

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра "Конструирование и производство приборов"

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ

Программа, методические указания и задания
по дисциплинам «Основы автоматики и автоматизации производственных
процессов в приборостроении» и «Основы автоматики и телемеханики» для
студентов заочного отделения специальностей 1-38 01 01 «Механические и
электромеханические приборы и аппараты» и 1-38 02 03 «Техническое
обеспечение безопасности»

М и н с к 2003

УДК 681.513.3

В издании излагаются наиболее важные положения дисциплины; приведены программа курса и задания для контрольной работы. Издание может быть использовано студентами специальностей 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» и 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» заочной и дневной форм обучения.

Издание включает методические указания по изучению дисциплины, указания по составу, содержанию и выполнению контрольной работы.

Авторы: В.Т. Минченя, А.Л. Савченко

Рецензенты: А.В. Самойленко, А.А. Антошин

В в е д е н и е

В настоящее время во всех областях техники имеется тенденция к автоматизации различных процессов. В производственные процессы широко внедряются современные системы управления, в том числе на основе микропроцессорной техники. В таких условиях также растет актуальность технических средств, позволяющих управлять объектами на значительном расстоянии, концентрировать системы управления большим количеством объектов из одного центра или диспетчерского пункта. В связи с этим является актуальной подготовка инженеров, владеющих вопросами проектирования систем автоматического управления, регулирования и устройств телемеханики.

В настоящем курсе изложены вопросы построения, анализа и синтеза перечисленных систем, являющиеся теоретической и практической основой их расчета и проектирования.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ "ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

Целью дисциплины является изучение принципов построения и методов математического анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ) и регулирования (САР).

В результате изучения дисциплины "Основы автоматики и автоматизация производственных процессов в приборостроении" студенты должны иметь представление:

- об автоматических системах управления и регулирования;
- о математических моделях линейных систем автоматического управления.

Студенты должны знать:

- методологию математического описания и структуры построения САУ и САР;
- основные принципы и концепции построения САУ;
- принципы анализа и синтеза САУ и САР;
- основные проблемы и перспективы развития теории автоматического управления и регулирования.

Студенты должны уметь использовать:

- методику исследования устойчивости, оценки качества и синтеза линейных непрерывных и дискретных САР;
- методику определения передаточных функций динамических звеньев и нахождения общей передаточной функции системы в целом.

Студенты должны владеть:

- методами выбора структуры и схемы регулирования и управления физическими величинами;

- методами выбора и расчета исполнительных механизмов следящих систем с учетом динамических свойств системы.

Студенты должны иметь опыт:

- выбора и обоснования функциональной схемы автоматической системы управления и регулирования.

Изучение данной дисциплины базируется на дисциплинах:

- «Математика»;
- «Теоретическая механика»;
- «Теоретические основы электротехники»;
- «Информатика».

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ "ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ"

Целью дисциплины является изучение принципов построения и методов математического анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ), регулирования (САР), систем и комплексов телемеханики.

В результате изучения дисциплины «Основы автоматике и телемеханики» студенты должны иметь представление:

- об автоматических системах управления и регулирования;
- о математических моделях линейных систем автоматического управления;
- о системах телеуправления, телесигнализации, телеизмерения.

Студенты должны знать:

- методологию математического описания и структуры построения САУ и САР;

- основные принципы и концепции построения САУ;

- принципы анализа и синтеза САУ и САР;

- основные проблемы и перспективы развития теории автоматического управления и регулирования;

- методы передачи команд телеуправления, сигналов телесигнализации и телеизмерений; линии связи;

- принципы построения и проектирования систем и комплексов устройств телемеханики;

- применение теории сигналов, информации, кодирования и помехоустойчивости в практике проектирования телемеханических систем.

Студенты должны уметь использовать:

- методику исследования устойчивости, оценки качества и синтеза линейных непрерывных и дискретных САР;

- методику определения передаточных функций динамических звеньев и нахождения общей передаточной функции системы в целом;

- методику выбора и расчета основных параметров проводных линий связи;

- критерии выбора метода передачи команд телеуправления, телесигнализации и телеизмерения.

Студенты должны владеть:

- методами выбора структуры и схемы регулирования и управления физическими величинами;

- методами выбора и расчета исполнительных механизмов следящих систем с учетом динамических свойств системы.

Студенты должны иметь опыт:

- выбора и обоснования функциональной схемы автоматической системы управления и регулирования;

- выбора и обоснования методов телеуправления, телесигнализации и телеуправления.

Изучение данной дисциплины базируется на дисциплинах:

- «Математика»;

- «Радиотехнические цепи и сигналы»;

- «Теория преобразования и передачи измерительной информации».

1. НАИМЕНОВАНИЕ ТЕМ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

1.1. Введение

Роль автоматики в машино- и приборостроении. Краткий исторический очерк развития автоматики. Классификация систем автоматического управления.

Литература: [1, с. 3, 8 – 10], [2, с. 9 – 12]

1.2. Общие сведения об автоматических системах управления и регулирования

Общие понятия об управлении и регулировании. Основные понятия и определения. Фундаментальные принципы построения систем автоматического управления (САУ). Принцип разомкнутого управления. Принцип управления по возмущению (принцип компенсации). Принцип обратной связи. Разомкнутые и замкнутые САУ. Классификация САУ. Общие принципы классификации. Стабилизирующие и программные САУ. Следящие САУ. Статические и астатические САУ.

Литература: [1, с. 6 – 29, 32 – 73], [5, с. 18 – 31]

1.3. Математические модели линейных САУ

Математическая модель связей входа и выхода составных частей материальных систем. Описание связей в технических системах с помощью дифференциальных уравнений. Линеаризация дифференциальных уравнений в автоматике. Основные формы записи линейных дифференциальных уравнений в автоматике. Уравнения статики. Статические характеристики элементов САУ. Вывод уравнений элементов САУ.

Литература: [1, с. 89 – 122], [5, с. 56 – 88]

1.4. Динамические характеристики звеньев и САУ

Типовые воздействия и реакция на них линейных объектов. Передаточная функция. Связь передаточной функции с дифференциальным уравнением. Переходная и импульсная переходная функции, связь их с передаточной функцией. Постоянная времени динамического звена. Составление дифференциальных уравнений САУ. Исследование САУ по дифференциальным уравнениям в установившемся режиме. Частотные характеристики и частотные передаточные функции. Связь частотных характеристик с дифференциальными уравнениями. Логарифмические частотные характеристики. Типовые динамические звенья и их характеристики. Позиционные звенья: безынерционное, апериодические 1-го и 2-го порядков, колебательное, консервативное. Дифференцирующие звенья: идеальное, реальное. Интегрирующие звенья: идеальное, реальное.

Литература: [1, с. 93 – 149], [5, с. 61 – 113]

1.5. Структурные схемы САУ

Составление структурных схем САУ. Элементы структурных схем: динамическое звено, сравнивающее устройство, сумматор, узел. Типовые соединения звеньев: последовательное, параллельное, встречно-параллельное. Основные и дополнительные правила преобразования структурных схем. Регуляторы. Понятие о законах регулирования. Пропорциональные (П), интегральные (И), пропорционально-интегральные (ПИ), пропорционально-дифференциальные (ПД), пропорционально-интегрирующе-дифференциальные (ПИД) регуляторы. Характеристики типовых законов регулирования.

Литература: [1, с. 103 – 131, 74 – 79], [5, с. 102 – 113]

1.6. Устойчивость систем автоматического регулирования (САУ)

Понятие устойчивости. Устойчивость по Ляпунову. Алгебраический

критерий устойчивости Рауса-Гурвица. Выбор параметров САР с помощью критериев устойчивости Рауса-Гурвица. Понятие о критическом (предельном) коэффициенте усиления. Частотные критерии устойчивости (Михайлова, Найквиста). Понятие о запасах устойчивости. Определение критического коэффициента усиления и запасов устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам. Определение области устойчивости методом Д-разбиения.

Литература: [1, с. 179 – 214] , [2, с. 101 – 120]

1.7. Качество процессов управления в автоматических системах

Понятие о качестве процессов управления в САР. Основные показатели качества: время регулирования, статическая ошибка, перерегулирование. Оценка качества процессов управления по переходным функциям. Методы построения переходных функций по дифференциальным уравнениям и по вещественным частотным характеристикам (ВЧХ). Косвенные оценки показателей качества переходных процессов: по амплитудно-фазочастотной характеристике (АФЧХ), корневые методы, интегральные оценки. Диаграмма Вышнеградского. Точность САР в статике и режимах вынужденного движения. Общие методы повышения точности САР: увеличение общего коэффициента усиления, повышение порядка астатизма.

Литература: [1, с. 93 – 149] , [5, с. 61 – 113]

1.8. Коррекция динамических свойств и синтез систем управления

Корректирующие звенья и способы их включения в систему. Последовательные и параллельные корректирующие устройства. Методы синтеза корректирующих устройств. Аналитическое определение передаточной функции корректирующего звена. Определение передаточной функции корректирующего звена с помощью ЛАЧХ. Построение желаемой ЛАЧХ.

Литература: [1, с. 150 – 194] , [2, с. 101 – 123]

1.9. Нелинейные и дискретные САУ

Определение нелинейных систем. Типы нелинейностей. Особенности нелинейных систем. Устойчивость нелинейных систем. Критерий устойчивости Попова. Дискретные САУ. Понятие о дискретных системах. Классификация дискретных систем. Импульсные системы. Устойчивость и качество линейных дискретных систем.

Литература: [1, с. 242 – 264, 289 – 290] , [2, с. 194 – 336, 245 – 250]

1.10. Основные понятия и определения систем телемеханики*

Структурные схемы управления на расстоянии с одно- и двухсторонней передачей. Телеизмерение, телеконтроль, телесигнализация, телеуправление. Схемы местного и дистанционного управления. Классификация систем телемеханики.

Литература: [3, с. 6 – 19]

1.11. Сообщения и сигналы

Особенности телемеханической информации. Структура телемеханической системы для передачи сообщений. Основные отличия систем телемеханики от систем связи. Кодирование телемеханической информации.

Литература: [3, с. 20 – 24, 77 – 127]

1.12. Специфика входных и выходных устройств телемеханики

Специфика требований к достоверности сообщений. Специфика структурных схем. Специфика аппаратуры и способов разделения каналов. Телемеханические сигналы.

