

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ О.В.Непомнящий

« _____ » _____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

**Комплекс программ для исследования
систем автоматического регулирования**

Руководитель _____ доц., канд. техн. наук Н. А. Никулин
подпись дата должность, ученая степень

Выпускник _____ И. И. Круглов
подпись дата

Нормоконтролер _____ доц., канд. техн. наук Н. А. Никулин
подпись дата должность, ученая степень

Красноярск 2022

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ О. В. Непомнящий

« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту _____ Круглову Илье Игоревичу
Фамилия, имя, отчество

Группа _____ КИ18-07Б _____ Направление _____ 09.03.01
номер код

_____ Информатика и вычислительная техника
наименование

Тема выпускной квалификационной работы

Комплекс программ для исследования систем автоматического регулирования

Утверждена приказом по университету № _____ 7914/с _____ от _____ 26.05.22

Руководитель ВКР Н. А. Никулин, канд. техн. наук, доцент НУЛ САПР каф. _____
инициалы, фамилия, должность, учёное звание, место работы

ВТ ИКИТ СФУ _____

Исходные данные для ВКР

Методические указания руководителя ВКР, публикации по теме работы.

Перечень разделов ВКР

Анализ предметной области, постановка задачи исследования, выбор методов исследования и инструментальных средств, разработка алгоритмов и их программная реализация, тестирование разработанной системы.

Перечень графического материала

Слайды презентации с математическими моделями, схемами алгоритмов и результатами работы разработанной системы.

Руководитель ВКР _____ Н. А. Никулин
подпись

Задание принял к исполнению _____ И. И. Круглов
подпись

« _____ » _____ 20 _____ г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа на тему «Комплекс программ для исследования систем автоматического регулирования» выполнена в научно-учебной лаборатории систем автоматизированного проектирования кафедры вычислительной техники института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Содержит 50 страниц текстового документа, 13 иллюстраций, 5 приложений, 6 использованных источников.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, MATHCAD, ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы — создание программных модулей для автоматизации проектирования систем автоматического регулирования частотными методами.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы разработано программное обеспечение в виде рабочих листов MathCAD14, обеспечивающее автоматическое построение обычных и асимптотических частотных характеристик.

Результаты работы предназначены для использования сотрудниками НУЛ САПР кафедры вычислительной техники ИКИТ СФУ при выполнении научных исследований и в учебном процессе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Проблематика автоматизированного проектирования систем автоматического регулирования и частотные методы.....	7
1.1 Математическое обеспечение частотных методов проектирования	7
1.2 Выбор среды программирования	17
Выводы по разделу 1.....	18
2 Разработка комплекса программ	19
2.1 Структура комплекса программ	19
2.2 Библиотека функций для расчёта точных передаточных функций ЛЧХ-библиотека-1.xmcd.....	19
2.3 Библиотека функций для расчёта асимптотических передаточных функций ЛЧХ-библиотека-2.xmcd	23
Выводы по разделу 2.....	25
3 Тестирование разработанного программного обеспечения	26
3.1 Тестирование программы для расчёта точных ЛАЧХ	26
3.2 Тестирование программы для расчёта асимптотических ЛАЧХ	27
3.3 Тестирование программы для совместного расчёта точных и асимптотических ЛАЧХ.....	28
Выводы по разделу 3.....	29
Заключение	30
Сокращения.....	31
Список использованных источников	32
ПРИЛОЖЕНИЕ А Рабочие листы MathCAD. Библиотека функций для построения точных частотных характеристик.....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Рабочие листы MathCAD. Библиотека функция для построения асимптотических частотных характеристик.....	35
ПРИЛОЖЕНИЕ В Рабочие листы MathCAD. Точные частотные характеристики	38

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Рабочие листы MathCAD. Асимптотические частотные характеристики	43
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Рабочие листы MathCAD. Совмещённые точные и асимптотические частотные характеристики.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Частотные методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования (САР) широко использовались в то время, когда доступность к компьютерным вычислениям была ограничена. Эти методы позволяли выполнять анализ САР без сложных расчётов, применяя простейшие графические построения и специально рассчитанные таблицы некоторых функций.

