	-	10	-	1	0.3	5	0.1	0.3	-	-	-	0.3	
7	30	5	-	1	-	0.01	0.2	5	-	2	0.2	-	-	
8	5	3	-	-	1	0.9	0.2	0.7	0.2	-	-	0.2	-	
9	-	-	10	7	3	0.8	0.5	0.2	-	-	-	-	0.5	
10	3	-	-	-	1	0.7	0.5	0.2	0.5	-	0.3	-	-	

Продолжение табл. 3.4

Параметры элементов схемы: (W_1, W_2, W_3) к таблицам 3.2 и 3.3.														Примечание
№	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	ξ_1	ξ_2	ξ_3	
11	50	10	-	1	-	0.02	0.1	0.3	-	5	-	0.3	-	
12	40	-	15	-	1	0.1	2	0.5	0.4	-	-	-	0.6	
13	15	-	10	1	-	0.5	0.4	0.25	-	5	0.7	-	-	
14	-	7	25	-	1	0.1	0.5	2.5	0.4	-	-	0.4	-	
15	10	-	3	5	5	0.03	0.3	0.5	-	-	-	-	0.2	
16	20	5	-	-	1	2	0.3	3	0.2	-	0.9	-	-	
17	-	10	25	1	-	0.7	0.4	0.25	-	3	-	0.9	-	
18	-	15	12	-	1	0.2	0.1	0.5	0.1	-	-	-	0.4	
19	30	-	-	1	-	0.3	0.4	0.3	-	3	0.4	-	-	
20	-	5	-	-	1	0.5	0.5	0.3	0.1	-	-	0.7	-	
21	-	5	15	3	3	0.3	0.3	0.5	-	-	-	-	0.7	
22	20	-	10	-	1	0.5	0.1	0.4	0.6	-	0.6	-	-	
23	-	7	-	1	-	0.1	0.2	0.3	-	2	-	0.6	-	
24	-	-	10	-	1	0.2	0.1	0.5	4	-	-	-	0.9	
25	4	-	-	1	-	0.5	0.2	0.1	-	7	0.8	-	-	
26	-	20	-	-	1	0.3	0.5	0.8	5	-	-	0.5	-	
27	-	-	5	10	10	0.2	0.1	0.5	-	-	-	-	0.8	
28	10	-	-	-	1	0.7	0.1	0.2	4	-	1	-	-	
29	-	10	-	1	-	0.3	0.5	0.1	-	8	-	1	-	
30	-	-	20	-	1	0.1	0.7	0.2	0.5	-	-	-	1	
31	5	-	-	1	-	0.01	2	0.4	-	6	0.1	-	-	
32	-	50	-	-	1	0.7	0.2	3	0.3	-	-	0.1	-	
33	-	-	7	5	10	0.1	0.8	0.25	-	-	-	-	0.1	
34	50	-	-	-	1	0.4	0.1	5	0.2	-	0.2	-	-	
35	-	30	-	1	-	0.7	0.5	0.9	-	5	-	0.2	-	
36	-	-	20	-	1	0.3	0.3	5	0.3	-	-	-	0.2	
37	12	-	-	1	-	0.4	0.9	0.2	-	4	0.3	-	-	
38	-	15	-	-	1	0.05	0.5	6	0.1	-	-	0.3	-	
39	-	-	30	5	5	0.9	0.4	0.7	-	-	-	-	0.3	
40	40	-	-	-	1	0.05	2	4	0.2	-	0.4	-	-	
41	-	14	-	1	-	0.2	0.3	0.7	-	2	-	0.4	-	
42	-	-	10	-	1	0.01	0.3	2	1.5	-	-	-	0.4	
43	5	-	-	1	-	0.1	0.3	0.2	-	1	0.5	-	-	
44	-	7	-	-	1	0.2	0.1	0.5	0.7	-	-	0.5	-	
45	-	-	10	2	10	0.3	5	0.1	-	-	-	-	0.5	
46	15	-	-	-	1	0.01	0.2	5	4	-	0.6	-	-	
47	-	12	-	1	-	0.9	0.2	0.7	-	2	-	0.6	-	
48	-	-	14	1	-	0.8	0.5	0.2	0.6	-	-	-	0.6	
49	10	15	25	1	-	0.7	0.5	0.2	-	3	0.7	-	-	
50	10	2	4	-	1	0.02	0.1	0.3	3	-	-	0.7	-	
51	-	-	30	2	2	0.1	2	0.5	-	-	-	-	0.7	
52	8	-	-	-	1	0.5	0.4	0.25	0.8	-	0.8	-	-	
53	15	50	1	1	-	0.1	0.5	2.5	-	4	-	0.8	-	
54	25	5	4	-	1	0.03	0.3	0.5	1.5	-	-	-	0.8	
55	3	-	33	1	-	2	0.3	3	-	5	0.9	-	-	
56	-	15	8	-	1	0.7	0.4	0.25	2	-	-	0.9	-	
57	4	5	10	2	3	0.2	0.1	0.5	-	-	-	-	0.9	
58	10	4	5	-	1	0.3	0.4	0.3	3	-	1	-	-	
59	-	12	8	1	-	0.5	0.5	0.3	-	6	-	1	-	
60	-	16	4	-	1	0.3	0.3	0.5	3	-	-	-	1	
61	10	20	-	1	-	0.5	0.1	0.4	-	7	0.1	-	-	
62	5	30	-	-	1	0.1	0.2	0.3	0.4	-	-	0.1	-	
63	-	14	7	3	2	0.2	0.1	0.5	-	-	-	-	0.1	
64	10	-	8	-	1	0.5	0.2	0.1	2	-	0.2	-	-	

Окончание табл. 3.4

Параметры элементов схемы: (W_1, W_2, W_3) к таблицам 3.2 и 3.3.														
№	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	ξ_1	ξ_2	ξ_3	Примечание
65	6	50	-	1	-	0.3	0.5	0.8	-	8	-	0.2	-	
66	12	-	4	-	1	0.2	0.1	0.5	4	-	-	-	0.2	
67	10	-	40	1	-	0.7	0.1	0.2	-	9	0.3	-	0	
68	-	14	-	-	-	0.3	0.5	0.1	0	0.1	-	0.3	-	
69	5	-	12	12	3	0.1	0.7	0.2	-	-	-	-	0.3	
70	15	3	-	-	1	0.01	2	0.4	6	-	0.4	-	-	
71	-	4	-	-	-	0.7	0.2	3	1	0.2	-	0.4	-	
72	-	6	33	-	1	0.1	0.8	0.25	4	-	-	-	0.4	
73	10	12	-	1	-	0.4	0.1	5	-	0.3	0.5	-	-	
74	20	15	-	-	1	0.7	0.5	0.9	2	-	-	0.5	-	
75	30	-	18	6	4	0.3	0.3	5	-	-	1	-	0.5	
76	40	-	20	2	20	0.4	0.9	0.2	-	-	0	-	0.6	
77	50	1	-	1	-	0.05	0.5	0	-	0.4	-	0.6	-	
78	-	10	4	-	1	0.9	0.4	0.7	0.2	-	-	-	0.6	
79	4	5	7	1	-	0.05	2	4	-	0.5	0.5	-	0.5	
80	25	4	-	-	-	0.2	0.3	0.7	3	1	-	1	-	

* *Примечание:* коэффициенты передачи, постоянные времени для каждого звена разные.

Передаточную функцию системы радиоавтоматики необходимо выразить в виде отношения полиномов $W(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$, где

$$A(p) = a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \quad \text{и}$$

$B(p) = b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0$. Результат расчета передаточной функции представить в виде коэффициентов полинома

числителя $a = [a_m \ a_{m-1} \ \dots \ a_1 \ a_0]$ и знаменателя

$$b = [b_n \ b_{n-1} \ \dots \ b_1 \ b_0], \quad (\text{например: для передаточной функции}$$

системы РА $W(p) = \frac{3p+2}{1.3p^3+2p^2+17p+0.3}$ результат следует

написать в виде $-([3 \ 2], [1.3 \ 2 \ 17 \ 0.3])$.

3.2.3 Задание №2

Построить логарифмические линейно-аппроксимированные (линеаризованные) амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики системы, передаточную функцию и

параметры которой необходимо взять в таблицах (3.5 – 3.6) согласно номеру задания.

Таблица 3.5

№	Передаточная функция	Вариант задания									
		1	9	17	25	33	41	49	57	65	73
1	$W_1(p) = \frac{k(1+Tp)}{(1+T_1p)(1+T_2p)(1+T_3p)}$										
2	$W_2(p) = \frac{k(1+Tp)(1+T_1p)}{(1+2\xi T_2p+T_2^2p^2)(1+T_3p)}$										
3	$W_3(p) = \frac{k(1+Tp)(1+T_1p)p}{(1+2\xi T_2p+T_2^2p^2)(1+T_3p)}$										
4	$W_4(p) = \frac{k(1+Tp)(1+T_1p)}{p(1+2\xi T_2p+T_2^2p^2)(1+T_3p)}$										
5	$W_5(p) = \frac{k(1+Tp)p^2}{(1+T_1p)(1+T_2p)(1+T_3p)}$										
6	$W_6(p) = \frac{k(1+Tp)p}{(1+T_1p)(1+T_2p)(1+T_3p)}$										
7	$W_7(p) = \frac{k(1+Tp)(1+T_1p)(1+T_2p)}{p^2(1+2\xi T_3p+T_3^2p^2)}$										
8	$W_8(p) = \frac{k(1+Tp)p^2}{(1+T_1p)(1+T_2p)(1+T_3p)}$										

Таблица 3.6

№	k	T	T ₁	T ₂	T ₃	ξ	Вариант задания							
							1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	0.01	2	0.05	0.1	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	5	5	0.1	0.02	1	0.2	9	10	11	12	13	14	15	16
3	20	0.02	1	0.01	0.2	0.3	17	18	19	20	21	22	23	24
4	4	2	0.2	0.1	2	0.4	25	26	27	28	29	30	31	32
5	15	0.05	0.5	5	0.5	0.5	33	34	35	36	37	38	39	40
6	3	1	0.5	2	5	0.6	41	42	43	44	45	46	47	48
7	25	0.1	0.2	1	0.1	0.7	49	50	51	52	53	54	55	56
8	2	0.5	1	0.5	1	0.8	57	58	59	60	61	62	63	64
9	30	0.2	0.1	0.2	0.2	0.9	65	66	67	68	69	70	71	72
10	1	0.2	2	0.1	2	1	73	74	75	76	77	78	79	80

*Примечание. Если передаточная функция не содержит коэффициента затухания, его необходимо проигнорировать.

Для удобства построения постоянные времени и частоты сопряжения выбраны из бесконечного ряда:

...0.001; 0.002; 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; ...

что соответствует сопрягающим частотам и постоянным времени

из того же ряда согласно формуле: $\omega_i = \frac{1}{T_i}$. Пример выполнения

второго задания первой контрольной работы приведен в п. 3.2.6.

Результат необходимо представить в виде последовательно меняющихся наклонов характеристики и частот сопряжения для АЧХ и ФЧХ, например:

АЧХ – –20 дБ, 0.5 Гц, 0 дБ, 10 Гц, –20 дБ, 20 Гц, –40 дБ, 100 Гц, –20 дБ
 ФЧХ – 0°, 0.05 Гц, 45°, 1 Гц, 0°, 2 Гц, –45°, 5 Гц, –90°, 10 Гц, –45°, 100 Гц, 0°, 200 Гц, 45°, 1000 Гц, 0°.

Также в качестве ответа желательно представить рисунки АЧХ и ФЧХ исследуемой системы в формате MS Word, BMP, GIF, JPG.

3.2.4 Задание №3

Исследовать на устойчивость и определить запасы устойчивости, по заданному в таблице 3.7 параметру, замкнутой системы управления по заданной *передаточной функции разомкнутой системы PA*, которая находится в таблице 3.5, а параметры и критерий устойчивости приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

№	k	T	T_1	T_2	T_3	ξ	Вариант задания	Критерий	Параметр
1	10	0.01	2	0.05	0.1	0.1	1 – 8	Гурвица	k
2	5	5	0.1	0.02	1	0.2	9 – 16	Найквиста	ΔA
3	20	0.02	1	0.01	0.2	0.3	17 – 24	Гурвица	T_2
4	4	2	0.2	0.1	2	0.4	25 – 32	Найквиста	$\Delta \varphi$
5	15	0.05	0.5	5	0.5	0.5	33 – 40	Гурвица	T
6	3	1	0.5	2	5	0.6	41 – 48	Найквиста	ΔA
7	25	0.1	0.2	1	0.1	0.7	49 – 56	Гурвица	T_1
8	2	0.5	1	0.5	1	0.8	57 – 64	Найквиста	$\Delta \varphi$
9	30	0.2	0.1	0.2	0.2	0.9	65 – 72	Гурвица	T_3
10	1	0.2	2	0.1	2	1	73 – 80	Найквиста	ΔA

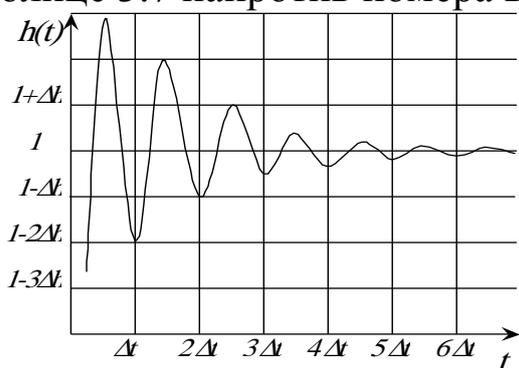
Пример выполнения третьего задания первой контрольной работы приведен в п. 3.2.6.