Литература: [3, с. 20 – 24]

1.13. Общие принципы телеуправления и телесигнализации

Устройства с многопроводным, частотным, временным разделением сигналов. Методы синхронизации при временном разделении. Защитные интервалы времени при временном разделении и защитные интервалы частот при частотном разделении.

Литература: [3, с. 47 – 56]

1.14. Системы интенсивности в телеизмерении

Системы тока. Системы напряжения. Достоинства и недостатки систем интенсивности. Область применения.

Литература: [3, с. 341 – 350, 367 – 370]

1.15. Системы с модулированными и кодовыми сигналами

* Темы 1.10 – 1.16 входят в программу дисциплины "Основы автоматики и телемеханики" и предназначены только для специальности 1-38 02 03.

Времяимпульсные, частотно-импульсные, кодоимпульсные, числоимпульсные системы. Системы с информационной и решающей обратной связью.

Литература: [3, с. 341 – 350, 370 – 399]

1.16. Каналы связи

Основные понятия. Классификация. Полоса пропускания. Проводные, радио-, световодные линии. Помехи в каналах связи. Помехоустойчивость при непрерывных и дискретных сигналах.

Литература: [3, с. 128 – 183]

2. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Исследование синхронной передачи на сельсинах.
2. Исследование системы автоматического регулирования температуры
3. Экспериментальное определение динамических характеристик элементов системы регулирования.
4. Исследование астатической следящей системы автоматического регулирования измерительного устройства.
5. Исследование следящей системы автоматического регулирования с реостатной обратной связью.
6. Исследование дифференцирующих и интегрирующих динамических звеньев.
7. Определение статических характеристик реле.
8. Исследование временных параметров электромагнитных реле.
9. Сборка схем и испытание систем телемеханики.
10. Телеуправление и телесигнализация с амплитудно-полярным избором.
11. Частотно-импульсная система телеизмерения.

3. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Построение функциональных схем САУ.
2. Построение статических и астатических САУ.
3. Составление дифференциальных уравнений динамических звеньев и систем.
4. Построение и преобразование структурных схем САУ, определение их передаточных функций.
5. Построение частотных характеристик динамических звеньев.

6. Определение устойчивости САУ.
7. Определение качественных показателей САР.
8. Расчет проводных линий связи.
9. Расчет постоянной передачи телеметрической линии.
10. Оценка искажений в режиме передачи кодовой комбинации и в режиме ее ожидания.

4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА.

Цель контрольной работы – закрепить пройденный материал и проверить, насколько успешно студент-заочник ориентируется в литературе, рекомендуемой для изучения курса.

Контрольные работы имеют 20 вариантов. Номер варианта должен соответствовать двум последним цифрам шифра.

Каждая контрольная работа оформляется в отдельной ученической тетради или на отдельных листах. Объем контрольной работы составляет 20 - 24 страницы включая схемы. Все расчеты должны сопровождаться ссылкой на литературный источник, из которого взяты расчетные формулы. В конце работы обязательно приводится список использованных источников литературы.

Содержание контрольной работы

Автоматическая система, предназначенная для дистанционного управления объектом, представлена в виде следующей структурной схемы (рис.1).

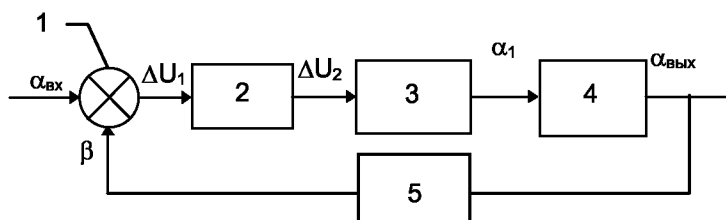


Рис.1. Схема нескорректированной следящей системы.

НЕОБХОДИМО:

1. Получить передаточные функции разомкнутой и замкнутой САУ по задающему воздействию для заданных выражений передаточных функций звеньев (табл.1) и значений параметров (табл.2), (табл.3).
2. Определить устойчивость исходной САР с помощью одного из критериев (Гурвица, Михайлова, Найквиста) в соответствии с вариантом.
3. Определить устойчивость САР по логарифмическим частотным характеристикам.

Если САР устойчива, определить запас устойчивости, и определить качество процесса регулирования.

4. Построить желаемую ЛАЧХ для заданных требований к следящей системе регулирования.

5. Рассчитать корректирующее звено для исходной системы.

6. Построить АЧХ, ВЧХ. скорректированной исходной системы.

7. Построить переходной процесс системы и определить основные показатели качества работы САР.

8. Определить область устойчивости по параметру K методом D -разбиения.

В таблице 1 приведены выражения передаточных функций звеньев структурной схемы, изображенной на рис.1 для каждого варианта.

В таблице 2 указаны параметры динамических звеньев для каждого варианта.

В таблице 3 указаны исходные параметры следящей желаемой САР.

Номер варианта в табл.1 и 2 соответствует номеру студента в списке группы.

Литература

1. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1985.

2. Теория автоматического управления/Под ред. Воронова А.А. – М.: Высшая школа, ч. 1, 2. – 1986.

3. Ильин В.В. Телеуправление и телеизмерение: Уч. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.

4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

5. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. – М.:Машиностроение, 1978.

6. Минченя В.Т., Савченко А.Л. Основы автоматике. Лабораторный практикум. Ч.1. – Минск, 2002.

7. Теория автоматического управления. Учебник/Под ред. А.В.Нетушила. – М.: Высшая школа, 1983. – 432 с.

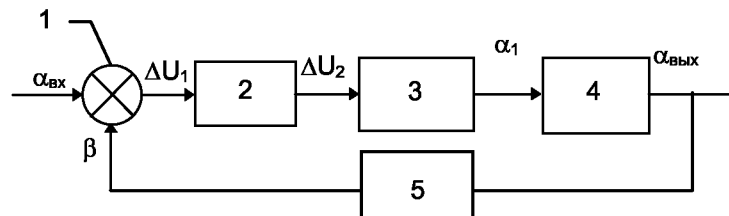
8. Макаров В.А. Теоретические вопросы телемеханики. – Л.: ЛГУ, 1974. – 286 с.

9. Ливанов Ю.В., Жуков В.М. Телемеханика. – М.: Недра, 1978. – 192 с.

10. Минченя В.Т. Автоматика и автоматизация производственных процессов. Лабораторный практикум. Ч 1. – Минск, 1986.

Примеры некоторых расчетов в контрольной работе.

1. Расчет частотных характеристик системы (определение АФЧХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ВЧХ, ЛФЧХ).



Звено 1. Вращающиеся трансформаторы, которые по углам поворота α и β дают сигнал рассогласования δ . Этот угол рассогласования преобразуется в переменное напряжение ΔU_1 .

Передаточная функция этого звена $W_1(p) = K_1 = 34$

Звено 2. Тиристорный усилитель является аperiodическим звеном 1-го порядка.

Передаточная функция усилителя

$$W_2(p) = \frac{K_2}{(T_1 p + 1)} = \frac{2000}{(0,01 p + 1)}$$

Звено 3. Двигатель постоянного тока является интегрирующим звеном с замедлением. Его передаточная функция:

$$W_3(p) = \frac{K_3}{p(T_2 p + 1)} = \frac{1,468}{p(0,027 p + 1)}$$

Звено 4. Понижающий редуктор. Поскольку его момент инерции пренебрежимо мал, то мы считаем его идеальным усилительным звеном с передаточной функцией

$$W_4(p) = \frac{1}{K_4} = \frac{1}{423} = 0,002$$

Звено 5. Это звено обратной связи. Как для большинства следящих систем в данной САР используется единичная обратная связь.

Общая передаточная функция разомкнутой системы в операторной форме будет определяться произведением передаточных функций звеньев 1 – 5:

$$W(p) = \frac{34 \cdot 2000 \cdot 1,468 \cdot 0,002}{p \cdot (0,027p + 1) \cdot (0,01p + 1)} = \frac{236}{p \cdot (0,027p + 1) \cdot (0,01p + 1)}$$

Для получения частотной передаточной функции необходимо в передаточной функции в операторной форме заменить p на $j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{236}{j\omega(0,027j\omega + 1)(0,01j\omega + 1)}$$

Для построения аппроксимирующей логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) выполним следующие расчеты.

Начальная ордината ЛАЧХ (на частоте 1 Гц): $A_0 = 20 \lg K = 20 \cdot \lg 236 = 47,5$ дБ.

Наклон низкочастотного участка ЛАЧХ равен -20μ дБ/дек, где μ – степень оператора p в знаменателе передаточной функции. $\mu = 1$, следовательно наклон низкочастотного участка ЛАЧХ равен -20 дБ/дек.

Точка пересечения низкочастотного участка ЛАЧХ с осью частот определяется как $\sqrt[4]{K}$ Гц, т. е. в данном случае это 236 Гц.

Частоты излома ЛАЧХ (сопрягающие частоты) определяются по формуле:

$$\omega_{\text{сопр.}i} = 1/T_i$$

Следовательно $\omega_1 = 1/0,027 = 37$ Гц; $\omega_2 = 1/0,01 = 100$ Гц.

После первой частоты излома наклон ЛАЧХ изменяется на -20 дБ/дек, так как постоянная времени принадлежит интегрирующему звену; после второй – также на -20 дБ/дек, так как постоянная времени принадлежит апериодическому звену.

График ЛАЧХ показан ниже. Для сравнения далее показана кривая ЛАЧХ, построенная по точкам с помощью программы MathCAD.

Указания по построению аппроксимирующих ЛАЧХ

а) Определяются значения сопрягающих частот $\omega_{\text{сопр.}i}$ в которых ЛАЧХ имеет изломы. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладываются значения сопрягающих частот полученных по выражению

$$\omega_{\text{сопр.}i} = 1/T_i$$

где T_i – постоянная времени динамического звена.

б) Построить низкочастотную прямую ЛАЧХ для значений $\omega < \omega_{\text{сопр.}i}$ с наклоном -20μ дБ/дек, где μ – число интегрирующих звеньев в главной цепи системы. Эта прямая при $\omega = 1$ должна иметь ординату, равную $20 \lg K$, где K – передаточный коэффициент системы управления.