В настоящее время компьютерные вычисления несколько отодвинули частотные методы, заменив их модальными методами различного вида, т. е. основанными на вычислении корней передаточных функций.

Но частотные методы обладают рядом достоинств, которые связаны не с возможностью простых ручных выкладок, а с некоторыми методологическими особенностями.

Во-первых, частотные характеристики можно получать экспериментально без необходимости создавать модели в форме дифференциальных уравнений или передаточных функций.

Во-вторых, при экспериментальном получении частотных характеристик само по себе осуществляется упрощение математической модели, в том числе понижение порядка и пренебрежение несущественными нелинейностями.

Всё это приводит к тому, что использование частотных методов в ряде случаев остаётся актуальным.

При этом следует отказаться от ручных построений и использовать для этого компьютерные программы. Но многие вопросы применения частотных методов при компьютерных вычислениях пока недостаточно проработаны.

В связи с этим задача автоматизации частотных методов является актуальной.

Объект исследования — процесс автоматизации проектирования систем автоматического регулирования.

Предмет исследования — программное обеспечение для системы автоматизированного проектирования.

Объект разработки — комплекс программ для исследования систем автоматического регулирования на основе частотных характеристик.

Цель работы — создание программных модулей для автоматизации проектирования систем автоматического регулирования частотными методами.

Задачи работы:

1) разработка комплекса программных модулей для реализации метода анализа САР на основе асимптотических логарифмических частотных характеристик;

2) тестирование разработанного комплекса программ.

Методы, инструментальные средства и технологии разработки. В качестве программного обеспечения использована программа MathCAD14.

Значение для практики заключается в том, что созданный комплекс программных модулей может использоваться как составная часть системы автоматизированного проектирования САР различного назначения.

Результаты работы предназначены для использования сотрудниками НУЛ САПР кафедры вычислительной техники ИКИТ СФУ при выполнении научных исследований и в учебном процессе.

1 Проблематика автоматизированного проектирования систем автоматического регулирования и частотные методы

1.1 Математическое обеспечение частотных методов проектирования

Частотные методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования (САР) широко использовались в прошлом. Они были разработаны для ручного проектирования, так как компьютерные программы тогда разрабатывались отдельно для каждого случая и требовали высокой квалификации программирования, которой проектировщики САР не обладали. Частотные методы позволяли выполнять анализ САР без сложных расчётов, применяя простейшие графические построения и специально рассчитанные таблицы некоторых функций.

В настоящее время появились специализированные комплексы программ, например, Matlab с приложением SIMULINK, которые позволяют выполнять компьютерные вычисления обычному проектировщику без глубоких знаний программирования. В результате частотные методы отошли на второй план.

Но частотные методы обладают рядом достоинств, которые связаны с некоторыми методологическими особенностями самого частотного способа.

Во-первых, частотные характеристики можно получать экспериментально без необходимости создавать модели в форме дифференциальных уравнений или передаточных функций.

Во-вторых, при экспериментальном получении частотных характеристик само по себе осуществляется упрощение математической модели, в том числе понижение порядка и пренебрежение несущественными нелинейностями.

Всё это приводит к тому, что использование частотных методов в ряде случаев остаётся актуальным. Но имеется возможность отказаться от ручных построений и использовать для этого компьютерные программы.

Одной из задач анализа динамических объектов является выявление их динамических свойств, а именно, способность объекта реагировать на входные сигналы. Для этого желательно подавать на вход объекта какой-либо сигнал, кото-

рый может непрерывно меняться, а затем отслеживать выходной сигнал. Наиболее удобным является синусоидальный сигнал по следующим причинам [1, 2, 3, 4].

Во-первых, это сигнал периодический, т. е. непрерывно изменяющийся во времени. Во-вторых, он меняется плавно. В-третьих, он легко дифференцируется и интегрируется, не изменяя своей формы, а динамические свойства объекта отражаются в его модели с помощью производных.