Результат необходимо привести в смешанном виде – текст (устойчива – неустойчива) и число(а) запасов устойчивости по амплитуде или фазе (для критерия Найквиста) или по заданному параметру (для критерия Гурвица).

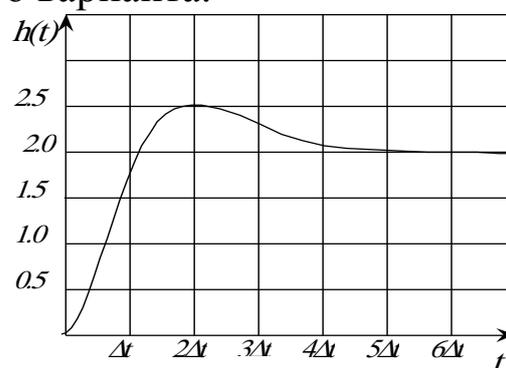
3.2.5 Задание №4

Определить один из качественных показателей (частотный или временной) системы радиоавтоматики (длительность переходного процесса, величину перерегулирования, колебательность переходного процесса, частоту собственных колебаний системы,

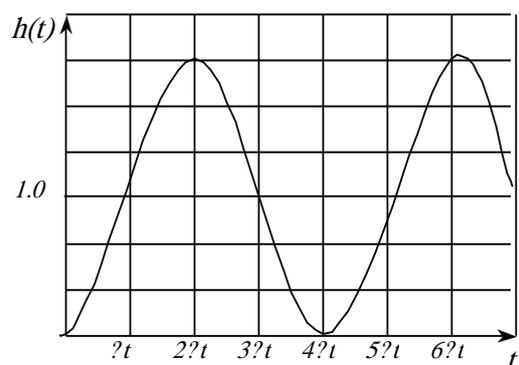
полосу пропускания системы) по переходной характеристике системы. Вопрос, на который необходимо ответить, находится в таблице 3.7 напротив номера вашего варианта.



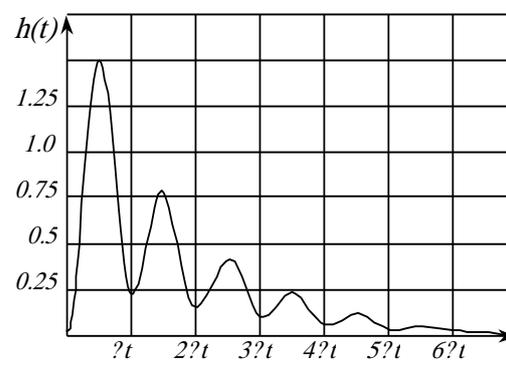
а)



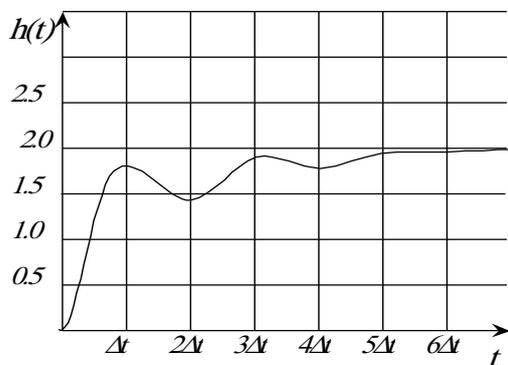
б)



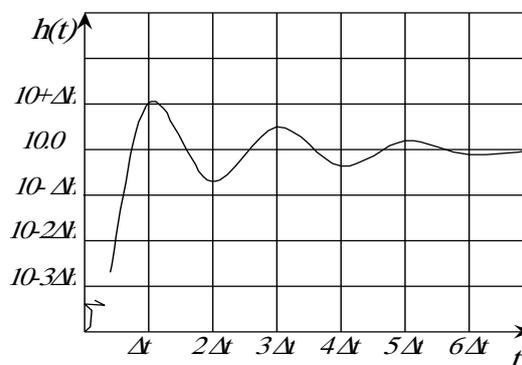
в)



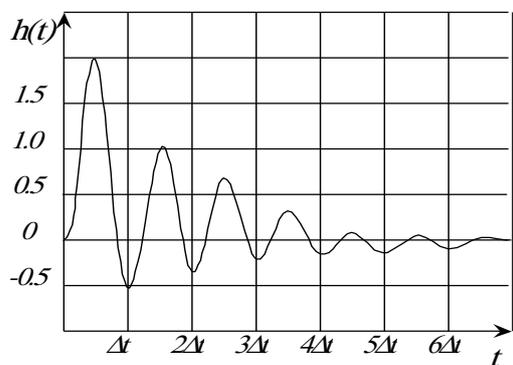
г)



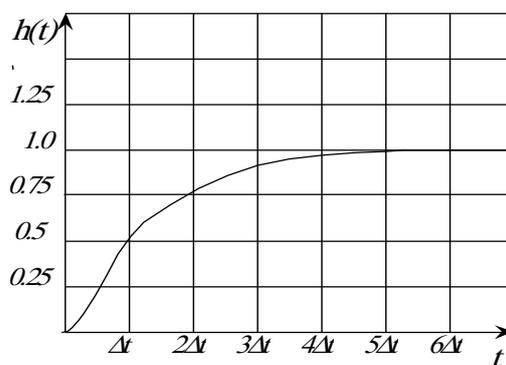
д)



е)



ж)



з)

Рис. 3.11 – Графики переходного процесса к таблице 3.8

Таблица 3.8

Вар.	Вопрос	Δh	Δt	δ	Рис
1	Определить частоту собственных колебаний	-	0,1	-	а.
2	Определить время переходного процесса	0,25	0,1	15%	а.
3	Определить величину перерегулирования системы	0,2	-	-	е.
4	Определить период собственных колебаний	-	0,1	-	а.
5	Определить время переходного процесса	1,5	0,1	15%	е.
6	Определить колебательность переходного процесса	0,1	-	-	г.
7	Указать рисунок (рисунки), на котором (которых) показан переходный процесс консервативно-го звена				
8	Определить частоту собственных колебаний	-	0,2	-	е.
9	Определить время переходного процесса	0,15	0,2	15%	а.
10	Определить величину перерегулирования системы	0,01	-	-	а.
11	Определить период собственных колебаний	-	0,2	-	е.
12	Определить время переходного процесса	2,5	0,15	15%	е.
13	Определить колебательность переходного процесса	-	-	-	ж.
14	Указать рисунок (рисунки), на котором (которых) показан переходный процесс апериодическо-го звена				
15	Определить частоту собственных колебаний	-	0,05	-	г.
16	Определить время переходного процесса	0,05	0,4	15%	а.
17	Определить величину перерегулирования системы	0,2	-	-	е.
18	Определить период собственных колебаний	-	0,15	-	г.
19	Определить время переходного процесса	2,5	-	10%	е.
20	Определить колебательность переходного процесса	0,1	0,1	-	а.
21	Указать рисунок (рисунки), на котором (которых) показан переходный процесс астатической системы				
22	Определить частоту собственных колебаний	-	0,15	-	а.
23	Определить время переходного процесса	0,25	0,1	10%	а.
24	Определить величину перерегулирования системы	0,02	-	-	а.
25	Определить период собственных колебаний	-	0,05	-	д.
26	Определить время переходного процесса	2	0,1	10%	е.
27	Определить колебательность переходного процесса	1	-	-	е.
28	Указать рисунок (рисунки), на котором (которых) показан переходный процесс колебательного звена				
29	Определить частоту собственных колебаний	-	0,25	-	е.
30	Определить время переходного процесса	0,2	0,2	10%	а.
31	Определить величину перерегулирования системы	0,5	-	-	е.
32	Определить период собственных колебаний	-	0,25	-	е.
33	Определить время переходного процесса	1	0,3	10%	е.
34	Определить колебательность переходного процесса	0,25	-	-	а.
35	Указать рисунок (рисунки), на котором (которых) показан переходный процесс статической системы				
36	Определить частоту собственных колебаний	-	0,3	-	ж.
37	Определить время переходного процесса	0,15	0,1	10%	а.
38	Определить величину перерегулирования системы	0,15	-	-	а.
39	Определить период собственных колебаний	-	0,3	-	ж.
40	Определить время переходного процесса	2,5	0,02	5%	е.
41	Определить колебательность переходного процесса	2,5	-	-	е.
42	Указать рисунок(ки), на котором (которых) показан переходный процесс системы с самой вы-сокой частотой собственных колебаний при $\Delta t=1$				
43	Определить частоту собственных колебаний	-	0,5	-	а.
44	Определить время переходного процесса	0,25	0,04	5%	а.
45	Определить величину перерегулирования системы	1	-	-	е.
46	Определить период собственных колебаний	-	0,5	-	а.
47	Определить время переходного процесса	2	0,5	5%	е.
48	Определить время переходного процесса	0,15	0,5	5%	а.

Окончание табл. 3.8

Вар.	Вопрос	Δh	Δt	δ	Рис
49	Указать рисунок (ки), на котором (которых) показан переходный процесс системы с самой низкой частотой собственных колебаний при $\Delta t=1$				
50	Определить частоту собственных колебаний	-	2	-	в.
51	Определить время переходного процесса	0,2	0,1	5%	а.
52	Определить величину перерегулирования системы	0,2	-	-	а.
53	Определить период собственных колебаний	-	2	-	в.
54	Определить время переходного процесса	0,5	0,2	5%	е.
55	Определить время переходного процесса	0,1	0,2	10%	а.
56	Указать рисунок(ки), на котором (которых) показан переходный процесс системы с самым большим периодом собственных колебаний при $\Delta t=1$				
57	Определить частоту собственных колебаний	-	1	-	е.
58	Определить время переходного процесса	0,1	0,1	5%	а.
59	Определить величину перерегулирования системы	1,5	-	-	е.
60	Определить период собственных колебаний	-	1	-	е.
61	Определить время переходного процесса	1	0,1	5%	е.
62	Определить колебательность переходного процесса	0,15	-	-	а.
63	Указать рисунок(ки), на котором (которых) показан переходный процесс системы с самым малым периодом собственных колебаний при $\Delta t=1$				
64	Определить частоту собственных колебаний	-	5	-	д.
65	Определить время переходного процесса	0,05	0,2	5%	а.
66	Определить величину перерегулирования системы	0,05	-	-	а.
67	Определить период собственных колебаний	-	5	-	д.
68	Определить время переходного процесса	1	0,5	2,5%	е.
69	Определить колебательность переходного процесса	1,5	-	-	е.
70	Определить время переходного процесса	0,25	0,05	2,5%	а.
71	Определить частоту собственных колебаний	-	3	-	а.
72	Определить время переходного процесса	0,2	0,4	2,5%	а.
73	Определить величину перерегулирования системы	2,5	-	-	е.
74	Определить период собственных колебаний	-	3	-	а.
75	Определить время переходного процесса	0,2	0,1	1%	е.
76	Определить время переходного процесса	0,1	0,05	1%	а.
77	Определить время переходного процесса	0,25	0,3	2,5%	е.
78	Определить частоту собственных колебаний	-	2,5	-	е.
79	Определить время переходного процесса	0,05	0,1	1%	а.
80	Определить величину перерегулирования системы	0,1	-	-	а.

Пример выполнения четвертого задания первой контрольной работы приведен в п.3.2.6. Полученный ответ необходимо выбрать из таблицы 3.9.

Таблица 3.9

Таблица ответов				
№	0	10	20	30
1	0.1 с.	0.1 Гц.	2 %	а)
2	0.2 с.	0.5 Гц.	3 %	в)
3	0.3 с.	1.25 Гц.	5 %	г)
4	0.4 с.	2.0 Гц.	10 %	д),з)
5	0.5 с.	3.3 Гц.	15 %	г),ж)
6	0.7 с.	6.67 Гц.	25 %	а),г),ж)
7	0.8 с.	10 Гц.	40 %	б),д),з)
8	2.0 с.	20 Гц.	45 %	а),г),е),ж)
9	3.0 с.	100 Гц.	60 %	а),б),д),е),з)
10	10 с.	500 Гц.	66%	Другой

Результат необходимо привести в виде текста (номер, выбранный из таблицы 3.9, например, десяти герцам соответствует номер 17).

3.2.6 Примеры выполнения заданий контрольной работы №1

Пример выполнения первого задания первой контрольной работы. В первом задании первой контрольной работы необходимо преобразовать заданную в таблице 3.2, согласно номеру задания, систему РА и представить в виде отношения степенных полиномов $W(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$. Для этого нужно преобразовать систему

из вида (рис. 3.12, а) в вид (рис. 3.12, б). Затем в полученное выражение подставить передаточные функции звеньев исследуемой системы из таблицы 3.3. (в данном примере см. таблицу 3.10), далее подставить в полученную формулу значения из таблицы 3.4. (в данном примере см. таблицу 3.11) и, упростив выражение, получить передаточную функцию замкнутой системы в виде отношения степенных полиномов $W(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$.