в) Для каждой из сопрягающих частот $\omega_{сопр.i}$ изменить наклон ЛАЧХ по отношению к предшествующему участку, причем наклон характеристики зависит от вида звена для данной сопрягающей частоты. Для идеального дифференцирующего звена наклон изменяется на +20 дБ/дек; для апериодического и интегрирующего звеньев – на –20 дБ/дек; для колебательного – на –40 дБ/дек; для форсирующего – на +20 дБ/дек.

График асимптотической ЛАЧХ

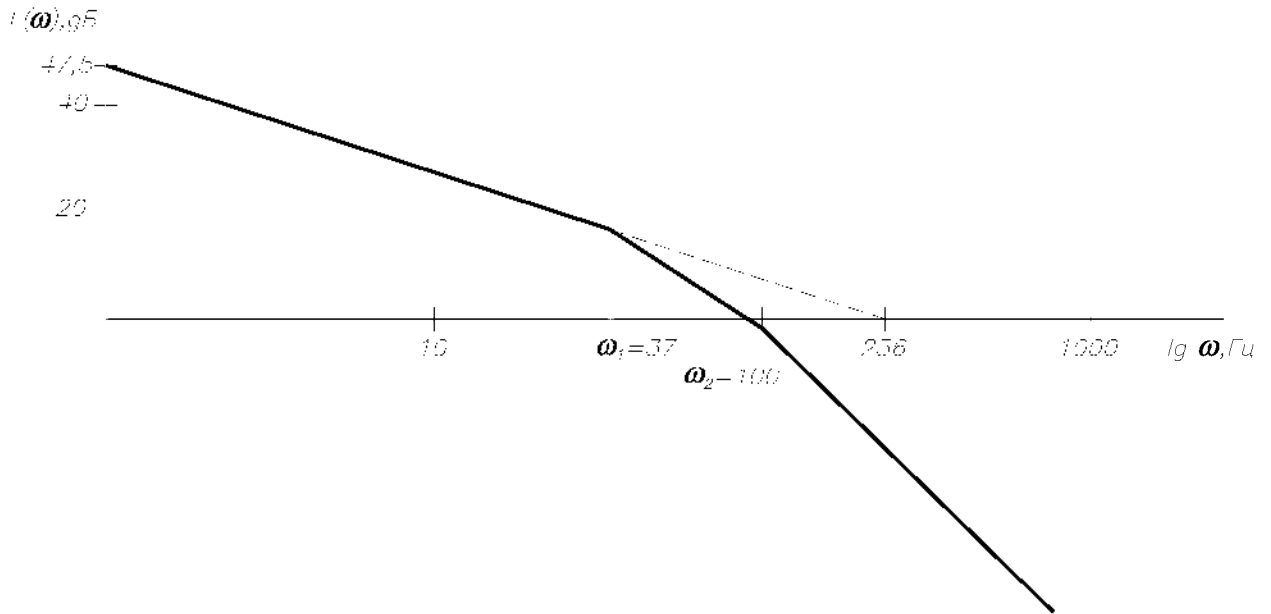
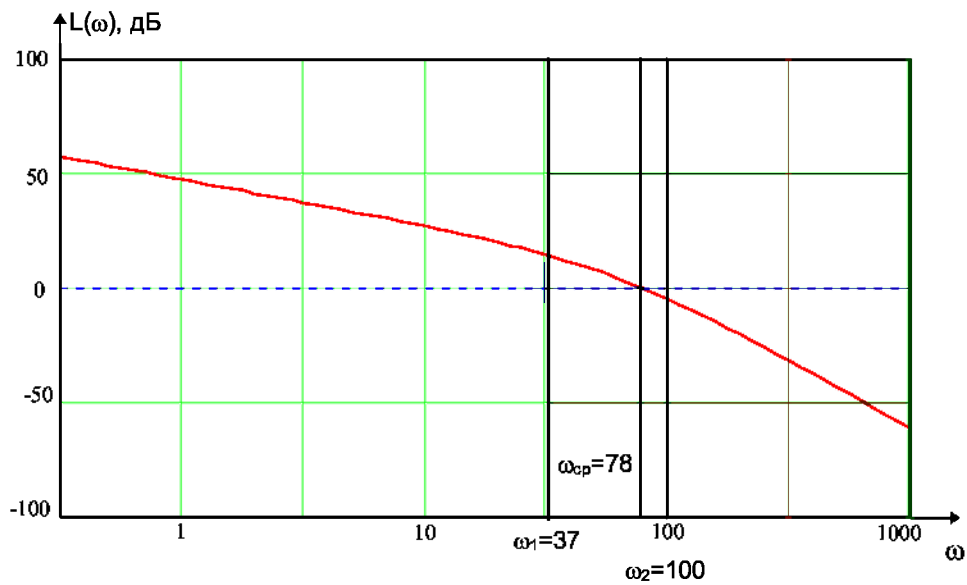


График ЛАЧХ, построенный по точкам

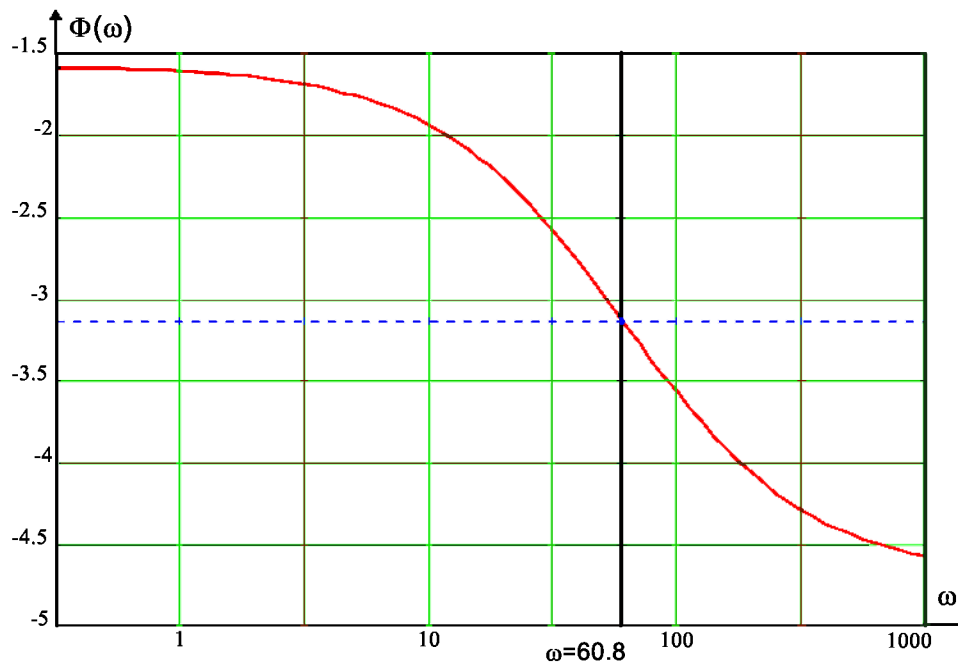


Построение логарифмической фазочастотной характеристики (ЛФЧХ) выполним по формуле:

$$\Phi(\omega) = -\pi/2 - \arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2).$$

График ЛФЧХ, построенный с помощью программы MathCAD, показан ниже.

График ЛФЧХ



Указание по построению ЛФЧХ

При построении ЛФЧХ следует помнить, что каждое динамическое звено дает сдвиг по фазе выходных сигналов по отношению к входным в зависимости от его вида на следующие величины:

- идеальное интегрирующее на $-\pi/2$;
- идеальное дифференцирующее на $+\pi/2$;
- апериодическое на $-\arctg(\omega T)$;
- колебательное на $-\arctg(2\xi T\omega)/(1 - T^2 \omega^2)$;
- форсирующее на $+\arctg(\omega T)$.

Как видно из частотных характеристик исходной системы, пересечение ЛФЧХ с линией $-\pi$ происходит левее пересечения ЛАЧХ с осью частот. Следовательно, система не только не обладает запасом устойчивости по частоте и

по амплитуде, но и не является устойчивой вообще. Коррекция этой системы необходима.

2. Определение устойчивости САР и области устойчивости по параметру К.

2.1 Нахождение критического коэффициента передачи по критерию Гурвица.

Для нахождения критического коэффициента передачи воспользуемся критерием устойчивости Гурвица.

Составим характеристическое уравнение нашей системы – знаменатель передаточной функции замкнутой системы. Обозначим через К общий коэффициент усиления.

Передаточная функция замкнутой системы:

$$W_3(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{\frac{K}{p(0,027p+1)(0,01p+1)}}{1 + \frac{K}{p(0,027p+1)(0,01p+1)}} = \frac{K}{p(0,027p+1)(0,01p+1) + K}$$

Характеристическое уравнение системы:

$$R(p) = p(0,027p+1)(0,01p+1) + K = 0,00027p^3 + 0,037p^2 + p + K$$

По критерию Гурвица устойчивая система должна удовлетворять двум условиям:

1-е условие: коэффициенты характеристического уравнения больше нуля:

$$0,00027 > 0$$

$$0,037 > 0$$

$$1 > 0$$

$$K > 0$$

Отсюда вытекает, что для устойчивости системы необходимо, чтобы $k > 0$.

2-е условие: положительность определителей Гурвица 2, 3, ...n-1 порядков, где n – порядок характеристического уравнения. В данном случае уравнение 3-го порядка, поэтому необходимо составить только одну матрицу 2-го порядка:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,037 & K \\ 0,00027 & 1 \end{vmatrix} = 0,037 - 0,00027 \cdot K > 0$$

Отсюда

$$K < \frac{0,037}{0,00027} = 137,4$$

Таким образом, критический коэффициент усиления системы не должен превышать 137,4.

Он должен попадать в пределы: $0 < K < 137,4$.

2.2 Нахождение область устойчивости системы методом D-разбиения по параметру К.

Для нахождения области устойчивости необходимо приравнять к нулю характеристическое уравнение системы и выразить из него переменный параметр К.