Подача на вход синусоидального сигнала эквивалентна умножению его изображения по Лапласу на передаточную функцию объекта $W(s)$:

$$x(s) = W(s) \cdot L\{\sin(\omega t)\} = W(s) \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{G(s)}{H(s)} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2},$$

где $L\{\sin(\omega t)\} = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$ — изображение по Лапласу синусоидального сигнала;

$$W(s) = \frac{G(s)}{H(s)} \text{ — передаточная функция объекта в общем виде;}$$

$G(s) = g_0 + g_1s + g_2s^2 + \dots + g_ms^m$ — полином числителя, m — порядок полинома числителя;

$H(s) = h_0 + h_1s + h_2s^2 + \dots + h_ns^n$ — полином знаменателя, n — порядок полинома знаменателя.

Это означает, что среди корней знаменателя результирующего изображения выходного сигнала обязательно будут корни знаменателя от изображения по Лапласу синусоидального сигнала:

$$s^2 + \omega^2 = 0, \quad s^2 = -\omega^2, \quad s = \sqrt{-\omega^2} = \sqrt{-1} \sqrt{|\omega|^2} = j\omega,$$

где берётся только положительный корень (с формальной точки зрения должно было бы быть $s = \pm j\omega$), так как в данном случае он связан с частотой синусои-

дального сигнала (рассматривается не просто знаменатель, а знаменатель изображения по Лапласу синусоидальной функции), а частота ω является величиной положительной.

Если подставить корень $s = j\omega$ в передаточную функцию объекта

$$W(s) = W(j\omega),$$

то можно выявить его реакцию на синусоидальное воздействие. Выражение $W(j\omega)$ называется *частотной передаточной функцией* объекта [6].

С помощью функции $W(j\omega)$ можно построить *частотную передаточную функцию* объекта.

Так как числитель и знаменатель частотной передаточной функции содержит комплексные числа с $j\omega$, получаемое в результате выражение будет иметь вещественную и мнимую части, а именно:

$$W(j\omega) = \text{Re}[W(j\omega)] + j \text{Im}[W(j\omega)] = P(\omega) + jQ(\omega),$$

где Re и Im — соответственно вещественная и мнимая части.

Частотную характеристику можно представить различным образом.

Можно рассматривать по отдельности зависимости вещественной и мнимой частей от частоты: $P(\omega)$ и $Q(\omega)$. Они так и называются: $P(\omega)$ — вещественная частотная характеристика (ВЧХ) и $Q(\omega)$ — мнимая частотная характеристика (МЧХ).

Частотная характеристика является комплексным выражением, соответствующим некоторому вектору в комплексной плоскости:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega) \cdot e^{j(\omega)}$$

с амплитудой $A(\omega) = |W(\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$ и углом поворота (фазой)

$$\varphi(\omega) = \arctan \left[\frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \right].$$

Характеристика $A(\omega)$ называется амплитудно-частотной (АЧХ), а характеристика $\varphi(\omega)$ — фазо-частотной (ФЧХ).

Физический смысл АЧХ и ФЧХ следующий. Присущие многим объектам свойства интегрировать или дифференцировать входного сигнала приводит к тому, что процессы в них не могут мгновенно следовать и точно повторять все изменения входного сигнала. В частности, при подаче синусоидального сигнала выходной может, во-первых, иметь другую амплитуду, а во-вторых, иметь фазовый сдвиг относительно входного сигнала. Выходная амплитуда и фазовый сдвиг в общем случае могут зависеть от частоты — это и есть частотные характеристики. Можно было бы подавать и какие-то другие сигналы, но синусоидальный обладает тем свойством, что при его прохождении через линейный динамический объект с дифференцированием и интегрированием он не меняет свою форму — остаются синусоидальными. Это упрощает определение амплитуд и фаз.

В реальности частоты изменяется в очень больших пределах, поэтому часто применяют логарифмический масштаб частот по оси частот (оси абсцисс). Также целесообразнее использовать не значение АЧХ, а его логарифм:

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg[A(\omega)],$$

где коэффициент 20 является данью традиции, хотя и имеет определённый физический смысл в некоторых случаях.

Фазо-частотные характеристики строят без логарифмирования по оси ординат, но с логарифмированием по оси частот (оси абсцисс).

Так получают *логарифмические частотные характеристики* (ЛЧХ), а именно — *логарифмическую амплитудную частотную характеристику* (ЛАЧХ) и *логарифмическую фазовую частотную характеристику* (ЛФЧХ).