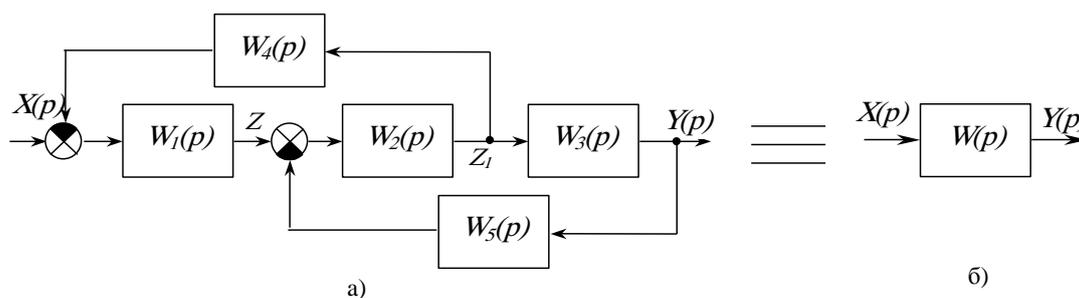


Рис. 3.12 – Преобразование системы радиоавтоматики

Таблица 3.10

№	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$	$W_4(p)$	$W_5(p)$	Примечание
х	$\frac{k_1}{(1+T_1 p)}$	$\frac{k_2}{(1+T_2 p)}$	$\frac{k_3}{(1+T_3 p)}$	k_4	$T_5 p$	

Решение. Последовательность преобразования структурной схемы (рис. 3.12, а) к виду (рис. 3.12, б), на основе правил структурных преобразований [1, 2, 4], представляется следующим алгоритмом: перенос узла ответвления через звено с передаточной функцией $W_3(p)$ (рис. 3.13, а); перенос сумматора через звено с передаточной функцией $W_1(p)$ (рис. 3.13, б); суммирование звеньев цепей обратной связи (рис. 3.13, в).

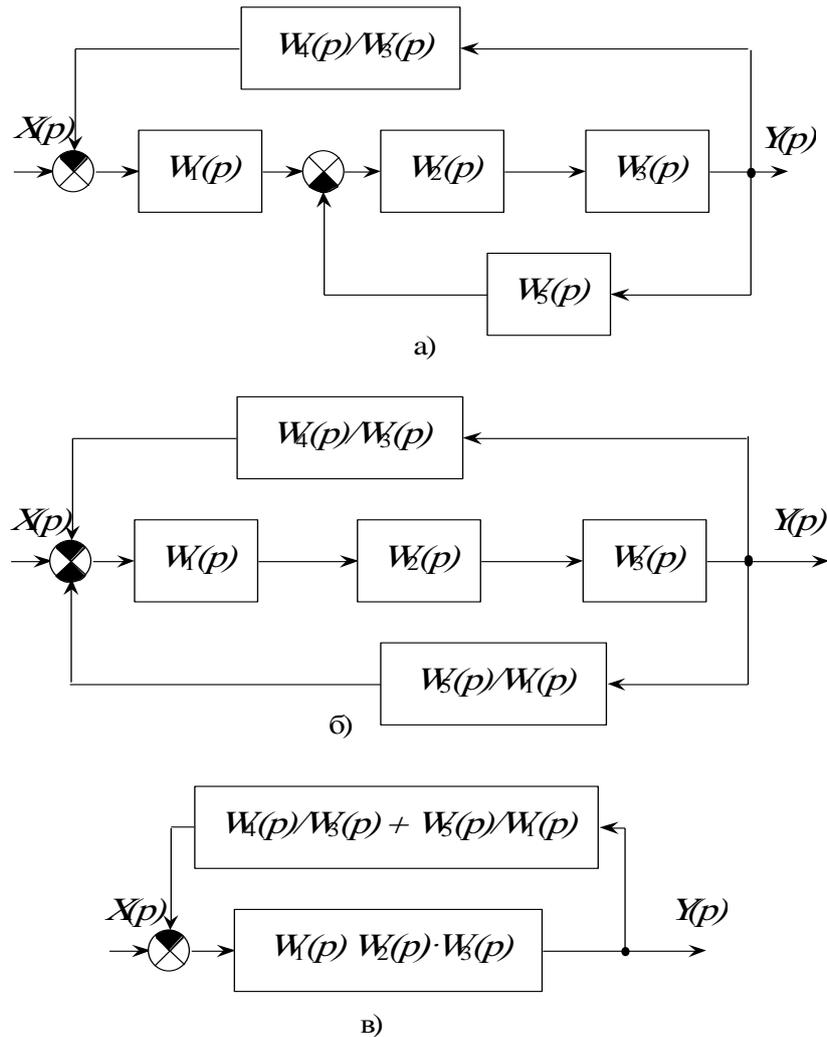


Рис. 3.13 – Пример преобразования структурной схемы исследуемой системы

После структурных преобразований системы РА определим передаточную функцию для системы с обратной связью и представим в виде аналитического выражения:

$$\begin{aligned}
W(p) &= \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot \left(\frac{W_4(p)}{W_3(p)} + \frac{W_5(p)}{W_1(p)} \right)} = \\
&= \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot \left(\frac{W_4(p) \cdot W_1(p) + W_5(p) \cdot W_3(p)}{W_3(p) \cdot W_1(p)} \right)} = \\
&= \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_5(p)}.
\end{aligned}$$

Данным способом сложно преобразовывать «Большие» или «Сложные» системы, содержащие перекрестные связи, поэтому приведу еще один способ преобразования, действующий для систем любой сложности. Способ основан на теории графов. Для решения данной задачи введем дополнительные сигналы z и z_1 , где z – сигнал, получающийся на выходе первого звена, а z_1 – сигнал, получающийся на выходе второго (рис. 3.12, а), затем по структурной схеме составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases}
(X(p) - Z_1(p) \cdot W_4(p)) \cdot W_1(p) = Z(p); \\
(Z(p) - Y(p) \cdot W_5(p)) \cdot W_2(p) = Z_1(p); \\
Z_1(p) \cdot W_3(p) = Y(p),
\end{cases}$$

решив которую относительно $Y(p) = \Psi(X(p))$:

$$\begin{cases}
(X(p) - (Z(p) - Y(p) \cdot W_5(p)) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)) \cdot W_1(p) = Z(p); \\
(Z(p) - Y(p) \cdot W_5(p)) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = Y(p). \\
\begin{cases}
X(p) \cdot W_1(p) - Z(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) + \\
+ Y(p) \cdot W_1(p) \cdot W_5(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) = Z(p); \\
(Z(p) - Y(p) \cdot W_5(p)) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = Y(p).
\end{cases}
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
X(p) \cdot W_1(p) + Y(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p) = \\
= Z(p)(1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)); \\
(Z(p) - Y(p) \cdot W_5(p)) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = Y(p).
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
Z(p) = \frac{X(p) \cdot W_1(p) + Y(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)}; \\
(Z(p) - Y(p) \cdot W_5(p)) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = Y(p).
\end{cases}$$

$$\left(\frac{X(p) \cdot W_1(p) + Y(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)} - Y(p) \cdot W_5(p) \right) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = Y(p);$$

$$\frac{X(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)} =$$

$$= Y(p) + Y(p) \cdot W_5(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) - \frac{Y(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2^2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)};$$

$$\frac{X(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)} =$$

$$\frac{Y(p)}{1 + W_5(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) - \frac{W_1(p) \cdot W_2^2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)}};$$

$$Y(p) = \frac{(X(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p))}{(1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)) \cdot \left(1 + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_5(p) - \frac{W_1(p) \cdot W_2^2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)} \right)};$$

$$Y(p) = \frac{X(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{(1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p)) \cdot (1 + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_5(p)) - W_1(p) \cdot W_2^2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)};$$

$$Y(p) = \frac{X(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_5(p)};$$

получаем формулу для выходного сигнала и подставим в уравнение $W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}$, получим:

$$W(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_4(p) + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_5(p)}.$$

Как видим, данный способ преобразования годится и для многовходовых систем.

Далее подставим значения звеньев структурной схемы из таблицы 3.3 (для примера таблица 3.10) и получим:

$$W(p) = \frac{\frac{k_1}{(1+T_1 p)} \cdot \frac{k_2}{(1+T_2 p)} \cdot \frac{k_3}{(1+T_3 p)}}{1 + \frac{k_1}{(1+T_1 p)} \cdot \frac{k_2}{(1+T_2 p)} \cdot k_4 + \frac{k_2}{(1+T_2 p)} \cdot \frac{k_3}{(1+T_3 p)} \cdot T_5 p};$$

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p)}}{1 + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4}{(1+T_1 p)(1+T_2 p)} + \frac{k_2 \cdot k_3 \cdot T_5 p}{(1+T_2 p)(1+T_3 p)}} = \\ &= \frac{\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p)}}{\frac{(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p) + (k_1 \cdot k_2 \cdot k_4)(1+T_3 p) + (k_2 \cdot k_3 \cdot T_5 p)(1+T_1 p)}{(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p)}} = \\ &= \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{1 + (T_1 + T_2 + T_3)p + (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_1 T_3)p^2 + (T_1 T_2 T_3)p^3 + k_1 k_2 k_4 + (k_1 k_2 k_4 T_3)p + (k_2 k_3 T_5)p + (k_2 k_3 T_1 T_5)p^2} = \\ &= \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{(T_1 T_2 T_3)p^3 + (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_1 T_3 + k_2 k_3 T_1 T_5)p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + k_1 k_2 k_4 T_3 + k_2 k_3 T_5)p + (1 + k_1 k_2 k_4)}. \end{aligned}$$

далее, согласно заданию, представим полученные выражения

числителя и знаменателя в виде полиномов: $W(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$

$$W(p) = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{(T_1 T_2 T_3)p^3 + (T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_1 T_3 + k_2 k_3 T_1 T_5)p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + k_1 k_2 k_4 T_3 + k_2 k_3 T_5)p + (1 + k_1 k_2 k_4)},$$

максимальная степень оператора Лапласа p равна трем, а, значит, полиномы, описывающие передаточные свойства системы, будут не выше третьего порядка:

$$A(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

$$B(p) = b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0,$$

отсюда:

$$a_3 = 0;$$

$$b_3 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3;$$

$$a_2 = 0;$$

$$b_2 = T_1 \cdot T_2 + T_2 \cdot T_3 + T_1 \cdot T_3 + k_2 \cdot k_3 \cdot T_1 \cdot T_5;$$

$$a_1 = 0;$$

и

$$b_1 = T_1 + T_2 + T_3 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot T_3 + k_2 \cdot k_3 \cdot T_5;$$

$$a_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3.$$

$$b_0 = 1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4.$$

Затем подставим значения элементов из таблицы 4.4 в виде таблицы (таблица 3.11).

Таблица 3.11

№	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	ξ_1	ξ_2	ξ_3	Примечание
Ваш	10	3	5	1	-	1	10	0,1	-	0,2	-	-	-	

получим:

$$a_3 = 0;$$

$$a_2 = 0;$$

$$a_1 = 0;$$

$$a_0 = 10 \cdot 3 \cdot 5 = 150.$$

$$b_3 = 1 \cdot 10 \cdot 0.1 = 1;$$

$$b_2 = 1 \cdot 10 + 10 \cdot 0.1 + 1 \cdot 0.1 + 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0.2 = 10 + 1 + 0.1 + 3 = 14.1;$$

и

$$b_1 = 1 + 10 + 0.1 + 10 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 0.1 + 3 \cdot 5 \cdot 0.2 = 17.1;$$

$$b_0 = 1 + 10 \cdot 3 \cdot 1 = 31.$$

Тогда передаточная функция будет выглядеть так:

$$W(p) = \frac{150}{p^3 + 14.1p^2 + 17.1p + 31},$$

полученный результат запишем в форме: $a = [a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0]$; $b = [b_3 \ b_2 \ b_1 \ b_0]$, где сначала идут коэффициенты числителя, затем знаменателя!

$$\text{В нашем случае} - a = [0 \ 0 \ 0 \ 150]; b = [1 \ 14.1 \ 17.1 \ 31].$$

P.S. Расчеты и результаты можно представить и в формате редактора формул «MathType».

Пример выполнения второго задания первой контрольной работы. Во втором задании первой контрольной работы необходимо построить линеаризованную передаточную функцию системы, для чего необходимо определить количество и значения сопрягающих частот системы, передаточная функция которой:

$$W(p) = \frac{k(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}{p(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)} \text{ (взята из таблицы 3.5. согласно номеру задания).}$$

Решение. Заданная передаточная функция представляется в виде произведения типовых звеньев [1]:

$$W(p) = \frac{k(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}{p(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)} = k \cdot (1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 p) \cdot \left(\frac{1}{p}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + T_3 p}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + T_4 p}\right),$$

где T ; $T_1 - T_n$ – постоянные времени звеньев системы, которые находятся в таблице 3.6. и представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12

№	k	T_1	T_2	T_3	T_4	Вариант задания
Ваш	10	2	0.01	0.1	0.05	Ваш вариант

Коэффициент передачи системы в децибелах по формуле $K[\text{дБ}] = 20 \cdot \lg k[\text{раз}]$ и сопрягающие частоты звеньев, входящих в систему по формуле: $\omega_i = \frac{1}{T_i}$, представлены в виде таблицы 3.13:

Таблица 3.13

Коэффициенты	$K[\text{раз}]$	T_1	T_2	T_3	T_4
	10	2	0.01	0.1	0.05
Постоянные времени	$k[\text{дБ}]$	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
	20	0.5	100	10	20

Коэффициент затухания (демпфирования) в нашем случае отсутствует, поэтому мы его проигнорируем.