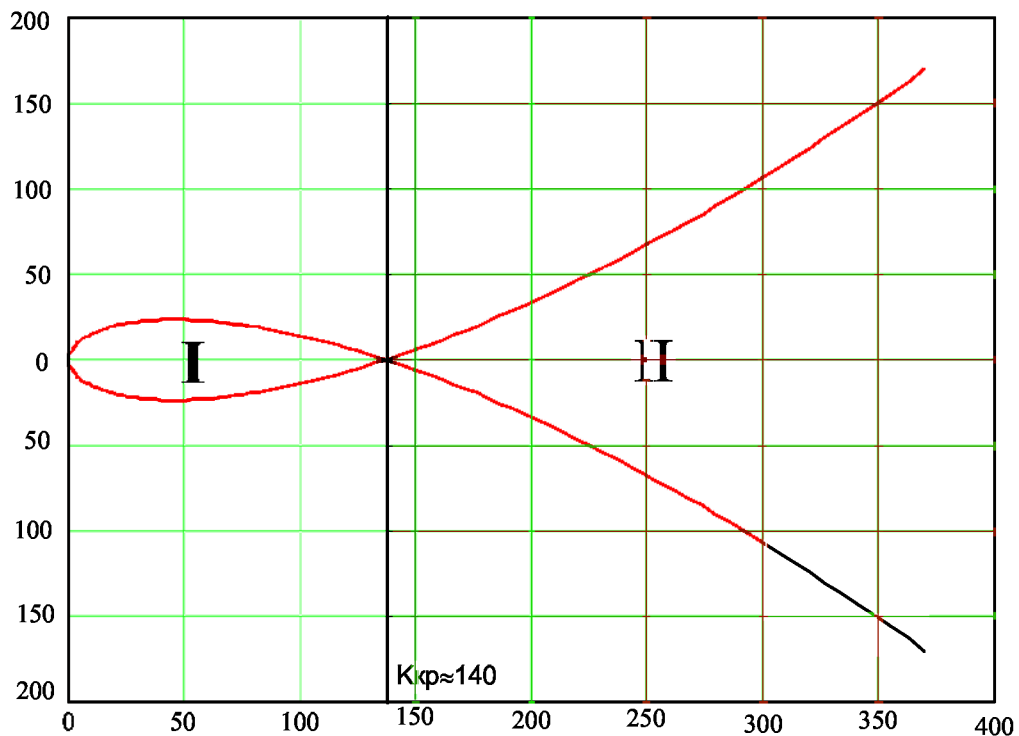
$$0,00027p^3 + 0,037p^2 + p + K = 0$$

$$K = -0,00027p^3 - 0,037p^2 - p$$

Заменим p на $j\omega$ и выделим действительную и мнимую части:

$$K = +0,00027j\omega^3 + 0,037\omega^2 - j\omega = 0,037\omega^2 + j(0,00027\omega^3 - \omega)$$

Задавая ω от $-\infty$ до $+\infty$, построим границы D-разбиения:



Возьмем из области I любую точку, подставим значение К для неё в характеристическое уравнение и определим, устойчива ли система по критерию Гурвица:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0,037 & 100 \\ 0,00027 & 1 \end{vmatrix} = 0,037 - 0,027 = 0,01 > 0$$

Вывод: область I является областью устойчивости.

Примечание: значение K для подстановки в характеристическое уравнение определяется как корень квадратный из суммы квадратов действительной и мнимой координат точки.

3. Корректировка качества работы САР.

3.1 Построение желаемой ЛАЧХ.

Корректировку качества работы САР будем производить с помощью ЛАЧХ разомкнутой системы. Для построения желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы (ЖЛАЧХ) найдем несколько характерных точек, через которые она должна проходить.

Рабочая точка.

Рабочая частота – это максимальная частота входного синусоидального сигнала, при котором динамическая ошибка системы ещё не должна быть больше заданной.

$$\text{Рабочая частота} - \omega_p = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega_{\max}} = \frac{1,6}{0,2} = 8 \text{ рад/с} = 1,3 \text{ Гц},$$

где Ω_{\max} – максимальная частота вращения вала; ε_{\max} – его максимальное угловое ускорение.

Амплитуда этого входного сигнала определяется по формуле:

$$\beta_0 = \frac{\Omega_{\max}}{\omega_p} = \frac{0,2}{8} = 0,025 = 0,72^\circ.$$

По заданию динамическая ошибка системы $\delta_d = 7'$.

Чтобы система обеспечивала заданную точность, необходимо соблюдение условия:

$$20\lg \frac{\beta_0}{\delta_d} \leq W(j\omega_p), \text{ т.е. ЖЛАЧХ должна проходить через или над точкой с}$$

координатами: $\left(\omega_p, 20\lg \frac{\beta_0}{\delta_d} \right)$.

$$\text{Следовательно: } W(j\omega_p) \geq 20\lg \left(\frac{0,7}{0,117} \right) = 20\lg(48,7) = 33,75\text{дБ}.$$

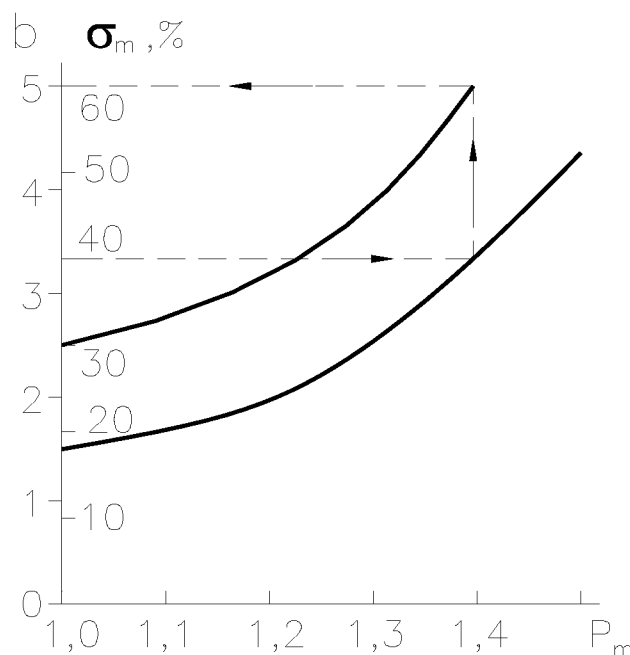
Частота среза.

На частоте среза ЖЛАЧХ пересекает горизонтальную ось. Чтобы система была устойчивой, необходимо, чтобы это пересечение осуществлялось участком ЛАЧХ с наклоном -20дБ/дек .

Частоту среза найдем, исходя из заданного времени переходного процесса $t_p=0,4\text{ с}$:

$$\omega_c \approx \frac{b\pi}{t_p},$$

где b – коэффициент, находимый из номограммы Солодовникова по допустимому перерегулированию $\sigma \approx 70 - \Delta\Phi = 70 - 30 = 40\%$ ($\Delta\Phi$ – необходимый запас по фазе). Номограмма Солодовникова показана ниже:



Номограмма Солодовникова и пример определения по ней коэффициента b при $\sigma = 40\%$; (P_m – значение максимума ВЧХ)

По номограмме $b = 5$.

Окончательно $\omega_c = \frac{5 \cdot \pi}{0,4} = 39,3\text{ Гц}$.

Частоты начала и конца среднечастотного участка ЖЛАЧХ определим по уравнениям:

$$\omega_2 = \frac{(0,5\pi - \Delta\Phi)\omega_c}{2} = \frac{(0,5\pi - 0,53)39,7}{2} = 24\text{ Гц}$$

$$\omega_3 = (8 \dots 10)\omega_2 = 130\text{ Гц}$$

Построение ЖЛАЧХ:

1. На оси частот наносим точку ($\omega_c, 0$)
2. Через эту точку проводим среднечастотный участок ЖЛАЧХ под наклоном -20 дБ/дек. Среднечастотный участок доводим слева до частоты ω_2 , справа – до ω_3 .
3. Наклон низкочастотной части ЖЛАЧХ должен совпадать с наклоном ЛАЧХ исходной системы. Чтобы ЖЛАЧХ проходила через или над рабочей точкой, необходимо ее прохождение на частоте $1,3$ Гц выше ординаты $33,75$ дБ. Поэтому проведем низкочастотный участок через точку ($1,3$ Гц, 37 дБ) под наклоном -20 дБ/дек, как у исходной ЛАЧХ. Ордината ЖЛАЧХ больше расчетной на 3 дБ, в связи с погрешностью аппроксимации.
4. Сопряжение низкочастотного участка -20 дБ/дек со среднечастотным -20 дБ/дек осуществим с помощью участка с наклоном -40 дБ/дек. Он пересекает НЧ участок на частоте $\omega_1 = 9,7$ Гц.
5. Высокочастотный участок ЖЛАЧХ построим параллельным ВЧ участку исходной ЛАЧХ – под -60 дБ/дек, сопрягающимся со среднечастотным участком -20 дБ/дек на частоте 130 Гц.

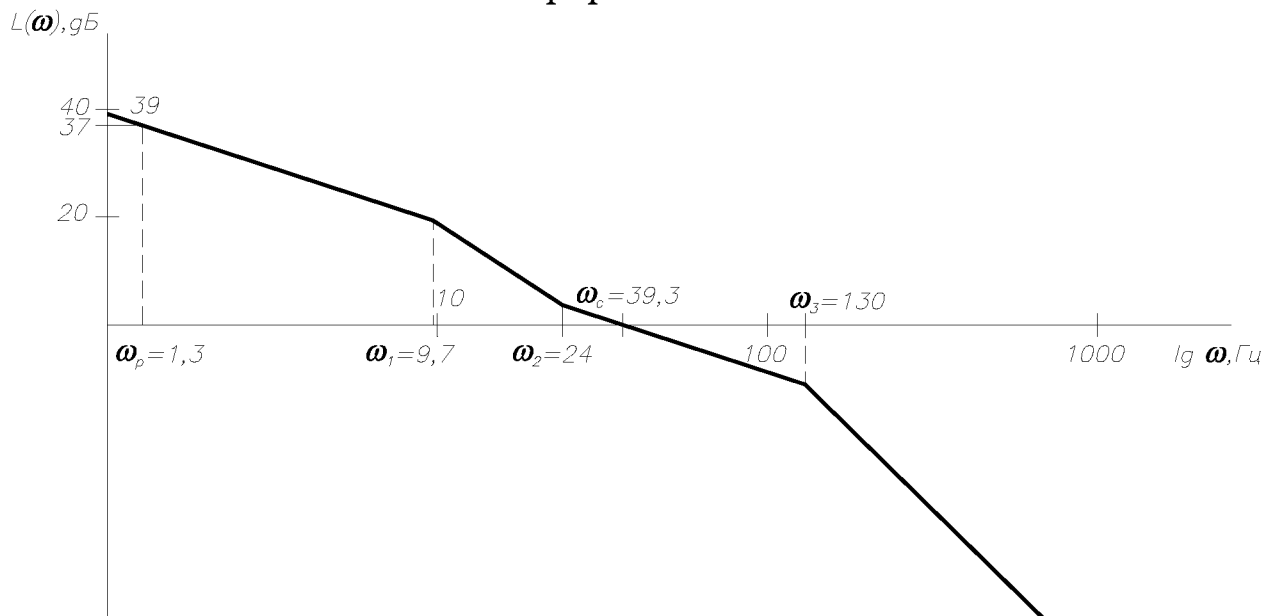
График ЖЛАЧХ показан ниже.