Логарифмические частотные характеристики удобны тем, что их сравнительно легко строить по ЛЧХ отдельных блоков. Пусть, например, имеется последовательное соединение двух блоков с соответствующими передаточными функциями $W_1(s)$ и $W_2(s)$ (Рисунок 1.1).

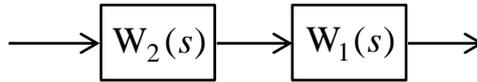


Рисунок 1.1 — Последовательное соединение
блоков

Передаточная функция всей цепи:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s).$$

Частотная передаточная функция всей цепи получается в результате подстановки $s = j\omega$ и имеет вид:

$$W(j\omega) = W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega).$$

Амплитудно-частотная характеристика определяется как модуль частотной передаточной функции (с учётом того, что модуль произведения равен произведению модулей):

$$A(j\omega) = |W(j\omega)| = |W_1(j\omega)| \cdot |W_2(j\omega)| = A_1(j\omega) \cdot A_2(j\omega).$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ):

$$L(j\omega) = 20 \cdot \lg[A_1(j\omega) \cdot A_2(j\omega)] = 20 \cdot \lg[A_1(j\omega)] + 20 \cdot \lg[A_2(j\omega)]$$

с учётом того, что логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей.

При построении ЛАЧХ логарифмическая шкала используется как по оси ординат (оси амплитуд), так и по оси абсцисс (оси частот).

При построении логарифмической фазо-частотной характеристики (ЛФЧХ) по оси ординат располагаются значения фазового сдвига (в радианах или градусах), которые не логарифмируются. Ось частот имеет логарифмический масштаб, как и для ЛАЧХ.

Таким образом, по крайней мере при последовательном соединении звеньев, что часто имеет место, можно легко строить общую логарифмическую характеристику по известным логарифмическим характеристикам отдельных звеньев, заменяя операцию перемножения (операторных передаточных функций) более простой операцией сложения (частотных передаточных функций), получающейся вследствие перехода к логарифмам.

Любой тип частотных характеристик легко получается, если известна передаточная функция объекта. Построить частотную характеристику гораздо проще, чем переходную характеристику, поскольку частотные характеристики соответствуют установившемуся процессам в объекте, когда выходной сигнал имеет ту же синусоидальную форму с постоянными амплитудой, частотой и фазой. Поэтому одной из задач теории регулирования является разработка методов использования частотных характеристик для решения разнообразных задач анализа и синтеза систем автоматического регулирования. В настоящее время задачи анализа легко решаются с помощью ЭВМ на основе непосредственного расчёта переходных характеристик численными методами или получения их в аналитической форме (например, с помощью символьных процессоров математических программ), поэтому значение частотных характеристик для анализа существенно снизилось.

Но частотные методы в целом обладают рядом достоинств, которых лишены корневые и аналогичные им методы.

Частотные методы можно применять даже тогда, когда отсутствуют математические модели некоторых элементов, но можно снять экспериментально их частотные характеристики. При этом объекты могут быть нелинейными. Дополнительным достоинством частотных методов является также то, что в процессе

снятия частотных характеристик происходит частичная линеаризация моделей соответствующих объектов.

В общем виде система автоматического регулирования (Рисунок 1.2) содержит два блока и контур отрицательной единичной обратной связи.

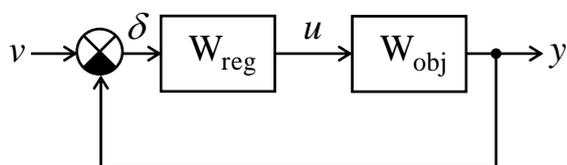


Рисунок 1.2 — Система автоматического регулирования в общем виде

В системе автоматического регулирования (Рисунок 1.2):

$W_{obj}(s)$ — передаточная функция объекта регулирования;

$W_{reg}(s)$ — передаточная функция регулятора.

Здесь задана передаточная функция объекта регулирования $W_{obj}(s)$, а передаточную функцию регулятора $W_{reg}(s)$ необходимо определить. Она должна обеспечивать замкнутой САР желаемые показатели качества регулирования.