После чего в логарифмическом масштабе построим графики входящих в систему «типовых» звеньев. Диапазон частот графика целесообразно выбрать из условия: минимальная частота равна не более одной десятой самой меньшей сопрягающей частоты, а максимальная частота в десять или более раз больше максимальной. В нашем случае частоты от $\omega_1/10 = 0.05$ до $\omega_2 \cdot 10 = 1000$ Герц. Построим оси и отметим сопрягающие частоты звеньев:

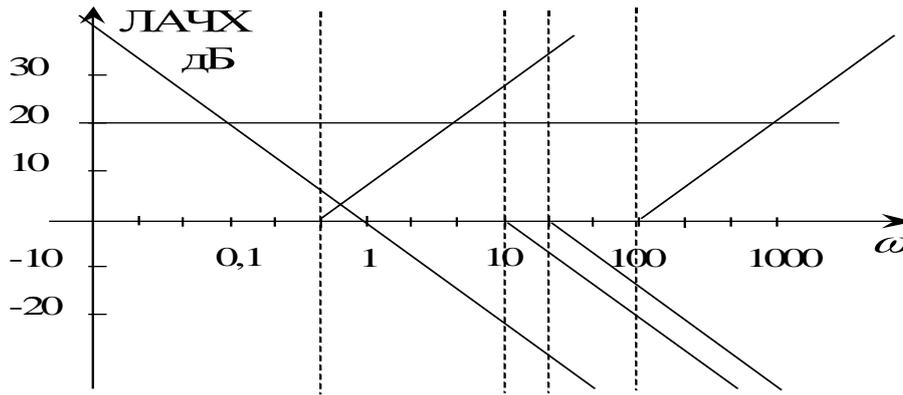


Рис. 3.14 – Логарифмические характеристики типовых радиотехнических звеньев, входящих в исследуемую систему

Затем определим наличие и количество идеальных интегрирующих и дифференцирующих звеньев: в нашей системе присутствует один интегратор (астатическая система первого порядка).

Построим АЧХ всех звеньев системы на одном графике, как описано в [1], рис. 3.14, затем «сложим координаты» всех графиков в децибелах, чтобы получилась одна кривая (рис. 3.15).

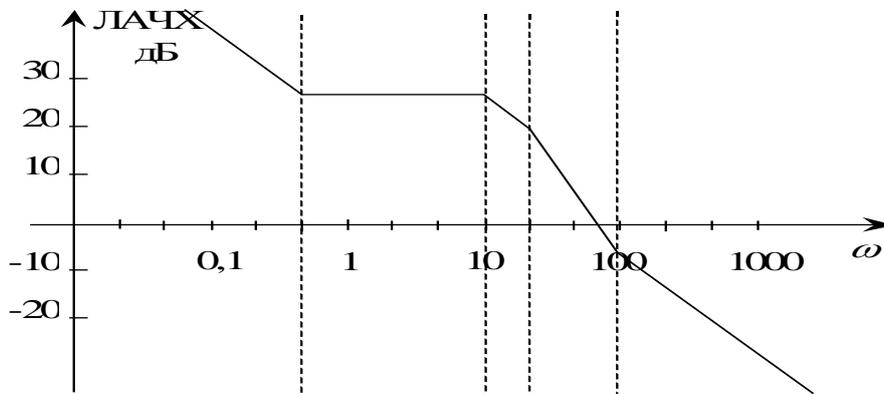


Рис. 3.15 – Суммарная логарифмическая характеристика исследуемой системы

Аналогично поступаем при построении ФЧХ системы за исключением того, что фазы сигналов откладываем по оси в линейном масштабе рис. 3.14, 3.15.

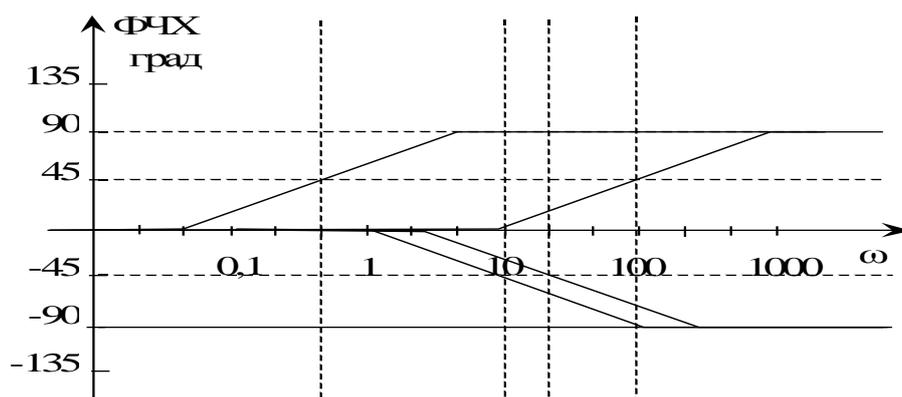


Рис. 3.16 – Фазовые характеристики входящих в исследуемую систему типовых звеньев

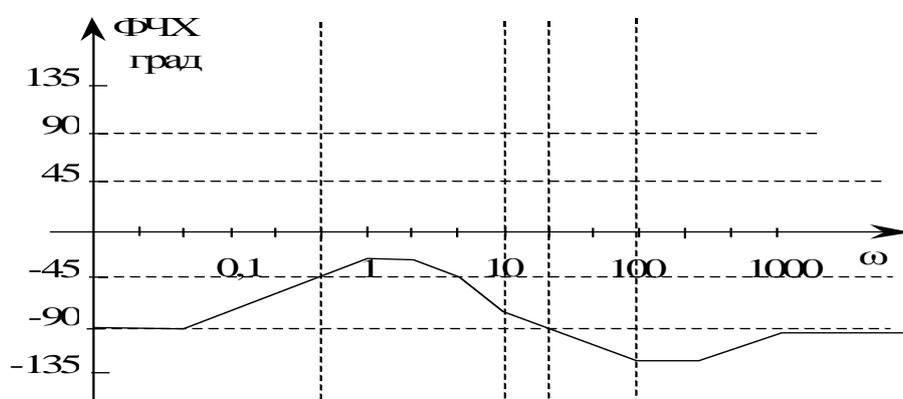


Рис. 3.17 – Суммарная фазовая характеристика исследуемой системы

Таким образом, точки перегиба АЧХ находятся на частотах: 0.5; 10; 20; 100 Герц., а ФЧХ: 0.05; 1; 2; 10; 100; 200; 1000 Герц.

Ответ на второе задание первой контрольной работы запишем в виде:

АЧХ – -20 дБ, 0.5 Гц, 0 дБ, 10 Гц, -20 дБ, 20 Гц, -40 дБ, 100 Гц, -20 дБ

ФЧХ – 0°, 0.05 Гц, 45°, 1 Гц, 0°, 2 Гц, -45°, 5 Гц, -90°, 10 Гц, -45°, 100 Гц, 0°, 200 Гц, 45°, 1000 Гц, 0°.

Также в качестве ответа желательно представить рисунки АЧХ и ФЧХ исследуемой системы в формате MS Word, BMP, GIF, JPG.

Пример выполнения третьего задания первой контрольной работы. В третьем задании первой контрольной работы необходимо определить устойчивость системы и найти запасы её устойчивости по амплитуде, фазе или по заданному параметру (коэф-

фициенту передачи, постоянной времени, коэффициенту демпфирования и т.д.) по имеющейся передаточной функции разомкнутой системы: $W(p) = \frac{k(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}{(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)(T_6 p + 1)}$, см. рис. 3.18,

б.

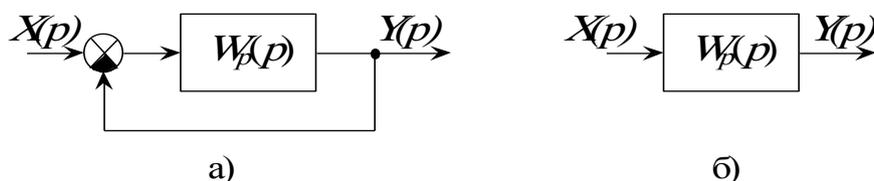


Рис. 3.18 – Замкнутая (а) и разомкнутая (б) системы управления

Решение. Числитель и знаменатель передаточной функции $W_p(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$ представим в виде полиномов, для этого раскроем

скобки:

$$\begin{aligned} A(p) &= k(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) = \\ &= k(T_1 T_2 T_3 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3) p + 1) \end{aligned}$$

отсюда:

$$a_0 = k;$$

$$a_1 = k(T_1 + T_2 + T_3);$$

$$a_2 = k(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3);$$

$$a_3 = k T_1 T_2 T_3,$$

и аналогично для знаменателя:

$$b_0 = 1;$$

$$b_1 = T_4 + T_5 + T_6;$$

$$b_2 = T_4 T_5 + T_4 T_6 + T_5 T_6;$$

$$b_3 = T_4 T_5 T_6.$$

Из таблицы 3.7, (для примера таблица 3.14) в соответствии с заданным вариантом коэффициент передачи и постоянные времени:

Таблица 3.14

№	k	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	Вариант задания	Критерий
Вар.	120	0.02	0,05	0	4	0.25	0.1	Ваш вариант	Гурвица Найквиста

Тогда:

$$a_0 = k = 120;$$

$$a_1 = k(T_1 + T_2 + T_3) = 120(0.02 + 0.05 + 0) = 8.4;$$

$$a_2 = k(T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3) = 120(0.02 \cdot 0.05 + 0 + 0) = 0.12;$$

$$a_3 = kT_1T_2T_3 = 0.$$

$$b_0 = 1;$$

$$b_1 = T_4 + T_5 + T_6 = 4 + 0.25 + 0.1 = 4.35;$$

$$b_2 = T_4T_5 + T_4T_6 + T_5T_6 = 1 + 0.4 + 0.025 = 1.425;$$

$$b_3 = T_4T_5T_6 = 0.1.$$

Запишем *разомкнутую* передаточную функцию:

$$W_p(p) = \frac{0.12p^2 + 8.4p + 120}{0.1p^3 + 1.425p^2 + 4.35p + 1}.$$

Вариант 1. Исследование устойчивости разомкнутой системы по критерию Гурвица.

Для исследования устойчивости системы согласно критерию Гурвица (см. графу «Критерий» таблицы 3.7) замкнем систему, для этого воспользуемся формулой для замкнутой системы:

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} \quad [1, 2, 4], \text{ отрицательной обратной связью (см.}$$

рис. 3.18, а) и выделим характеристическое уравнение (знаменатель передаточной функции). Проще говоря, чтобы получить характеристическое уравнение замкнутой системы, имея передаточную функцию разомкнутой, необходимо сложить полиномы числителя и знаменателя разомкнутой передаточной функции. Таким образом, характеристическое уравнение в нашем примере будет:

$$D(p) = (a_3 + b_3)p^3 + (a_2 + b_2)p^2 + (a_1 + b_1)p + a_0 + b_0.$$

Подставив полученные ранее коэффициенты, получим:

$$D(p) = (0 + 0.1)p^3 + (0.12 + 1.425)p^2 + (8.4 + 4.35)p + 120 + 1 = \\ = 0.1p^3 + 1.545p^2 + 12.75p + 121,$$

затем заполним «матрицу Гурвица», порядок которой совпадает с порядком системы (в нашем случае третий), где

$$D(p) = c_3 p^3 + c_2 p^2 + c_1 p + c_0:$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} c_2 & c_0 & 0 \\ c_3 & c_1 & 0 \\ 0 & c_2 & c_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1.545 & 121 & 0 \\ 0.1 & 12.75 & 0 \\ 0 & 1.545 & 121 \end{vmatrix}$$

для определения устойчивости, согласно критерию Гурвица, необходимо, чтобы все элементы матрицы имели один знак и все главные миноры (определители) матрицы были положительны.

$$\Delta_1 = c_2 = 1.545 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} c_2 & c_0 \\ c_3 & c_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1.545 & 121 \\ 0.1 & 12.75 \end{vmatrix} = 19.69875 - 12.1 = 7.59875 > 0;$$

$$\Delta_3 = c_0 \cdot \Delta_2 = 121 \cdot 7.59875 = 919.44875 > 0.$$

Все определители положительны, следовательно, система устойчива.