По виду ЖЛАЧХ запишем ее передаточную функцию:

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{89,1(0,042p + 1)}{p(0,103p + 1)(0,0077p + 1)^2}$$

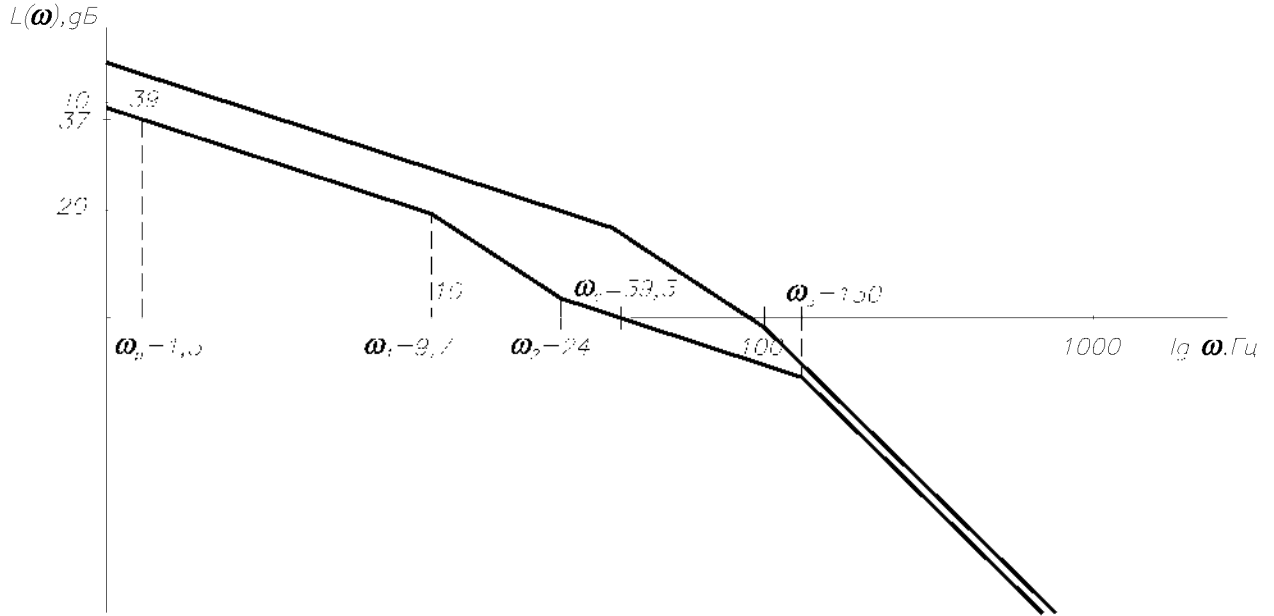
Здесь коэффициент передачи получен как $K = 10^{39/20} = 89,1$; постоянные времени – как величины, обратные значениям частот излома ЖЛАЧХ.

График ЖЛАЧХ

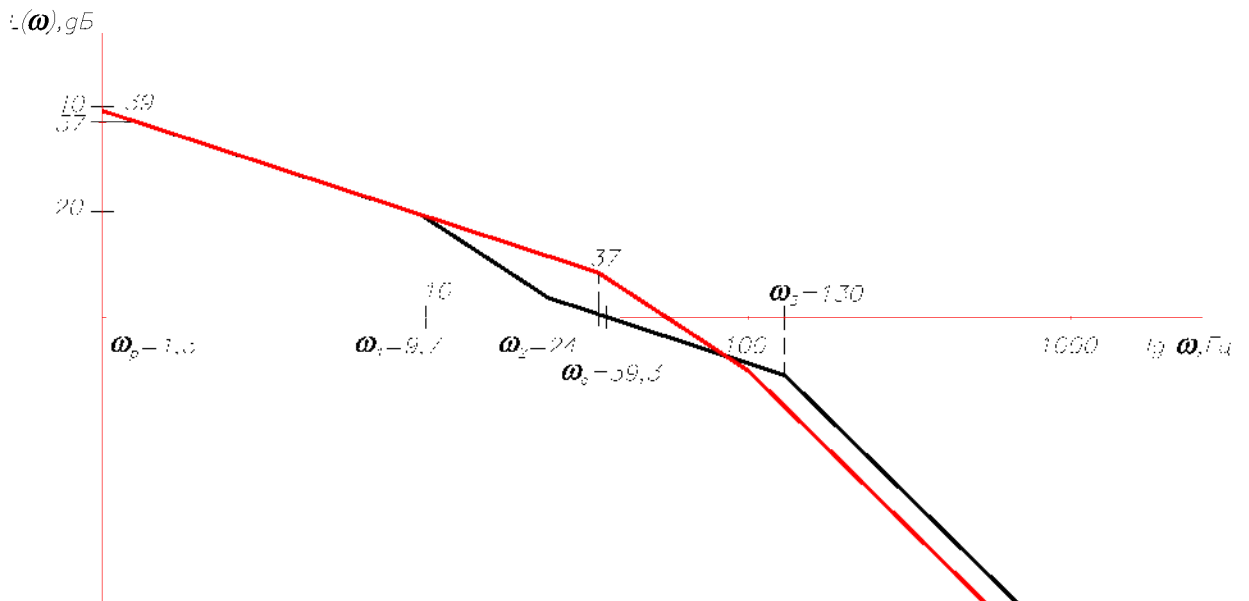


3.2 Выбор корректирующих звеньев.

Для выбора способа коррекции системы изобразим ЛАЧХ исходной системы и ЖЛАЧХ в одних координатах:



Опустим ЛАЧХ исходной системы вниз до совпадения низкочастотных участков. Это будет означать снижение коэффициента передачи системы до значения 89,1:



Для простоты реализации коррекции системы выбираем следующие корректирующие звенья:

Двигатель с передаточной функцией $W_3(p) = \frac{1,468}{p(0,027p+1)}$ охватываем местной обратной связью таким образом, чтобы в результате получилось звено с передаточной функцией $W_3'(p) = \frac{1,468}{p(0,103p+1)}$, т.е. постоянная времени двигателя увеличилась. Это необходимо для того, чтобы перегиб с -20 на -40 дБ/дек происходил на частоте $\omega = 9,7$ Гц, а не на частоте $\omega = 37$ Гц.

Обозначим через $Z(p)$ передаточную функцию ОС. Тогда:

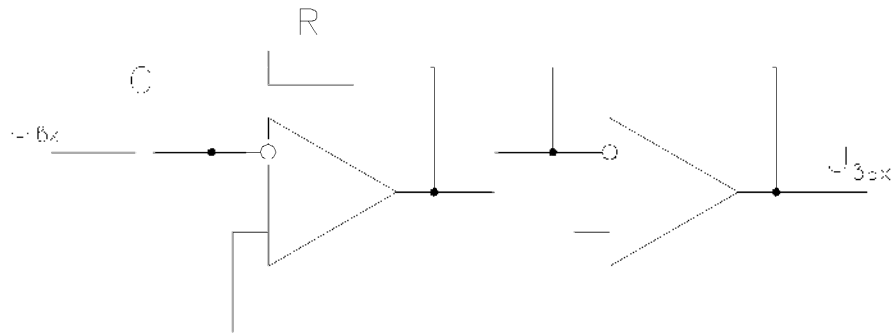
$$W_3'(p) = \frac{W_3(p)}{1 + W_3(p) \cdot Z(p)} = \frac{\frac{1,468}{p(0,027p+1)}}{1 + \frac{1,468}{p(0,027p+1)} \cdot Z(p)} = \frac{1,468}{p(0,027p+1) + 1,468 \cdot Z(p)}$$

Приравняем $W_3(p)$ к требуемой функции $W_3'(p)$ и выразим из этого уравнения $Z(p)$:

$$\begin{aligned} \frac{1,468}{p(0,027p+1) + 1,468 \cdot Z(p)} &= \frac{1,468}{p(0,103p+1)} \\ p(0,027p+1) + 1,468 \cdot Z(p) &= p(0,103p+1) \\ 0,027p^2 + p + 1,468 \cdot Z(p) &= 0,103p^2 + p \\ Z(p) &= \frac{0,103p^2 - 0,027p^2}{1,468} = \frac{0,076p^2}{1,468} = 0,057p^2 \end{aligned}$$

Таким образом, мы нашли передаточную функцию звена обратной связи. Для реализации этого звена необходимо учесть, что мы охватываем обратной связью двигатель, у которого выходной величиной является угол поворота вала, а входной – электрическое напряжение. Поэтому на выходной вал необходимо установить тахогенератор постоянного тока. Напряжение на его обмотках будет пропорционально угловой скорости, т.е. его передаточная функция $W_{oc1} = k_{тг} \cdot p$. Выберем тахогенератор с крутизной характеристики $k_{тг} = 0,1$ В·с/рад. Последовательно тахогенератору необходимо включить еще одно дифференцирующее звено на операционном усилителе, на вход которого включен конденсатор. Это будет соответствовать звену с передаточной функцией $W_{oc2} = k \cdot p$. Найдем параметр k этого звена.