Объект регулирования с передаточной функцией $W_{obj}(s)$ называется неизменяемой частью системы, а регулятор с передаточной функцией $W_{reg}(s)$ — изменяемой частью системы.

Смысл этих терминов в том, что проектировщик при обеспечении динамических свойств замкнутой САР не может влиять на неизменяемую часть, которая выбирается по каким-то другим соображениям или жёстко задана без возможности выбора. И тогда стоит задача путём выбора параметров регулятора обеспечить желаемые показатели качества регулирования.

Проектировщиков интересуют динамические свойства замкнутой САР. Анализ динамических свойств рассматриваемой САР может быть выполнен путём построения частотных характеристик замкнутой системы.

Но особенность частотных методов заключается в том, что они позволяют рассматривать разомкнутую систему и по её виду судить о характеристиках замкнутой системы. Другие методы, например, модальные (основанные на корнях полиномов передаточной функции) не позволяют этого. При использовании этих методов приходится вычислять корни замкнутой системы.

Разомкнутая система получается исключением из схемы сумматора и канала обратной связи (Рисунок 1.3).

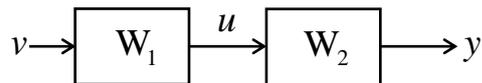


Рисунок 1.3 — Последовательное соединение блоков системы автоматического регулирования

На структурной схеме (Рисунок 1.3) изображены два блока с передаточными функциями W_1 и W_2 .

Амплитудная частотная характеристика первого блока получается из его передаточной функции:

$$A_1(\omega) = \sqrt{\text{Re}[W_1(j\omega)]^2 + \text{Im}[W_1(j\omega)]^2}$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика первого блока равна десятичному логарифму амплитудной частотной характеристики:

$$L_1(\omega) = 20 \lg[A_1(\omega)]$$

Фазовая частотная характеристика первого блока определяется через арктангенс отношения мнимой и вещественной частей частотной передаточной функции:

$$\varphi_1(\omega) = \arctan\left(\frac{\text{Im}[W_1(j\omega)]}{\text{Re}[W_1(j\omega)]}\right).$$

Амплитудная частотная характеристика второго блока:

$$A_2(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}[W_2(j\omega)]^2 + \operatorname{Im}[W_2(j\omega)]^2}.$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика второго блока:

$$L_2(\omega) = 20 \lg[A_2(\omega)].$$

Фазовая частотная характеристика второго блока:

$$\varphi_2(\omega) = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}[W_2(j\omega)]}{\operatorname{Re}[W_2(j\omega)]}\right).$$

Передаточная функция соединения из двух блоков:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s).$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика соединения из двух блоков:

$$L(\omega) = L_1(\omega) + L_2(\omega),$$

так как логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей.

Традиционно все операции с частотными характеристиками выполняются графически. При этом трудно использовать реальные частотные характеристики, построенные в соответствии с приведёнными выше выражениями. В связи с этим нашли применение так называемые *асимптотические логарифмические амплитудных частотные характеристики (АЛЧХ)*. Они строятся как отрезки прямых с различным наклоном.

Для этого необходимо передаточные функции преобразовать в типовые динамические звенья. Они получаются после вычисления и анализа корней полиномов числителя и знаменателя.

Различаются следующие типовые динамические звенья:

– звено усилительное: $W(s) = k$;

- звено с оператором Лапласа некоторой степени: $W(s) = s^n$ ($n = 1, 2, \dots$);
- звено первого порядка: $W(s) = Ts + 1$;
- звено второго порядка: $W(s) = T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1$.

Эти звенья могут располагаться в числителе и в знаменателе передаточной функции в любых сочетаниях.

Наклон прямых определяется порядком звена: звено нулевого порядка (усилительное звено) имеет наклон 0 (прямая, параллельная оси частот).

Звено первого порядка имеет наклон 20 дБ/дек.

Звено второго порядка имеет наклон 40 дБ/дек.

Звено, состоящее из оператора Лапласа s в степени n (s^n), имеет наклон $n \cdot 20$ дБ/дек.

Наклоны могут быть положительными и отрицательными.

Положительный наклон соответствует звену, находящемуся в числителе.

Отрицательный наклон соответствует звену, находящемуся в знаменателе.