Найдем запасы устойчивости по коэффициенту передачи (см. графу «Параметр» таблицы 3.7), для этого в характеристическое уравнение не надо подставлять значение того параметра, по которому нужно найти запас, тогда:

$$a_0 = k;$$

$$a_1 = k(T_1 + T_2 + T_3) = k(0.02 + 0.05 + 0) = 0.07 \cdot k;$$

$$a_2 = k(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) = k(0.02 \cdot 0.05 + 0 + 0) = 0.001 \cdot k;$$

$$a_3 = k T_1 T_2 T_3 = 0.$$

Коэффициенты b_i не изменятся, значит:

$$D = (k+1) + (0.07 \cdot k + 4.35)p + (0.001 \cdot k + 1.425)p^2 + 0.1p^3.$$

Заполним «матрицу Гурвица»:

$$\Delta = \begin{vmatrix} c_2 & c_0 & 0 \\ c_3 & c_1 & 0 \\ 0 & c_2 & c_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.001 \cdot k + 1.425 & k + 1 & 0 \\ 0.1 & 0.07 \cdot k + 4.35 & 0 \\ 0 & 0.001 \cdot k + 1.425 & k + 1 \end{vmatrix},$$

тогда главные определители матрицы:

$$\Delta_1 = c_2 = 0.001 \cdot k + 1.425 > 0;$$

$$k > -1425.$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} c_2 & c_0 \\ c_3 & c_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.001 \cdot k + 1.425 & k + 1 \\ 0.1 & 0.07 \cdot k + 4.35 \end{vmatrix} = (0.001 \cdot k + 1.425)(0.07 \cdot k + 4.35) - 0.1 \cdot (k + 1) > 0;$$

$$\Delta_2 = 0.00007 \cdot k^2 + 0.1041 \cdot k + 6.19875 - 0.1 \cdot k - 0.1 = 0.00007 \cdot k^2 + 0.0041 \cdot k + 6.09875 > 0;$$

решим получившееся квадратное уравнение относительно k :

$$0.00007 \cdot k^2 + 0.0041 \cdot k + 6.09875 = 0;$$

$$k_{1,2} = \frac{-0.0026 \pm \sqrt{0.0041^2 - 4 \cdot 0.00007 \cdot 6.09875}}{2 \cdot 0.00007} = -18.57 \pm \frac{\sqrt{-0.00169084}}{0.00014}$$

и, наконец:

$$\Delta_3 = c_0 \cdot \Delta_2 = (k + 1) \cdot \Delta_2 > 0.$$

Начальные неравенства справедливы при любом действительном k .

Ответ. система устойчива, запас устойчивости по коэффициенту передачи бесконечен $(-\infty, \infty)$.

Вариант 2. Исследование устойчивости разомкнутой системы по критерию Найквиста.

Критерий Найквиста относится к графоаналитическим критериям устойчивости. Определение устойчивости системы по критерию Найквиста можно провести двумя способами: по «годографу» Найквиста, по логарифмическим АЧХ и ФЧХ (логарифмическая форма критерия Найквиста). В обоих случаях строим графики разомкнутой системы. Воспользуемся логарифмической формой критерия Найквиста [1, 2, 3], согласно которому система устойчива, если при АЧХ разомкнутой системы больше единицы, ФЧХ не опускается ниже минус ста восьмидесяти градусов $(-\pi)$. Для этого построим частотные характеристики разомкнутой системы (например, см. п. 3.2.1. настоящего пособия либо другим способом).

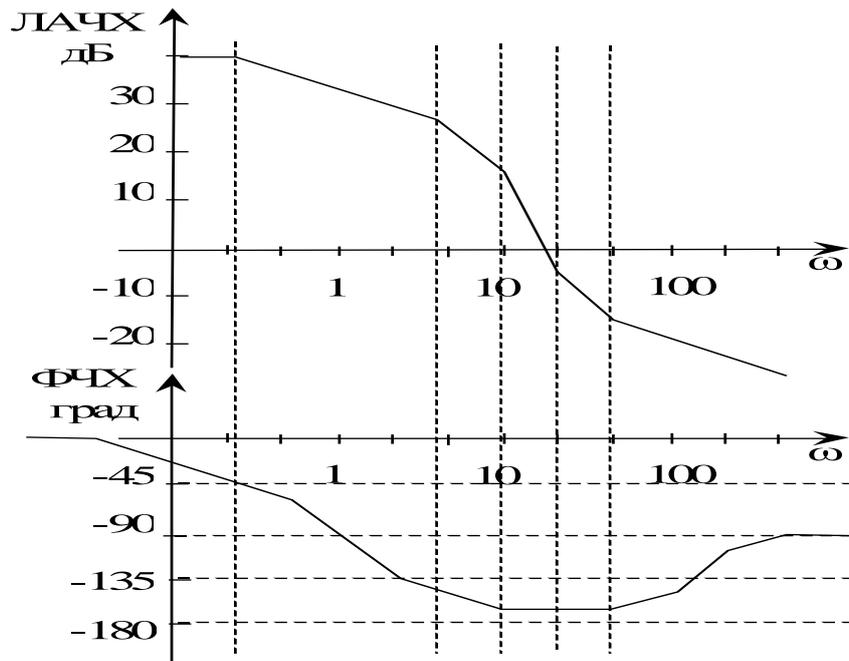


Рис. 3.19 – Линеаризованные частотные характеристики разомкнутой системы

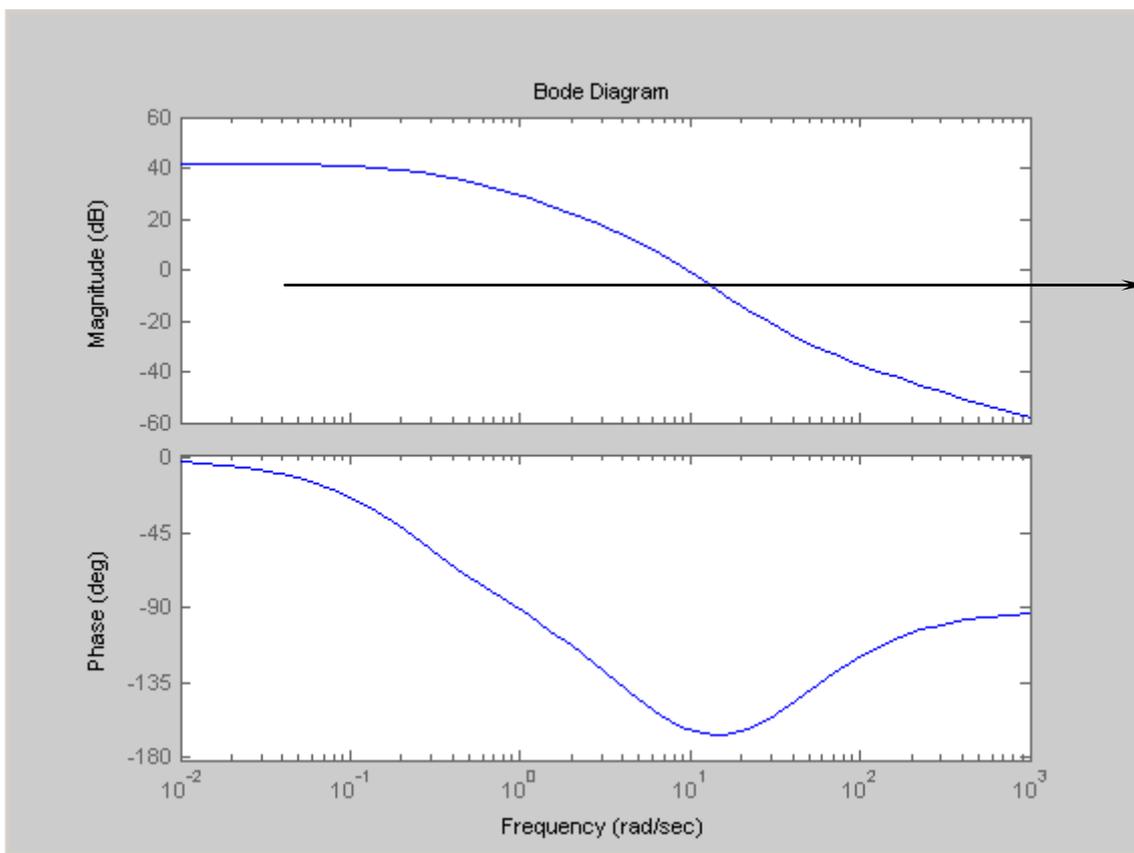


Рис. 3.20 – Диаграмма Bode, построенная в MatLab

Из рис. 3.20 видно, что в нашем случае система будет устойчива при любых условиях, так как фазовая характеристика вообще не достигает значения -180° .

Ответ на второе задание первой контрольной работы запишем в виде: система устойчива, запас устойчивости по коэффициенту передачи бесконечен.

Пример выполнения четвертого задания первой контрольной работы. В четвертом задании первой контрольной работы необходимо определить качественные показатели системы, такие, как длительность переходного процесса, величину перерегулирования, колебательность переходного процесса, частоту или период собственных колебаний системы, полосу пропускания системы по переходной характеристике системы.

Рисунок характеристики системы выбирается из таблицы 3.8. Результат необходимо выбрать из таблицы 3.9.

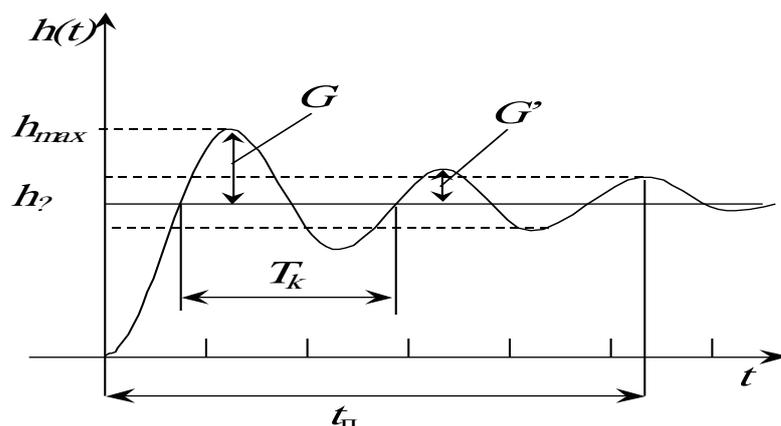


Рис. 3.21 – Пример определения временных показателей качества системы

Длительность переходного процесса t_n определяется как интервал времени от момента подачи единичного сигнала на вход исследуемой системы до того момента, когда отклонение выходного сигнала от установившегося значения не будет превышать величину заданной ошибки системы δ (пунктирная линия на рис. 3.21).

Величину перерегулирования, характеризующую максимальное отклонение выходного сигнала от установившегося значения, можно определить по формуле:

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100\%.$$

Колебательность переходного процесса, равная отношению соседних максимумов переходной характеристики, может быть определена по формуле:

$$C = \frac{G'}{G} \cdot 100\%.$$

Более подробно об определении качественных показателей можно прочитать в [1, 2, 7].

В качестве ответа необходимо представить номер ответа и формулу или алгоритм получения искомого параметра в текстовом виде (MS Word).

3.3 Контрольная работа № 2. Исследование показателей качества систем радиоавтоматики

3.3.1 Краткие методические указания по исследованию показателей качества систем радиоавтоматики

Контрольная работа состоит из четырех частей одного сквозного задания. Для выполнения контрольной работы №2 необходимо исследовать систему частотной или фазовой автоматической подстройки частоты.

Контрольная работа содержит 80 вариантов, номер варианта определяет блок заданий, см. таблицу 3.1.

В вариантах заданий *первого и второго блоков* необходимо исследовать систему частотной автоматической подстройки (ЧАП) с пропорциональным управителем частоты. Система ЧАП является статической системой РА непрерывного действия с регулированием по рассогласованию частот, функциональная схема представлена на рис. 3.22 и содержит в своем составе смеситель, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), частотный дискриминатор, активный фильтр и гетеродин с управителем.

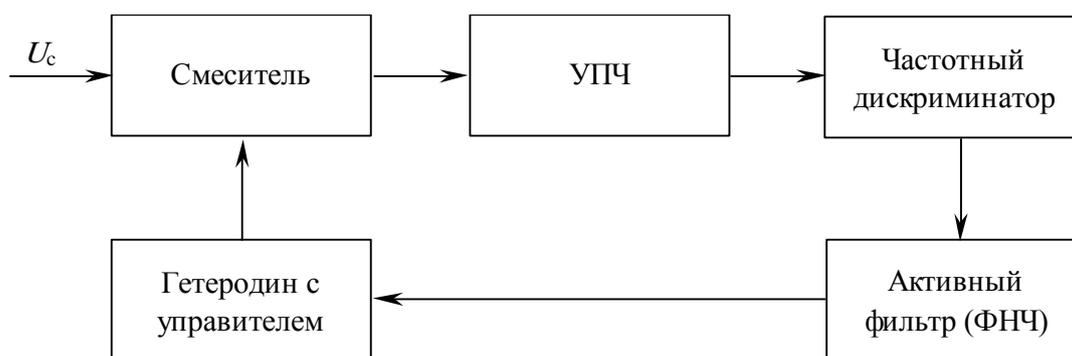


Рис. 3.22 – Функциональная схема системы частотной автоподстройки

Во всех вариантах анализа системы ЧАП – смеситель и усилитель промежуточной частоты в системе ЧАП безынерционны и имеют единичный коэффициент передачи! Коэффициент передачи и постоянная времени частотного дискриминатора, в зависимости от варианта задания, определяются номером задания по таблице 3.15 и апериодическим звеном [1].