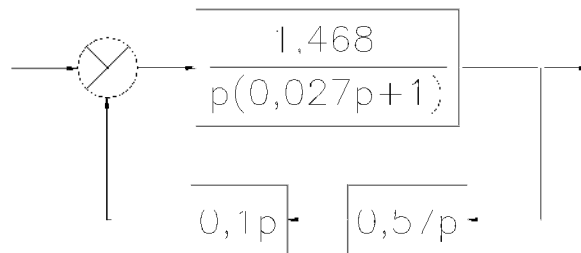
Передаточная функция всей ОС – $0,057p^2$, тахогенератора – $0,1p$. Поэтому $T = 0,057/0,1 = 0,57$ с. Схема дифференцирующей цепи показана ниже:



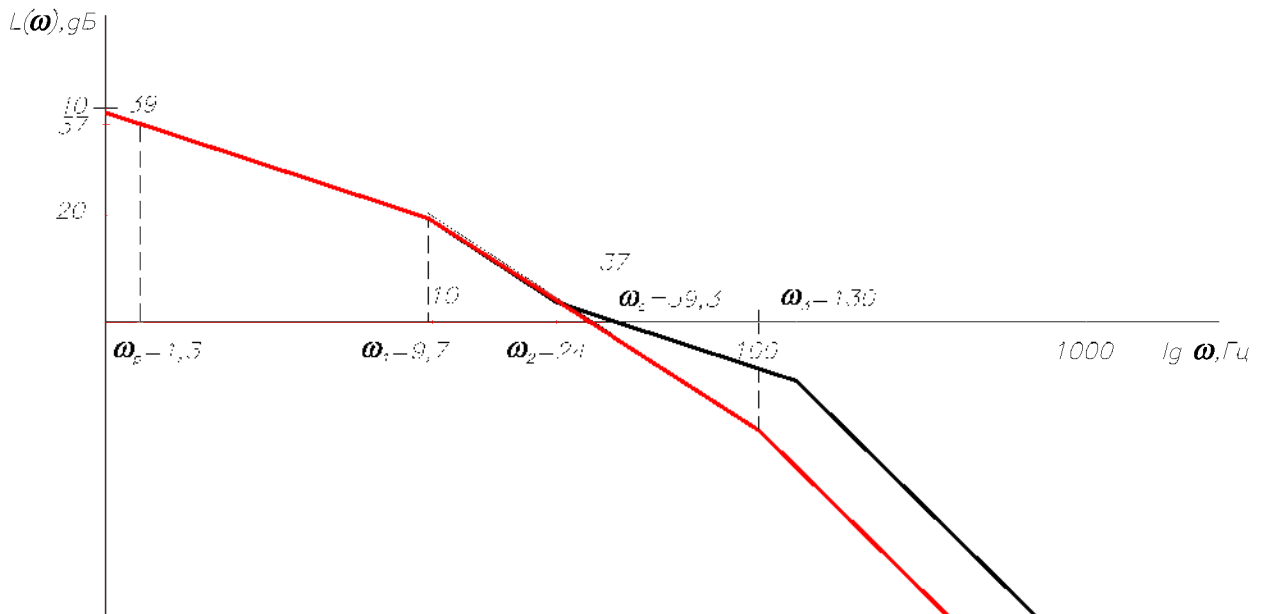
Инвертор на втором операционном усилителе предназначен для инвертирования выходного сигнала после первого ОУ, который тоже является инвертирующим.

Полагая $R = 10 \text{ кОм}$, получим $C = 57 \text{ мФ}$.

Функциональная схема двигателя, охваченного местной ОС:



После выполнения этой операции график ЛАЧХ изменится следующим образом:



Второе корректирующее звено включим в местную ОС с тиристорным усилителем для уменьшения его постоянной времени с 0,01 до 0,0077. Это приведёт к тому, что перегиб с -40 до -60 дБ/дек будет на частоте $\omega_2=130$ Гц, а не на частоте 100 Гц.

В качестве звена применим пропорциональное звено с неизвестным пока коэффициентом усиления k_{oc} .

Для его расчета запишем передаточную функцию звена, охваченного ОС:

$$W_2'(p) = \frac{\frac{2000}{0,01p+1}}{1 + \frac{2000}{0,01p+1} \cdot k_{oc}} = \frac{2000}{0,01p+1 + 2000 \cdot k_{oc}} = \frac{\frac{2000}{1+2000k_{oc}}}{\frac{0,01}{1+2000k_{oc}} p + 1}$$

Таким образом, новое значение параметра T будет равно $0,01/(1+200k_{oc})$. Приравняв его к требуемому 0,0077, найдем k_{oc} :

$$\frac{0,01}{1+2000k_{oc}} = 0,0077$$

$$1+2000k_{oc} = 1,299$$

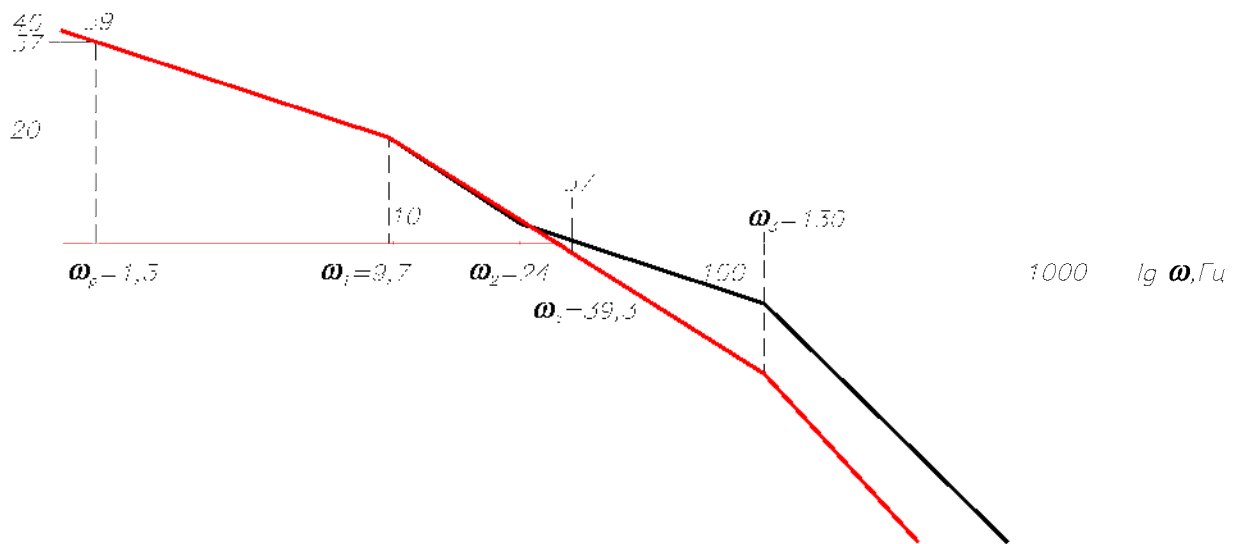
$$k_{oc} = \frac{0,299}{2000} = 1,5 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Новый коэффициент усилителя с ОС будет } \frac{2000}{1+2000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 1538$$

$$\text{Новая передаточная функция } W_2' = \frac{1538}{(0,0077p+1)}$$

График ЛАЧХ теперь выглядит следующим образом:

$L(\omega), \text{дБ}$



Остальную коррекцию выполним с помощью последовательных корректирующих звеньев.

С учетом произведенной коррекции в пунктах разомкнутая система будет иметь следующую передаточную функцию:

$$W'(p) = 34 \cdot \frac{1538}{(0,0077p + 1)} \cdot 0,002 \cdot \frac{1,468}{p(0,103p + 1)} = \frac{153,5}{p(0,0077p + 1)(0,103p + 1)}$$

Передаточную функцию желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы мы нашли выше:

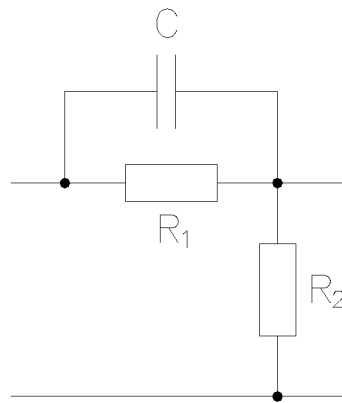
$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{89,1(0,042p + 1)}{p(0,103p + 1)(0,0077p + 1)^2}$$

Обозначим через $Z(p)$ передаточную функцию последовательного корректирующего устройства.

Так как $W'(p) * Z(p) = \tilde{W}_{\text{ж}}(p)$, то

$$Z(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W'(p)} = \frac{\frac{89,1(0,042p + 1)}{p(0,103p + 1)(0,0077p + 1)^2}}{\frac{153,5}{p(0,103p + 1)(0,0077p + 1)}} = \frac{0,58(0,042p + 1)}{(0,0077p + 1)}$$

Такое корректирующее звено можно реализовать с помощью типовой RC-цепи.



Передаточная функция такого звена $W_{\pi}(p) = k \cdot \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

$$T_1 = R_1 C$$

$$T_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$T_1 = 0,042$$

$$T_2 = 0,0077$$

Найдем параметры цепи, полагая $R_1 = 1$ кОм:

$$T_1 = R_1 C \quad C = T_1 / R_1 = 0,042 / 1000 = 42 \text{ мФ}$$

$$T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C = T_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{0,0077}{0,042} = 0,167$$

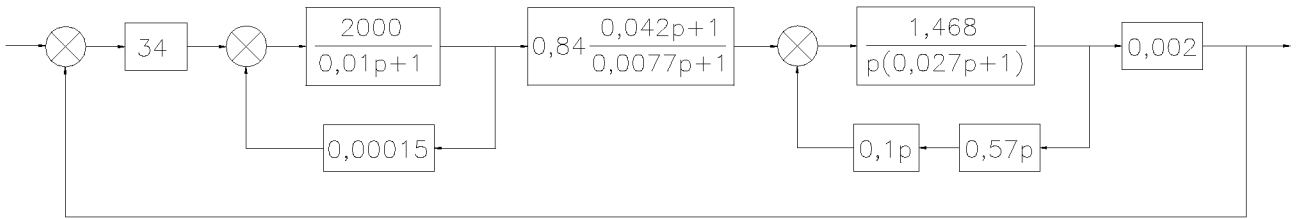
$$R_2 = 0,167 R_1 + 0,167 R_2$$

$$R_2 = \frac{0,167}{0,882} R_1 = 0,189 R_1 = 0,189 \cdot 1000 \approx 190 \text{ Ом}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{1}{1 + \frac{0,189}{1}} = 0,84$$

3.3 Определение передаточной функции скорректированной системы.