Звенья 0 порядка и состоящие из оператора Лапласа в степени представляют собой прямые с указанным наклоном.

Звенья первого и второго порядков имеют перегибы. Точки перегиба определяются по постоянным времени типовых динамических звеньев:

$$\omega_0 = \frac{1}{T}.$$

Для построения используются графики в логарифмическом масштабе. Это позволяет заменять реальные кривые прямыми отрезками.

Общая последовательность работы с частотными характеристиками следующая.

Вся система представляется последовательным соединением отдельных блоков.

Для каждого блока определяется его передаточная функция как отношение полинома числителя к полиному знаменателя.

Каждый полином разлагается на типовые динамические звенья через найденные корни полинома.

По параметрам типовых динамических звеньев определяются параметры асимптотических логарифмических амплитудных частотных характеристик, а именно: наклон прямой и точка перегиба. Эта точка перегиба соответствует некоторой частоте и при соединении с другими характеристиками называется «частота сопряжения».

Суммируются все характеристики звеньев в логарифмическом масштабе.

В результате получается асимптотическая логарифмическая амплитудная частотная характеристика всей цепи блоков.

Далее полученная характеристика используется в зависимости от этапа проектирования — для анализа и оценки частотных свойств, для синтеза регулятора при введении обратной связи и др.

1.2 Выбор среды программирования

В качестве среды программирования при автоматизации проектирования САР обычно используются Matlab или MathCAD.

По сравнению с использованием языков программирования C++, C# и т. п. среда программирования предоставляет много готовых функциональных возможностей. В таких средах программирования имеется удобный интерфейс, библиотеки математических функций, средства работы с файлами и визуализации в виде графиков. Это позволяет сосредоточиться на основных операциях, связанных именно с автоматизированным проектированием.

Но при этом приходится всё равно разрабатывать свои пользовательские функции на основе встроенных языков программирования.

При сравнении программ Matlab и MathCAD представляется, что MathCAD применительно к теме данной работы имеет ряд преимуществ.

Интерфейс взаимодействия с пользователем реализован в виде рабочих листов, которые предусматривают возможность размещения разработанных программных модулей, а также комментариев и иллюстраций. Т. е. рабочие листы

MathCAD выполняют функции не только программного обеспечения, но также функции методического обеспечения.

Язык программирования сравнительно прост, хотя позволяет реализовать все необходимые программные конструкции.

Математические выражения представляются в форме, соответствующей обычной математической нотации, что существенно упрощает понимание программ.

Выполненные вычисления при заданных условиях сохраняются и могут быть использованы в дальнейшем.

Можно использовать составные рабочие листы, ссылаясь из одного листа на другие рабочие листы по принципу «включить», что аналогично работе с библиотеками программных модулей. Это позволяет иметь перед глазами только основную часть программы.

Программа MathCAD используется для различных целей в научно-учебной лаборатории САПР кафедры ВТ.

В связи с этим среда программирования MathCAD выбрана в качестве инструментального средства для реализации данного проекта.

Выводы по разделу 1

Рассмотрено математическое обоснование метода частотных характеристик и основные понятия, связанные с ним. Обоснована необходимость автоматизации процесса представления исследуемой САР с помощью асимптотических частотных характеристик.

В качестве инструментального средства программирования выбран MathCAD14, обоснована необходимость написания комплекса программ для автоматизации в виде отдельных функций.

2 Разработка комплекса программ

2.1 Структура комплекса программ

Разработанный комплекс программ содержит:

- 1) библиотеку 1 — функции для расчёта точных частотных характеристик ЛЧХ-библиотека-1.xmcd (Приложение А);
- 2) библиотеку 2 — функции для расчёта и визуализации асимптотических частотных характеристик ЛЧХ-библиотека-2.xmcd (Приложение Б);
- 3) программу для расчёта точных частотных характеристик ЛЧХ-01-Точные.xmcd (Приложение В);
- 4) программу для расчёта асимптотических частотных характеристик ЛЧХ-02-Асимптотические.xmcd (Приложение Г).
- 5) программу для совмещения точных и асимптотических характеристик ЛЧХ-03-Совместные.xmcd (Приложение Д).