В вариантах заданий *третьего и четвертого блоков* необходимо исследовать систему фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ). Система ФАПЧ является астатической системой РА непрерывного действия с регулированием по рассогласованию фаз, функциональная схема представлена на рис. 3.23 и содержит в своем составе фазовый дискриминатор, активный фильтр и гетеродин с управителем.

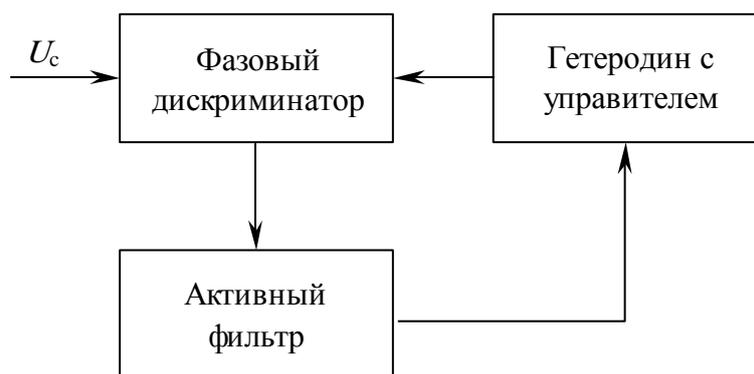


Рис. 3.23 – Система фазовой автоподстройки

Коэффициент передачи фазового дискриминатора для всех вариантов анализа системы ФАП одинаков и равен 0,5 мВ/град, см. таблицу 3.15, инерционные свойства фазового дискриминато-

ра T_d задаются отдельно для каждого варианта, которые представлены в таблице 3.15.

Во всех заданиях используется два варианта активного фильтра (ФНЧ), принципиальные схемы которых представлены на рис. 3.24, а и б, фильтры реализованы на основе активного фильтра с использованием операционных усилителей. Коэффициент передачи ФНЧ определяется выражением 3.1 – для схемы, рис. 3.24, а или выражением 3.2 – для схемы, рис. 3.24, б. Инерционные свойства ФНЧ описываются постоянной времени T_ϕ (выражением 3.3).

$$K_\phi = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1}. \quad (3.1)$$

$$K_\phi = \frac{R_\phi \cdot R_{oc}}{R_2 \cdot R_3}. \quad (3.2)$$

$$T_\phi = R_\phi \cdot C_\phi. \quad (3.3)$$

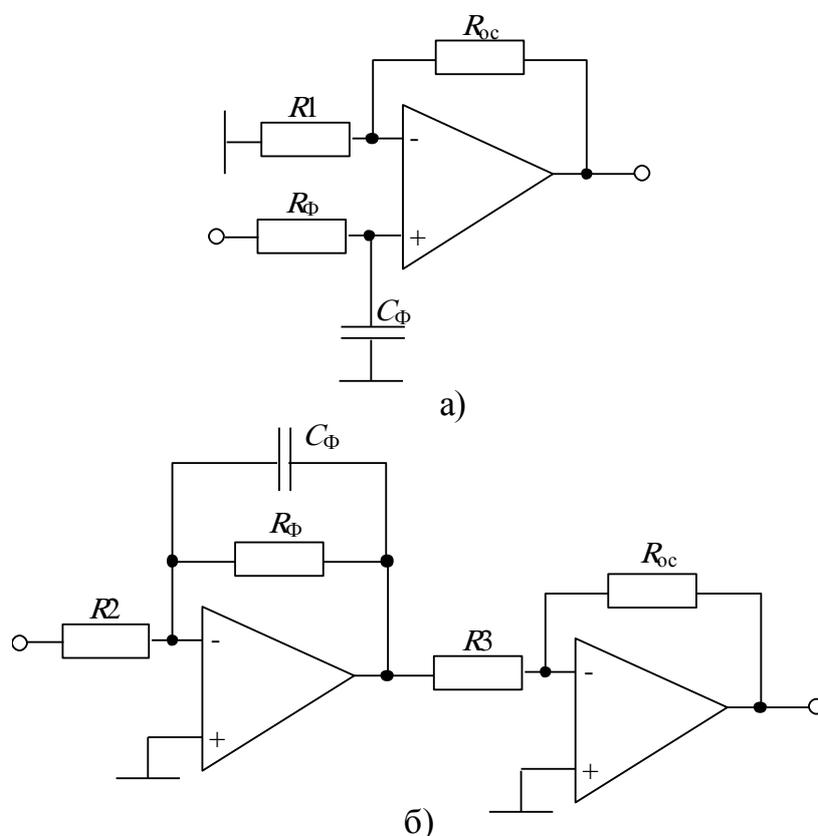


Рис. 3.24 – Электрические принципиальные схемы активного ФНЧ

Таким образом, передаточная функция ФНЧ определяется выражением 3.4 (апериодическое звено)

$$W_{\phi}(p) = \frac{k_{\phi}}{1 + T_{\phi} \cdot p}. \quad (3.4)$$

Во всех заданиях второй контрольной работы управитель гетеродина системы реализован на колебательном контуре с электронной перестройкой по частоте, на варикапах $V1$ и $V2$ с встречно-последовательным включением (рис. 3.25).

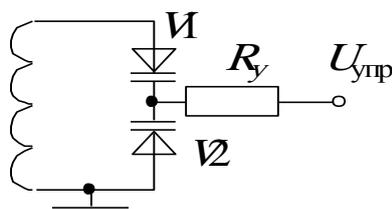


Рис. 3.25 – Принципиальная схема управителя гетеродина

Зависимость емкости варикапа от напряжения управления описывается выражением 3.5.

$$C_{раб}(U_{упр}) = C_{спр.} \cdot \left(\frac{U_{спр.}}{U_{упр.}} \right)^n, \quad (3.5)$$

где: $C_{спр.}$, $C_{раб.}$ – справочная и рабочая емкости варикапа, в пФ;

$U_{спр.}$ – напряжение смещения, при котором задана справочная емкость, в В;

$U_{упр.}$ – напряжение управления на варикапе, в В.

n – коэффициент аппроксимации вольтфарадной характеристики варикапа, характеризующий плавность p - n перехода.

Технические характеристики управляющего элемента (варикапа) представлены в таблице 3.16.

Коэффициент передачи управителя, приведенный к единице напряжения, определяется выражением 3.6.

$$K_y = \frac{10^3}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_k \cdot C_{спр.} \cdot U_{спр.}^n}} \left[\sqrt{(U_{раб} + 0.5)^n} - \sqrt{(U_{раб} - 0.5)^n} \right], \text{ Гц/мВ}, \quad (3.6)$$

где L_k – индуктивность контура, в мкГн;

$U_{раб}$ – рабочее напряжение смещения на варикапе, в В.

Величина индуктивности контура управителя L_k для исследуемой системы приведена в таблице 3.15. Инерционные свойства управителя описываются постоянной времени $T_{упр}$, постоянная времени управителя определяется выражением 3.7.

$$T_y = R_y \cdot 2 \cdot C(U_{упр}) = 2 \cdot R_y \cdot C_{спр.} \cdot \left(\frac{U_{спр.}}{U_{упр.}} \right)^n. \quad (3.7)$$

Таблица 3.15

Параметры элементов системы										
Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_{ос}$, кОм	10									
$R1$, кОм	10	10	12	15	15	18	20	22	22	24
$R2$, кОм	10	12	10	12	18	18	27	20	18	20
$R3$, кОм	10	12	20	10	12	10	12	18	15	18
$R\phi$, кОм	10	15	20	18	12	12	18	18	22	20
$C\phi$, нФ	1000	910	510	680	1000	910	750	680	510	750
Тип варикапа	КВС-104			КВ-105			КВ-111		КВ-121	
$U_{раб.}$, В	5	20	40	5	10	80	5	10	5	10
L_k , мкГн	300	350	400	100	150	200	0.2	0.3	0.1	0.15
$R_{y.}$, кОм	100									
$K_{чд}$, мкВ/Гц	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$K_{фд}$, мкВ/град.	500									
T_d , мс	5	2	6	8	7	3	9	1	4	10
ΔK	3.75	3.5	3.25	3.0	2.75	2.5	2.25	2.0	1.75	1.5
$\Delta \nu$, кГц/с	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	70

Таблица 3.16

Параметры варикапов в управителе				
Тип варикапа	КВ-105	КВ-104А	КВС-111	КВ-121
n	0.5	0.45	0.33	0.6
$C_{спр.}$, пФ	500	100	32	5
$U_{спр.}$, В	4	4	4	25
U_{max} , В	90	45	30	30

Длительность переходного процесса в замкнутой системе можно приблизительно определить по формуле:

$$t_n = (1..2) \frac{2\pi}{\omega_{cp}}. \quad (3.8)$$

Для определения статической ошибки системы сначала необходимо определить передаточную функцию замкнутой системы по ошибке $W_o(p)$, затем представить её в виде отношения двух полиномов $W_o(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}$. Запишем коэффициенты статической C_0 ошибки, ошибки по скорости C_1 .

$$C_0 = \frac{a_0}{b_0}; \quad (3.9)$$

$$C_1 = \frac{1}{b_0} \left(a_1 - b_1 \frac{a_0}{b_0} \right). \quad (3.10)$$

Собственно статическая ошибка определяется умножением статического коэффициента (коэффициента статической ошибки) на величину начального возмущения (расстройки).

$$e_0 = C_0 \cdot \Delta f_c; \quad (3.11)$$

$$e_1 = C_1 \cdot \Delta v_c. \quad (3.12)$$

Ошибка системы по скорости определяется умножением скоростного коэффициента (коэффициента ошибки по скорости) на величину скорости изменения задающего воздействия.

Примеры выполнения заданий второй контрольной работы приведены в п. 3.3.6 настоящего пособия.

3.3.2 Блок заданий №1

Во всех вариантах данного блока заданий необходимо:

1) получить передаточную функцию и характеристическое уравнение системы ЧАП (рис. 3.22);

2) определить устойчивость и запасы устойчивости исследуемой в п.1) системы по коэффициенту передачи, если система неустойчива, определить, на сколько необходимо изменить коэффициент передачи для выведения системы на границу устойчивости;

3) определить значение статической ошибки в системе при начальной расстройке $\Delta f_c = 10^4$ Гц;

Численные значения элементов электрической принципиальной схемы ФНЧ; номинал индуктивности колебательного контура управляющего элемента L_k , типа и режима его работы $U_{\text{раб.}}$; коэффициент передачи $K_{\text{чд}}$ и постоянная времени частотного дискриминатора T_d представлены в таблице 3.15 отдельно для каждого варианта. Технические характеристики варикапов элемента управления системы РА приведены в таблице 3.18.

3.3.3 Блок заданий №2

Во всех вариантах данного блока заданий необходимо:

1) получить передаточную функцию и характеристическое уравнение системы ЧАП (рис. 3.22);

2) определить устойчивость и запасы устойчивости исследуемой в п.1) системы по постоянной времени ФНЧ, если система неустойчива, определить, на сколько необходимо изменить постоянную времени ФНЧ для выведения системы на границу устойчивости;

3) найти длительность переходного процесса в системе с заданным запасом устойчивости по амплитуде ΔK .

Численные значения элементов электрической принципиальной схемы ФНЧ; номинал индуктивности колебательного контура управляющего элемента L_k , типа и режима его работы $U_{\text{раб.}}$, постоянная времени $T_{\text{упр.}}$; коэффициент передачи $K_{\text{чд}}$ и постоянная времени частотного дискриминатора T_d представлены в таблице 3.15 отдельно для каждого варианта. Численные значения ΔK для каждого варианта приведены в таблице 3.15. Технические характеристики варикапов элемента управления системы РА приведены в таблице 3.16.

3.3.4 Блок заданий №3

Во всех вариантах данного блока заданий необходимо:

1) получить передаточную функцию и характеристическое уравнение системы ФАПЧ (рис. 3.23);

2) построить логарифмические частотные характеристики системы и определить запас устойчивости системы по коэффициенту передачи, если система неустойчива, определить, на сколько необходимо изменить коэффициент передачи для выведения системы на границу устойчивости;

3) определить величину ошибки системы по скорости, при изменении частоты входного сигнала со скоростью $\Delta \nu$, см. таблицу 3.15.

Численные значения элементов R_ϕ , C_ϕ электрической принципиальной схемы ФНЧ; номинал индуктивности колебательного контура управляющего элемента L_k , тип и режим его работы $U_{\text{раб.}}$, постоянная времени $T_{\text{упр.}}$; коэффициент передачи $K_{\text{чд}}$ и постоянная времени частотного дискриминатора T_d представлены в таблице 3.15 отдельно для каждого варианта. Технические характеристики варикапов элемента управления системы РА приведены в таблице. 3.16.

3.3.5 Блок заданий №4

Во всех вариантах данного блока заданий необходимо:

1) получить передаточную функцию и характеристическое уравнение системы ФАПЧ (рис. 3.23);

2) построить логарифмические частотные характеристики системы и определить запас устойчивости системы по фазе, если система неустойчива, определить, на сколько необходимо изменить коэффициент передачи для выведения системы на границу устойчивости;

3) определить минимально достижимое значение установившейся ошибки в системе, если частота входного сигнала меняется с постоянной скоростью $\nu = \frac{df_c}{dt}$.