Структурная схема скорректированной САР выглядит следующим образом:



Передаточная функция разомкнутой системы определена выше:

$$W(p) = \frac{89,1(0,042p + 1)}{p(0,103p + 1)(0,0077p + 1)^2}$$

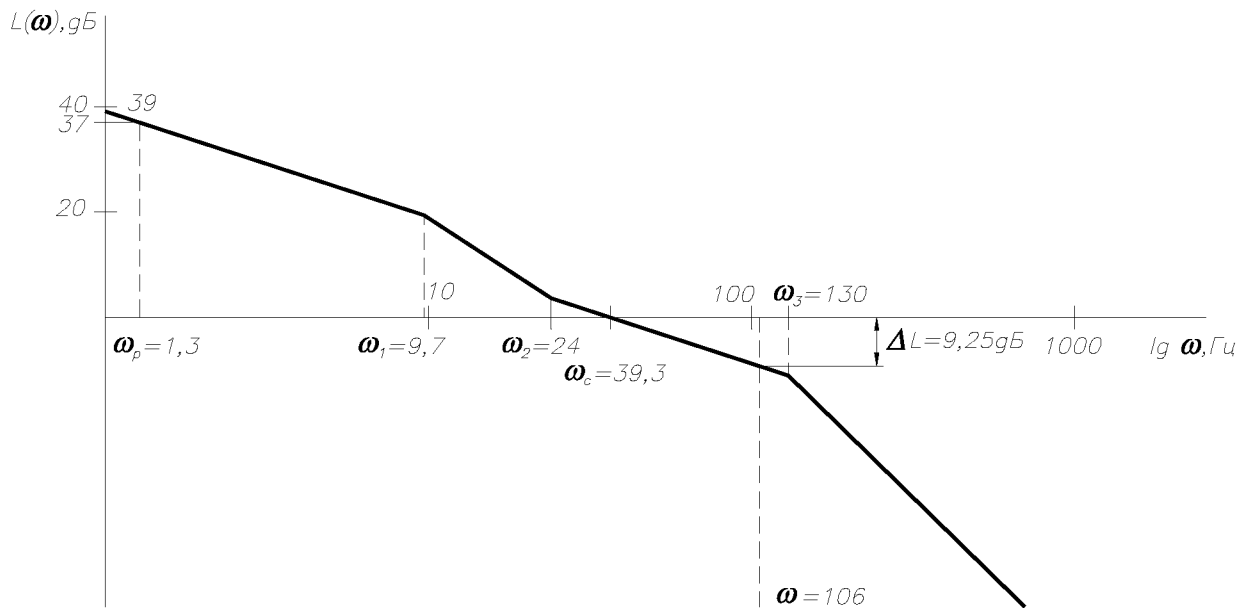
Для замкнутой системы передаточная функция:

$$W_3(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{89,1(0,042p + 1)}{p(0,0077p + 1)^2(0,103p + 1) + 89,1(0,042p + 1)}$$

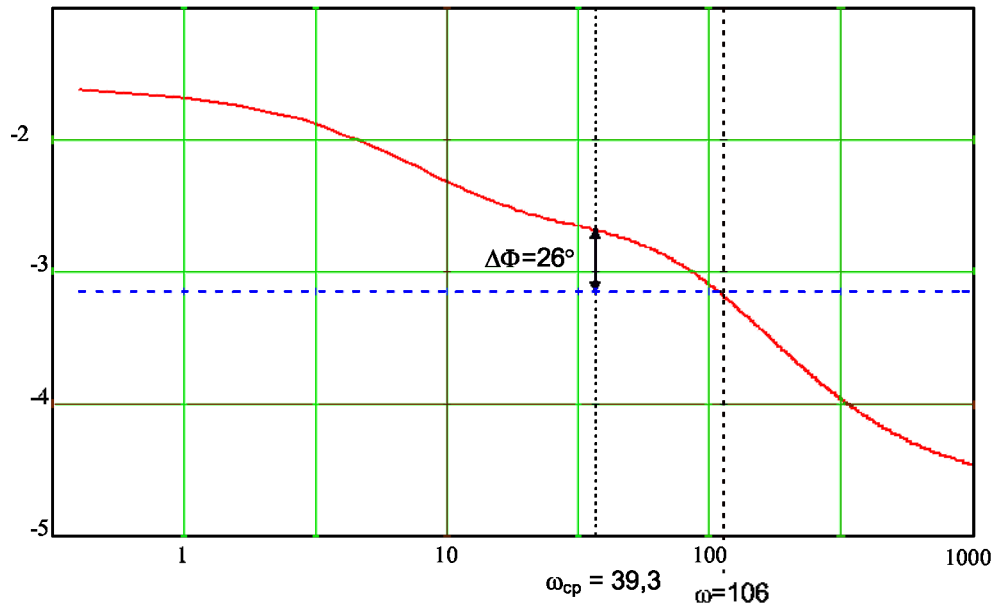
3.4. Построение ЛАЧХ скорректированной системы

Для получения запасов по амплитуде и по фазе построим ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы.

ЛАЧХ скорректированной системы:
(построена ранее как желаемая ЛАЧХ)



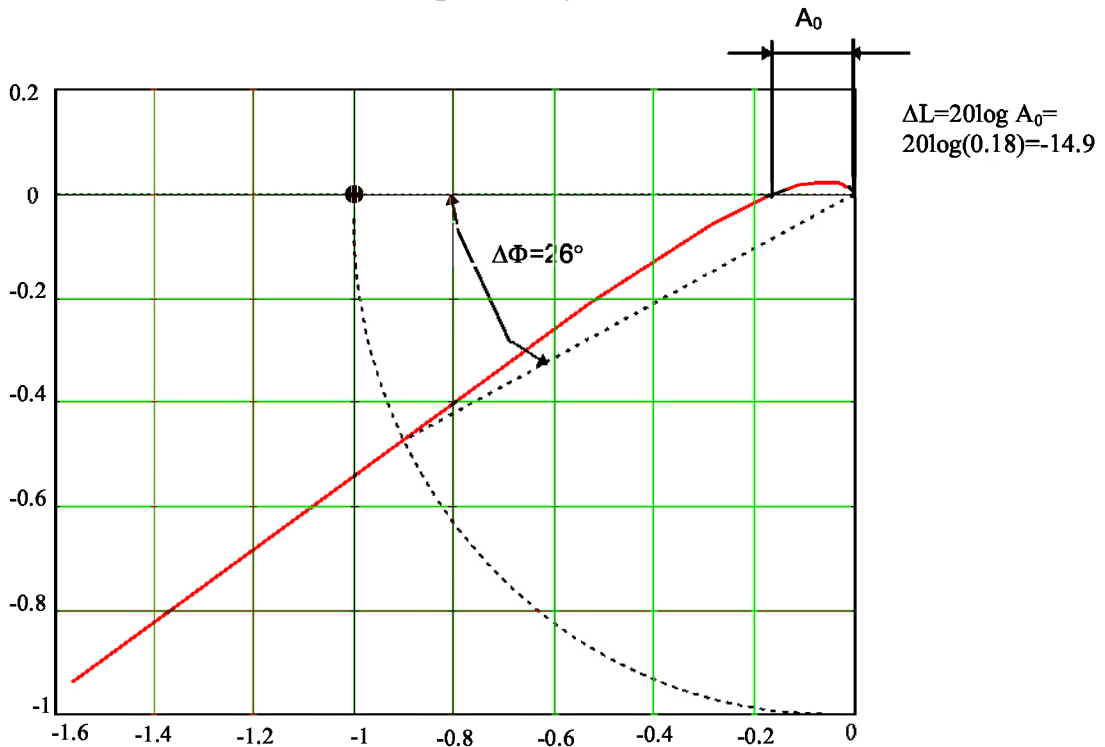
ЛФЧХ скорректированной системы:



Как видно из характеристик, система является устойчивой и имеет достаточные запасы по фазе и по амплитуде.

Построим другие характеристики нашей системы:

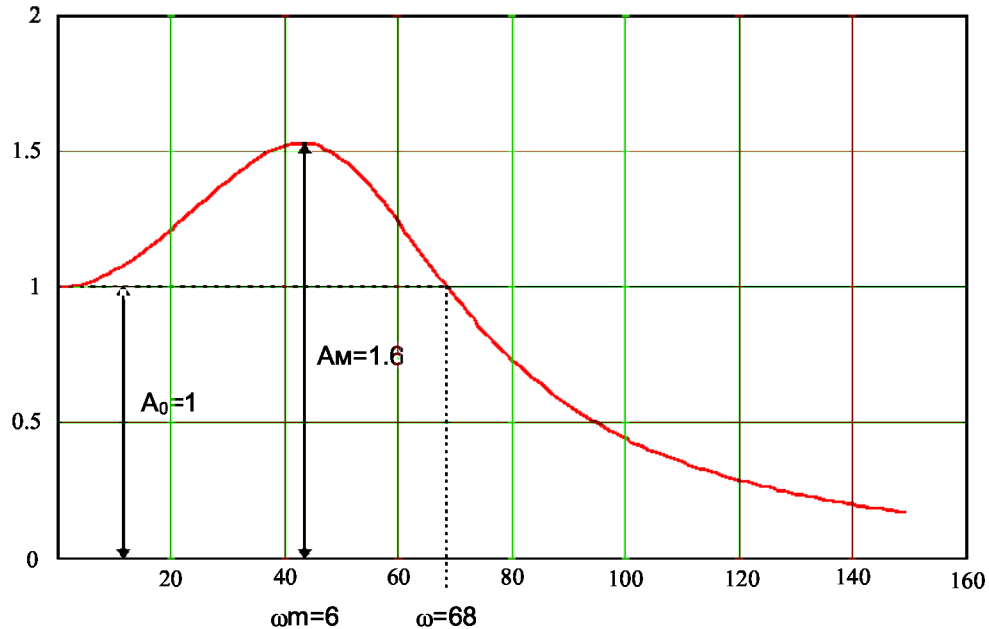
АФЧХ разомкнутой системы.