Численные значения элементов R_ϕ , C_ϕ электрической принципиальной схемы ФНЧ; номинал индуктивности колебательного контура управляющего элемента L_k , типа и режима его работы $U_{\text{раб.}}$, постоянная времени $T_{\text{упр.}}$; коэффициент передачи $K_{\text{чд}}$ и постоянная времени частотного дискриминатора T_d ; скорости изменения сигнала ν представлены в таблице 5.2 отдельно для каждо-

го варианта. Технические характеристики варикапов элемента управления системы РА приведены в таблице 3.16.

Звенья дискриминатора, фильтра и управителя гетеродина считать аperiodическими.

3.3.6 Примеры выполнения контрольной работы №2

Пример выполнения первого задания второй контрольной работы. В первом задании второй контрольной работы необходимо получить передаточную функцию и характеристическое уравнение исследуемой системы. Рассмотрим на примере системы ЧАП (выбирается согласно таблице 3.1) и блока заданий, функциональная схема системы ЧАП, рис. 3.22, структурная, рис. 3.26. Звенья дискриминатора, фильтра и управителя гетеродина считать аperiodическими.

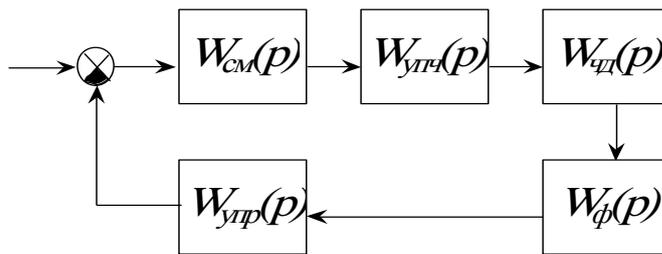


Рис. 3.26 – Структурная схема исследуемой системы ЧАП

Решение: согласно заданию, передаточные функции звеньев, входящих в исследуемую систему:

$$W_{cm}(p) = 1; \quad W_{упч}(p) = 1;$$

$$W_d(p) = \frac{k_d}{1 + T_d p}; \quad W_\phi(p) = \frac{k_\phi}{1 + T_\phi p}; \quad W_y(p) = \frac{k_y}{1 + T_y p}.$$

Таким образом, общая передаточная функция:

$$W(p) = \frac{W_\Sigma(p)}{1 + W_\Sigma(p)};$$

$$W_\Sigma(p) = W_{cm}(p) \cdot W_{упч}(p) \cdot W_{чд}(p) \cdot W_\phi(p) \cdot W_y(p).$$

$$\begin{aligned}
W(p) &= \frac{W_{см}(p) \cdot W_{упч}(p) \cdot W_{чд}(p) \cdot W_{\phi}(p) \cdot W_y(p)}{1 + W_{см}(p) \cdot W_{упч}(p) \cdot W_{чд}(p) \cdot W_{\phi}(p) \cdot W_y(p)} = \\
&= \frac{1 \cdot 1 \cdot \frac{k_{чд}}{1+T_d} \cdot \frac{k_{\phi}}{1+T_{\phi}} \cdot \frac{k_y}{1+T_y}}{1 + 1 \cdot 1 \cdot \frac{k_{чд}}{1+T_d} \cdot \frac{k_{\phi}}{1+T_{\phi}} \cdot \frac{k_y}{1+T_y}} = \\
&= \frac{k_{чд} \cdot k_{\phi} \cdot k_y}{(1+T_d) \cdot (1+T_{\phi}) \cdot (1+T_y) + k_{чд} \cdot k_{\phi} \cdot k_y} = \\
&= \frac{k_{чд} \cdot k_{\phi} \cdot k_y}{(1+k_{чд} \cdot k_{\phi} \cdot k_y) + (T_d + T_{\phi} + T_y)p + (T_d T_{\phi} + T_y T_d + T_{\phi} T_y)p^2 + (T_d \cdot T_{\phi} \cdot T_y)p^3}.
\end{aligned}$$

Далее найдем и подставим коэффициенты передачи и постоянные времени дискриминатора, фильтра и управителя гетеродина:

$k_{чд}$, T_d , T_y – берем из таблицы 3.15, k_{ϕ} – определим по формулам (3.1 – 3.2) в зависимости от номера задания, k_y – определим по формуле (3.6) и T_{ϕ} – определим по формуле (3.3). Исходные данные для определения коэффициентов передач и постоянных времени находятся в таблицах 3.15 – 3.16.

Подставив значения, получим уравнение вида:

$$W(p) = \frac{k_c}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3},$$

где

$$k_c = k_{чд} \cdot k_{\phi} \cdot k_y;$$

$$a_0 = 1 + k_{чд} \cdot k_{\phi} \cdot k_y;$$

$$a_1 = T_d + T_{\phi} + T_y;$$

$$a_2 = T_d T_{\phi} + T_y T_d + T_{\phi} T_y;$$

$$a_3 = T_d \cdot T_{\phi} \cdot T_y.$$

В свою очередь:

$$k_{чд} = 50 \text{ мкВ/град} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$T_d = 8 \text{ мс} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$T_y = 0,8 \text{ мс} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$R_{\phi} = 100 \text{ ком} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$R_{oc} = 120 \text{ ком} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$R_2 = 120 \text{ ком} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$R_3 = 100 \text{ ком} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$k_{\Phi} = \frac{R_{\Phi} \cdot R_{oc}}{R_2 \cdot R_3} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 120 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3} = 1.$$

$$\text{Варикап КВ} - 105 \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$L_k = 150 \text{ мкГн} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$C_{cnp} = 500 \text{ пФ} \quad (\text{из таблицы 3.16});$$

$$U_{cnp} = 4 \text{ В} \quad (\text{из таблицы 3.16});$$

$$U_{pa6} = 10 \text{ В} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$n=0.5 \quad (\text{из таблицы 3.16});$$

$$K_y = \frac{10^3 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_k \cdot C_{cnp} \cdot U_{cnp}^n}} \left[\sqrt{(U_{pa6} + 0.5)^n} - \sqrt{(U_{pa6} - 0.5)^n} \right] =$$

$$= \frac{1414.2}{6.28 \sqrt{150 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 10^{-12} \cdot 4^{0.5}}} \left[\sqrt{(10.5)^{0.5}} - \sqrt{(9.5)^{0.5}} \right] =$$

$$= \frac{225.2}{\sqrt{75 \cdot 10^{-12} \cdot 2}} \left[\sqrt{3.24} - \sqrt{3.08} \right] = \frac{225.2}{12.25 \cdot 10^{-6}} [1.8 - 1.75] =$$

$$= 18.38 \cdot 10^6 \cdot 0.05 = 0.92 \cdot 10^6 = 920 \text{ Гц/ мВ}$$

$$C_{\Phi} = 1000 \text{ пФ} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$T_{\Phi} = R_{\Phi} C_{\Phi} = 100 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 10^{-12} = 0.1 \cdot 10^{-6} = 0.1 \text{ мкс};$$

таким образом:

$$k_c = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0.92 \cdot 10^6 = 46;$$

$$a_0 = 1 + 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0.92 \cdot 10^6 = 47;$$

$$a_1 = 8 \cdot 10^{-6} + 0.1 \cdot 10^{-6} + 0.8 \cdot 10^{-6} = 8.9;$$

$$a_2 = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} + 0.8 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-6} + 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8 \cdot 10^{-6} =$$

$$= (0.8 + 6.4 + 0.08) \cdot 10^{-12} = 7.28 \cdot 10^{-12};$$

$$a_3 = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8 \cdot 10^{-6} = 0.64 \cdot 10^{-18}.$$

Тогда передаточная функция исследуемой системы будет выглядеть так:

$$W(p) = \frac{k_c}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{46}{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47},$$

а характеристическое уравнение:

$$D(p) = 0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47 = 0.$$

Ответ на второе задание первой контрольной работы запишем в текстовом формате или формате MathType:

Передаточная функция –

$$W(p) = \frac{46}{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47},$$

$$\text{или } W(p) = \frac{46}{0.64e-18 \cdot p^3 + 7.28e-12 \cdot p^2 + 8.9 \cdot p + 47}.$$

Характеристическое уравнение –

$$D(p) = 0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47 = 0$$

или $D(p) = 0.64e-18 \cdot p^3 + 7.28e-12 \cdot p^2 + 8.9 \cdot p + 47$.

Пример выполнения второго задания второй контрольной работы. Во втором задании второй контрольной работы необходимо определить устойчивость и запас устойчивости по коэффициенту передачи системы ЧАП. Функциональная схема исследуемой системы показана на рис. 3.22, структурная схема, рис. 3.24.

Вариант 1. Определение устойчивости согласно критерию Гурвица.

Решение: возьмем найденное в процессе решения *первого задания второй контрольной работы* характеристическое уравнение анализируемой замкнутой системы в нашем примере:

$$D(p) = 0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47 = 0.$$

Для определения устойчивости системы воспользуемся «математическим критерием устойчивости Гурвица», для чего заполним матрицу Гурвица [1, 2, 4]:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7.28 \cdot 10^{-12} & 47 & 0 \\ 0.64 \cdot 10^{-18} & 8.9 & 0 \\ 0 & 7.28 \cdot 10^{-12} & 47 \end{vmatrix}.$$

Найдем главные определители матрицы:

$$\Delta_1 = a_2 = 7.28 \cdot 10^{-12} > 0;$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 \cdot a_1 - a_3 \cdot a_0 = \\ &= 7.28 \cdot 10^{-12} \cdot 8.9 - 0.64 \cdot 10^{-18} \cdot 47 = \\ &= 64.79 \cdot 10^{-12} - 30.08 \cdot 10^{-18} > 0; \end{aligned}$$

$$\Delta_3 = \Delta_2 \cdot a_0 = 64.79 \cdot 10^{-12} \cdot 47 = 3.045 \cdot 10^{-9} > 0.$$

Все определители положительны, следовательно, система устойчива.

Затем найдем запас устойчивости системы по коэффициенту передачи. Для этого найдем элементы характеристического уравнения, в состав которых входит коэффициент передачи системы (см. *Пример выполнения третьего задания первой контрольной работы*). Запишем характеристическое уравнение системы, подставив значения всех элементов, кроме коэффициента передачи системы:

$$D(p) = 0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + k_c + 1 = 0.$$

Запомним матрицу Гурвица:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7.28 \cdot 10^{-12} & k_c + 1 & 0 \\ 0.64 \cdot 10^{-18} & 8.9 & 0 \\ 0 & 7.28 \cdot 10^{-12} & k_c + 1 \end{vmatrix},$$

найдем главные определители матрицы:

$$\Delta_1 = a_2 = 7.28 \cdot 10^{-12} > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = 7.28 \cdot 10^{-12} \cdot 8.9 - 0.64 \cdot 10^{-18} \cdot (k_c + 1) > 0;$$

$$\Delta_2 = 64.79 \cdot 10^{-12} - 0.64 \cdot 10^{-18} - k_c \cdot 0.64 \cdot 10^{-18} > 0;$$

$$64.79 \cdot 10^{-12} - 0.64 \cdot 10^{-18} > k_c \cdot 0.64 \cdot 10^{-18};$$

$$64.79 - 0.64 \cdot 10^{-6} > k_c \cdot 0.64 \cdot 10^{-6};$$

$$64.79 > k_c \cdot 0.64 \cdot 10^{-6};$$

$$k_c < \frac{64.79}{0.64} \cdot 10^6;$$

$$k_c < 101.23 \cdot 10^6 \approx 10^8$$

$$\begin{aligned} \Delta_3 = \Delta_2 \cdot a_0 = & \left(64.79 \cdot 10^{-12} - 0.64 \cdot 10^{-18} - k_c \cdot 0.64 \cdot 10^{-18} \right) \cdot (k_c + 1) > 0; \\ -0.64 \cdot 10^{-18} \cdot k_c^2 + & \left(64.79 \cdot 10^{-12} - 0.64 \cdot 10^{-18} + 0.64 \cdot 10^{-18} \right) \cdot k_c + \\ & + \left(64.79 \cdot 10^{-12} - 0.64 \cdot 10^{-18} \right) > 0; \end{aligned}$$

решим получившееся квадратное уравнение:

$$-0.64 \cdot 10^{-6} \cdot k_c^2 + 64.79 \cdot k_c + 64.79 = 0;$$

$$\begin{aligned} k_c = \frac{64.79 \pm \sqrt{64.79^2 + 4 \cdot 0.64 \cdot 10^{-6} \cdot 64.79}}{2 \cdot 0.64 \cdot 10^{-6}} = \\ = \frac{64.79 \pm \sqrt{4197.744 + 165.8624 \cdot 10^{-6}}}{1.28 \cdot 10^{-6}}; \end{aligned}$$

$$k_{c1} = \frac{64.79 - 64.79}{1.28 \cdot 10^{-6}} = \frac{0}{1.28 \cdot 10^{-6}} = 0;$$

$$k_{c2} = \frac{64.79 + 64.79}{1.28 \cdot 10^{-6}} = \frac{129.58}{1.28 \cdot 10^{-6}} = 101.23 \cdot 10^6.$$

Так как начально уравнение было неравенством и решение дает два корня, то удовлетворит условиям неравенства либо интервал решений, находящийся между полученными корнями, либо два интервала – вне этого отрезка. Проверим; для этого возьмем любое значение k_c , находящееся между полученными корнями, например $k_c=1$,

$$-0.64 \cdot 10^{-6} \cdot k_c^2 + 64.79 \cdot k_c + 64.79 > 0;$$

$$k_c = 1;$$

$$-0.64 \cdot 10^{-6} \cdot 1^2 + 64.79 \cdot 1 + 64.79 > 0;$$

$$129.58 - 0.64 \cdot 10^{-6} > 0;$$

$$129.58 > 0.$$

Следовательно, коэффициент передачи системы должен лежать в пределах от нуля до 101.23×10^6 , что не противоречит условию $\Delta_2 > 0$.