По ней тоже можно определить запасы устойчивости системы.

Так как АФЧХ не охватывает точку с координатами $(-1j, 0)$, то по критерию Найквиста замкнутая система будет устойчивой.

АЧХ замкнутой системы.

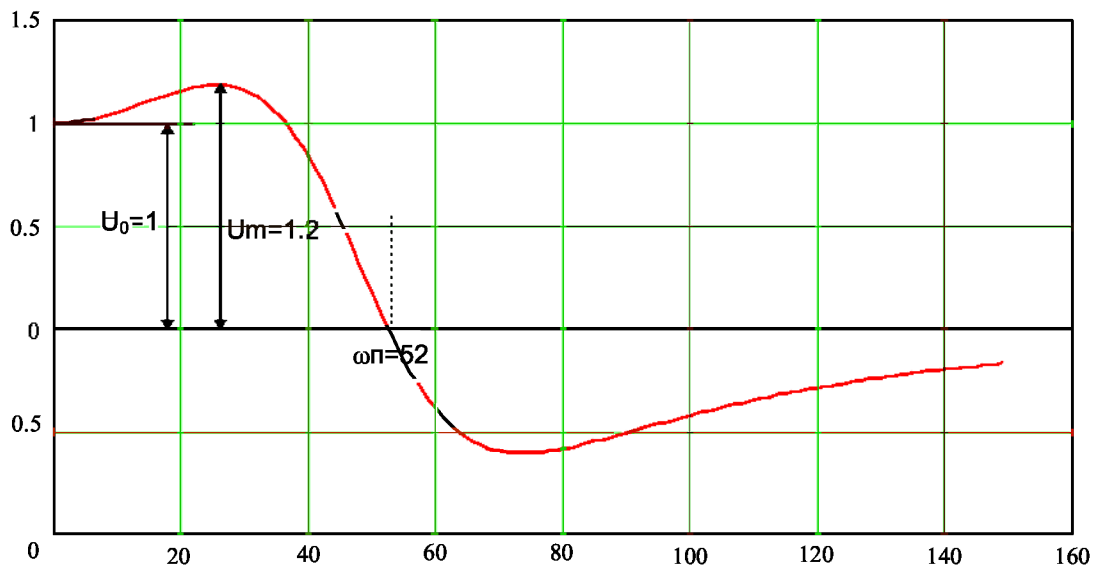


По ней можно оценить некоторые параметры качества регулирования.

Колебательность САР: $M = \frac{A_m}{A_0} = \frac{1,6}{1} = 1,6$

Полоса пропускания : 0 – 52 Гц

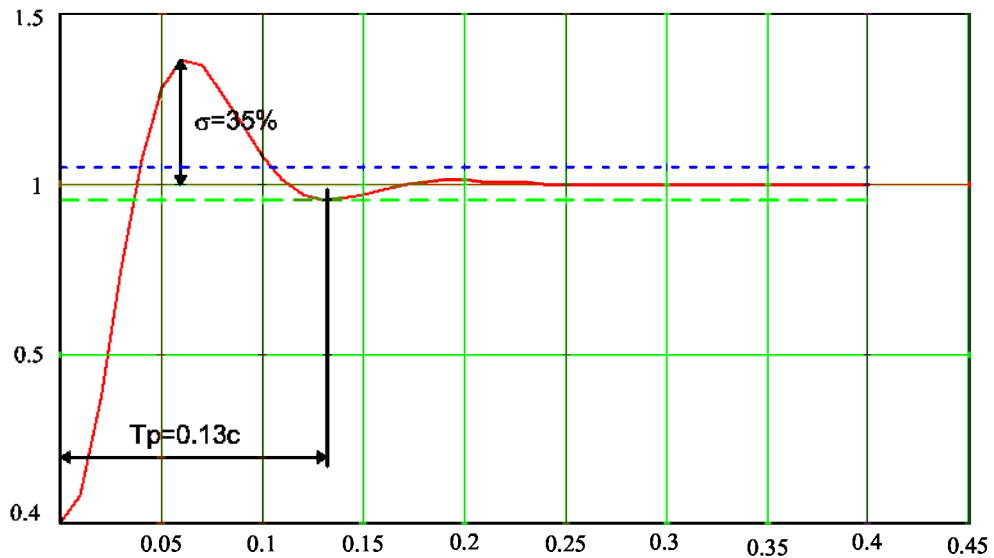
Вещественная частотная характеристика (ВЧХ) замкнутой системы.



Строится для определения параметров качества регулирования - времени переходного процесса. С её помощью можно построить график переходного процесса. По ней можно сказать следующее:

1. Установившееся значение переходной функции равно $U_0=1$
2. Перерегулирование $\sigma \approx \frac{1,18U_m - U_0}{U_0} \cdot 100\% = \frac{1,18 \cdot 1,2 - 1}{1} \cdot 100\% = 41\%$
3. Время переходного процесса $t_p > \frac{\pi}{\omega_n} = \frac{\pi}{52} = 0,06$
4. Переходной процесс:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega$$



По нему непосредственно определяется:

- время переходного процесса $t_p = 0,13c$;
- перерегулирование $\sigma = 35\%$
- количество колебаний $n = 2$

4. Выводы.

Как видно из анализа характеристик, конечная система обеспечивает требуемую точность при заданных скоростях и ускорениях, является устойчивой и обладающей необходимыми запасами устойчивости по амплитуде и по фазе, перерегулирование не превышает заданного значения и время переходного процесса не больше заданного. Следовательно, спроектированная система является полностью работоспособной и удовлетворяющей поставленным задачам.

Приложение II.

Исходные данные для расчетов

Таблица 1.

Передаточные функции и параметры динамических звеньев

| Варианты | Передаточные функции динамических звеньев структурной схемы | | | |
|----------|---|------------------------|-----------------|----------|
| | $W_1(p)$ | $W_2(p)$ | $W_3(p)$ | $W_4(p)$ |
| 1-20 | K_1 | $K_2/(T_1p+1)$ | $K_3/(T_2p+1)p$ | $1/K_4$ |
| 21-30 | K_1 | $K_2/(T_1p+1)(T_3p+1)$ | $K_3/(T_2p+1)p$ | $1/K_4$ |

Таблица 2.

Параметры динамических звеньев

| Варианты заданий | $T_1, с$ | $T_2, с$ | $T_3, с$ | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 |
|------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 1, 15 | 0,2 | 0,04 | 0,01 | 100 | 15 | 5 | 1 |
| 2, 16 | 0,3 | 0,14 | 0,001 | 20 | 12 | 2 | 2 |
| 3, 17 | 0,4 | 0,024 | 0,05 | 30 | 13 | 3 | 3 |
| 4, 18 | 0,5 | 0,034 | 0,06 | 40 | 14 | 4 | 5 |
| 5, 19 | 0,2 | 0,044 | 0,006 | 50 | 16 | 6 | 6 |
| 6, 20 | 0,2 | 0,05 | 0,008 | 60 | 18 | 8 | 7 |
| 7, 21 | 0,3 | 0,04 | 0,009 | 10 | 5 | 15 | 2 |
| 8, 22 | 0,4 | 0,02 | 0,03 | 60 | 3 | 13 | 3 |
| 9, 23 | 0,5 | 0,01 | 0,05 | 80 | 5 | 25 | 4 |
| 10, 24 | 0,52 | 0,05 | 0,08 | 100 | 5 | 15 | 10 |
| 11, 25 | 0,62 | 0,06 | 0,001 | 20 | 35 | 35 | 14 |
| 12, 26 | 0,32 | 0,03 | 0,05 | 70 | 5 | 45 | 11 |
| 13, 27 | 0,62 | 0,05 | 0,04 | 20 | 5 | 15 | 5 |
| 14, 28 | 0,22 | 0,067 | 0,01 | 20 | 10 | 10 | 16 |

Таблица 3.

Исходные данные для построения желаемой ЛАЧХ следящей САР

| Вариан- ты | Запас устойчивости по фазе | Максимальная частота вращения объекта, рад/с | Максимальное ускорение, рад/с ² | Допустимая динамическая ошибка, мин | Время переход- ного процесса, с |
|---------------|----------------------------------|---|--|---|---|
| | $\Delta\Phi$ | Ω_{\max} | ε_{\max} | δ_{\max} | t_p |
| 1. | >20 | 0,1 | 0,2 | 3' | 0,1 |
| 2. | >10 | 0,2 | 0,3 | 5' | 1,5 |
| 3. | >50 | 0,2 | 0,4 | 6' | 2,5 |
| 4. | >30 | 0,3 | 0,4 | 4' | 1,5 |
| 5. | >40 | 0,4 | 0,5 | 3' | 0,2 |
| 6. | >20 | 0,5 | 0,6 | 5' | 0,3 |
| 7. | >10 | 0,1 | 0,4 | 6' | 0,4 |
| 8. | >40 | 0,2 | 0,4 | 7' | 0,5 |
| 9. | >40 | 0,3 | 0,5 | 8' | 0,6 |
| 10. | >20 | 0,4 | 0,45 | 9' | 0,7 |
| 11. | >50 | 0,5 | 0,55 | 6' | 0,8 |
| 12. | >30 | 0,6 | 0,7 | 7' | 1,5 |
| 13. | >20 | 0,7 | 0,75 | 5' | 1,0 |
| 14. | >30 | 0,3 | 0,6 | 4' | 0,4 |
| 15. | >40 | 0,4 | 0,5 | 3' | 0,5 |
| 16. | >30 | 0,3 | 0,5 | 3' | 0,6 |
| 17. | >10 | 0,4 | 0,6 | 2' | 0,6 |
| 18. | >20 | 0,5 | 0,55 | 3' | 0,7 |
| 19. | >20 | 0,6 | 0,65 | 4' | 0,5 |
| 20. | >30 | 0,3 | 0,4 | 5' | 0,6 |

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 3 |
| ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ..... | 3 |
| 1. НАИМЕНОВАНИЕ ТЕМ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ..... | 4 |
| 2. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ..... | 8 |
| 3. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ..... | 8 |
| 4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА..... | 9 |
| Литература..... | 10 |
| Приложение I. Примеры некоторых расчетов в контрольной работе..... | 12 |
| Приложение II. Исходные данные для расчетов..... | 28 |