Ответ: коэффициент передачи системы не должен быть больше 101.23×10^6 .

Вариант 2. Определение устойчивости согласно критерию Найквиста.

Критерий Найквиста предполагает определение устойчивости замкнутой системы, анализируя передаточную функцию разомкнутой системы.

Решение: для определения устойчивости системы согласно критерию Найквиста воспользуемся логарифмической формой критерия Найквиста. Логарифмическая форма критерия Найквиста позволяет определить устойчивость системы по логарифмическим характеристикам разомкнутой системы. Разомкнем данную в задании систему (рис. 3.26) и построим её частотные характеристики. Структурная схема разомкнутой системы представлена на рис. 3.27.

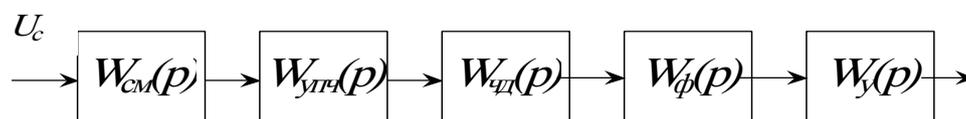


Рис. 3.27 – Структурная схема разомкнутой системы ЧАП

Согласно заданию передаточные функции звеньев, входящих в исследуемую систему см. *Пример выполнения первого задания второй контрольной работы.*

$$W_{cm}(p) = 1; \quad W_{ylch}(p) = 1;$$

$$W_d(p) = \frac{k_d}{1 + T_d p}; \quad W_\phi(p) = \frac{k_\phi}{1 + T_\phi p}; \quad W_y(p) = \frac{k_y}{1 + T_y p}.$$

Таким образом, общая передаточная функция:

$$W_p(p) = W_{cm}(p) \cdot W_{ylch}(p) \cdot W_{чд}(p) \cdot W_\phi(p) \cdot W_y(p).$$

$$W_p(p) = \frac{k_d}{1 + T_d p} \cdot \frac{k_\phi}{1 + T_\phi p} \cdot \frac{k_y}{1 + T_y p}$$

(передаточная функция разомкнутой системы).

Подставим значения коэффициентов передачи и постоянных времени исследуемой системы, $k_{чд}$, T_d , T_y – берем из таблицы 3.15, k_ϕ – определим по формулам (3.1 – 3.2) в зависимости от номера задания, k_y – определим по формуле (3.6) и T_ϕ – определим по формуле (3.3).

В нашем случае:

$$\begin{aligned}
 k_{дд} &= 50 \text{ мкВ/град} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 T_d &= 8 \text{ мс} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 T_y &= 0,8 \text{ мс} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 R_\phi &= 100 \text{ ком} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 R_{ос} &= 120 \text{ ком} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 R_2 &= 120 \text{ ком} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 R_3 &= 100 \text{ ком} && (\text{из таблицы 3.15});
 \end{aligned}$$

$$k_\phi = \frac{R_\phi \cdot R_{ос}}{R_2 \cdot R_3} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 120 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3} = 1.$$

$$\begin{aligned}
 \text{Варикап КВ} &- 105 && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 L_k &= 150 \text{ мкГн} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 C_{спр} &= 500 \text{ пФ} && (\text{из таблицы 3.16}); \\
 U_{спр} &= 4 \text{ В} && (\text{из таблицы 3.16}); \\
 U_{раб} &= 10 \text{ В} && (\text{из таблицы 3.15}); \\
 n &= 0.5 && (\text{из таблицы 3.16});
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_y &= \frac{10^3 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_k \cdot C_{спр.}} \cdot U_{спр.}^n} \left[\sqrt{(U_{раб} + 0.5)^n} - \sqrt{(U_{раб} - 0.5)^n} \right] = \\
 &= \frac{1414.2}{6.28 \sqrt{150 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 10^{-12}} \cdot 4^{0.5}} \left[\sqrt{(10.5)^{0.5}} - \sqrt{(9.5)^{0.5}} \right] = \\
 &= \frac{225.2}{\sqrt{75 \cdot 10^{-12}} \cdot 2} \left[\sqrt{3.24} - \sqrt{3.08} \right] = \frac{225.2}{12.25 \cdot 10^{-6}} [1.8 - 1.75] = \\
 &= 18.38 \cdot 10^6 \cdot 0.05 = 0.92 \cdot 10^6 = 920 \text{ Гц/ мВ}
 \end{aligned}$$

$$C_\phi = 1000 \text{ пФ} \quad (\text{из таблицы 3.15});$$

$$T_\phi = R_\phi C_\phi = 100 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 10^{-12} = 0.1 \cdot 10^{-6} = 0.1 \text{ мкс}.$$

Подставим полученные значения в передаточную функцию разоомкнутой системы и получим уравнение:

$$\begin{aligned}
 W_p(p) &= \frac{k_d \cdot k_\phi \cdot k_y}{(1 + T_d p)(1 + T_\phi p)(1 + T_y p)} = \\
 &= \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 920 \cdot 10^3}{(1 + 8 \cdot 10^{-3} p)(1 + 0.1 \cdot 10^{-6} p)(1 + 0.8 \cdot 10^{-3} p)}.
 \end{aligned}$$

Построим частотные характеристики разомкнутой системы, см. *Пример выполнения третьего задания первой контрольной работы*, см. п. 3.2.6 или воспользуемся, например, системой MatLab версии 6, для этого напишем программу:

```
s1=tf([46],[8*10^-3 1])
s2=tf([1],[0.1*10^-6 1])
s3=tf([1],[0.8*10^-3 1])
sys=tf([46],[6.4*10^-12 6.4*10^-6 0.0088 1])
bode (s1,s2,s3,sys)
```

результат:

Transfer function:

$$46$$

$$6.4e-012 s^3 + 6.4e-006 s^2 + 0.0088 s + 1$$

Transfer function:

$$46$$

$$0.008 s + 1$$

Transfer function:

$$1$$

$$1e-007 s + 1$$

Transfer function:

$$1$$

$$0.0008 s + 1$$

и график, рис. 3.28, из которого определяем запасы устойчивости по амплитуде (50 дБ) и фазе (30 град).

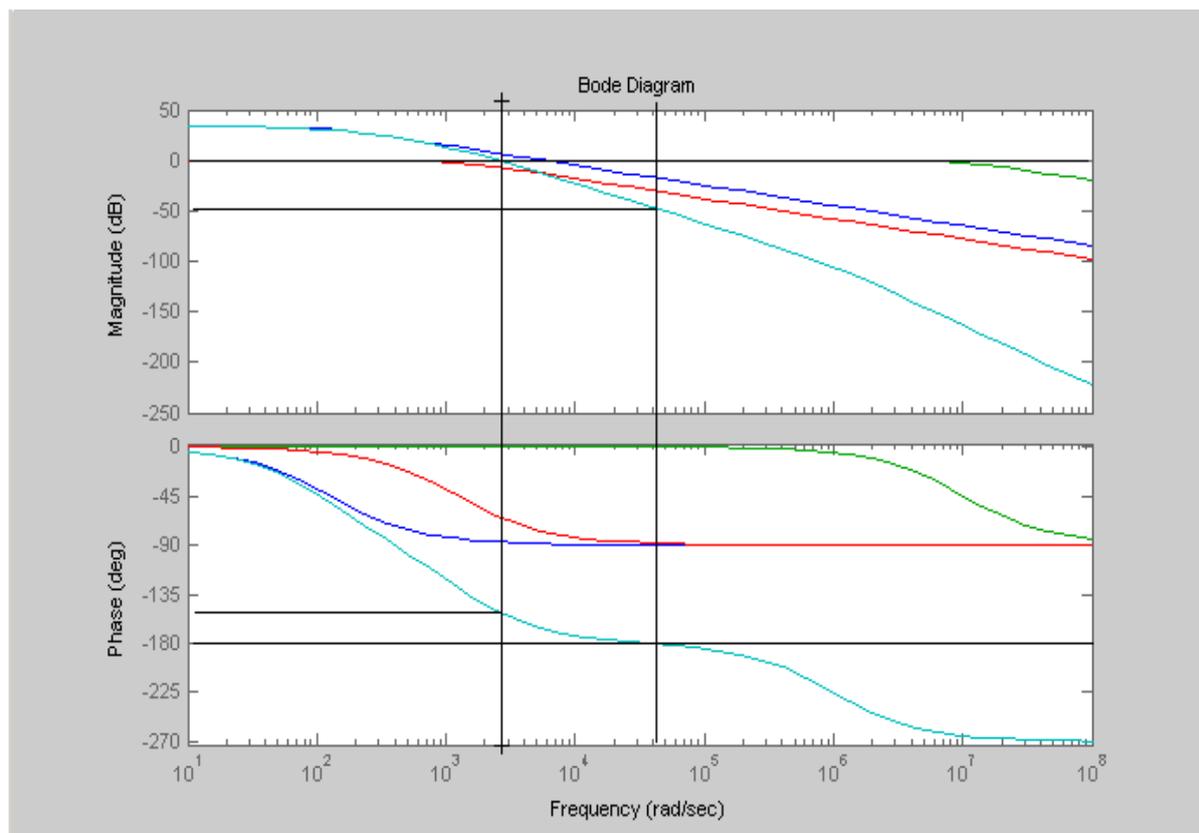


Рис. 3.28 – Диаграмма Bode

Ответ запишем в текстовом виде: система устойчива, запас устойчивости по амплитуде составил 50 дБ, запас устойчивости по фазе – 30 градусов.

Пример выполнения третьего задания второй контрольной работы. В третьем задании второй контрольной работы необходимо определить значение минимальной статической ошибки, достижимой в системе ЧАП при начальной расстройке $\Delta f = 10^4$ Гц.

Решение: для начала найдем передаточную функцию ошибки по одной из формул:

$$W_e(p) = 1 - W_3(p) \quad \text{или} \quad W_e(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)},$$

где $W_p(p)$ – разомкнутая передаточная функция системы;

$W_3(p)$ – замкнутая передаточная функция системы.

Передаточную функцию исследуемой системы возьмем из сделанного ранее первого задания второй контрольной работы, см. *Пример выполнения первого задания второй контрольной работы.*

$$W_3(p) = \frac{k_c}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} =$$

$$= \frac{46}{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47},$$

тогда

$$W_e(p) = 1 - W_3(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 - k_c}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0};$$

$$W_e(p) = \frac{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47 - 46}{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47};$$

$$W_e(p) = \frac{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 1}{0.64 \cdot 10^{-18} p^3 + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 8.9 p + 47}.$$

Затем найдем статическую ошибку на основании теоремы преобразования Лапласа о конечном значении функции [1]:

$$e = \lim_{p \rightarrow 0} W_e(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 + 8.9 p + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 0.64 \cdot 10^{-18} p^3}{47 + 8.9 p + 7.28 \cdot 10^{-12} p^2 + 0.64 \cdot 10^{-18} p^3};$$

$$e = \frac{1}{47} = 0.021276$$

или 2.13 %.

Начальная расстройка $\Delta f = 10^4$ Гц, тогда значение ошибки составит:

$$\varepsilon = \Delta f e, \quad \varepsilon = \Delta f \cdot e = 10^4 \cdot 0.021276 = 212.76 \text{ Гц.}$$

Ответ: расстройка составит 212.76 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пушкарев В.П., Пелявин Д.Ю. Радиоавтоматика: Учебное пособие. – Томск: ТМЦ ДО, 2004. – 153 с.
2. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
3. Радиоавтоматика / Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Высшая школа, 1985.
4. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал): Учебное пособие для вузов. – М.: «Машиностроение», 1977. – 464 с.
5. Первачев С.В., Валев А.А., Чиликина В.М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. – М.: «Сов. Радио», 1973. – 488 с.
6. Проектирование радиоприемных устройств: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.П. Сиверса. – М.: «Сов. Радио», 1976. – 488 с.
7. Жаркой А.Г. Радиоавтоматика: Руководство к лабораторным работам для студентов специальности 2301. Часть 1. – Томск: Ротапринт ТИАСУРа, 1988. – 27 с.
8. Жаркой А.Г., Туев В.И. Радиоавтоматика: Руководство к лабораторным работам для студентов специальности 2301. Часть 2. – Томск: Ротапринт ТИАСУРа, 1988. – 27 с.
9. Коновалов Г.Ф., Коноваленко О.В. Системы автоматического управления с электромагнитными порошковыми муфтами. – М.: Машиностроение, 1976.