Программы обращаются к библиотекам:

- программа для расчёта точных частотных характеристик ЛЧХ-01-Точные.xmcd обращается к библиотеке ЛЧХ-библиотека-1.xmcd;
- программа для расчёта асимптотических частотных характеристик ЛЧХ-02-Асимптотические.xmcd обращается к библиотекам ЛЧХ-библиотека-1.xmcd и ЛЧХ-библиотека-2.xmcd;
- программа для совмещения точных и асимптотических характеристик ЛЧХ-03-Совместные.xmcd обращается к обеим библиотекам ЛЧХ-библиотека-1.xmcd и ЛЧХ-библиотека-2.xmcd.

Программы для расчёта характеристик содержат исходные данные, обеспечивают вычисления с помощью функций, помещенных в библиотеки, построение графиков.

2.2 Библиотека функций для расчёта точных передаточных функций ЛЧХ-библиотека-1.xmcd

В состав библиотеки входят следующие функции.

```

CHCH(W, wmin, wmax, npoint) :=
g ← W<ORIGIN>
h ← W<ORIGIN+1>
ng ← last(g)
nh ← last(h)
ii ← √-1
Z<ORIGIN, ORIGIN+4> ← 0
dw1 ← (log(wmax) - log(wmin)) / npoint
dw2 ← (wmax - wmin) / npoint
for k ∈ ORIGIN, (npoint - 1 + ORIGIN)
|
| w ← 10<(k-ORIGIN+1)·dw1> · wmin
| Z<k, ORIGIN> ← w
| jw ← w·ii
| gar ← g<ORIGIN>
| har ← h<ORIGIN>
| for j ∈ ORIGIN+ 1..ng      if ORIGIN < ng
|   gar ← gar + g<j>·jw<j-ORIGIN>
| for j ∈ ORIGIN+ 1..nh      if ORIGIN < nh
|   har ← har + h<j>·jw<j-ORIGIN>
| q ← gar / har
| P ← Re(q)
| Q ← Im(q)
| Z<k, ORIGIN+3> ← P
| Z<k, ORIGIN+4> ← Q
| if q = 0
|   | Z<k, ORIGIN+1> ← -1·10<300>
|   | Z<k, ORIGIN+2> ← 0
| if q ≠ 0
|   | Z<k, ORIGIN+1> ← √(P<2> + Q<2>)
|   | faz ← arg(q)·(180 / π)
|   | if k > ORIGIN
|   |   | faz1 ← Z<k-1, ORIGIN+2>
|   |   | kfaz1 ← floor( (|faz - faz1|) / 360 )
|   |   | faz2 ← if(faz1 ≥ 0, 360, -360)
|   |   | faz ← faz + faz2·(kfaz1 + 1) if |faz - faz1| > 180
|   | Z<k, ORIGIN+2> ← faz
|
Z

```

Рисунок 2.1 — Функция для расчёта точных частотных характеристик

Функция СНСН() — для расчёта точных частотных характеристик:

– функциональные действия: выполняет расчёт вещественной, мнимой, амплитудной и фазовой частотных характеристик;

– входные данные: двумерный массив коэффициентов полиномов числителя и знаменателя W , минимальное значение диапазона частот w_{\min} , максимальное значение диапазона частот w_{\max} , число выводимых точек n_{point} ;

– форма выходных данных: двумерный массив, в столбце 1 — значения частоты, в столбце 2 — значения амплитудно-частотной характеристики (без логарифмирования), в столбце 3 — значения фазо-частотной характеристики, 4 — значения вещественной частотной характеристики, в столбце 5 — значения мнимой частотной характеристики.

Функция $FW3()$ — формирует передаточную функцию в виде отношения двух полиномов, если она задана с помощью типовых динамических звеньев.

$$FW3(K, m, \tau, \zeta, n, T, \xi) := \left\{ \begin{array}{l} g \leftarrow K \quad \text{if } m = 0 \\ g \leftarrow K \cdot (\tau \cdot s + 1) \quad \text{if } m = 1 \\ g \leftarrow K \cdot (\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1) \quad \text{if } m = 2 \\ g \leftarrow s \quad \text{if } m = 3 \\ h \leftarrow 1 \quad \text{if } n = 0 \\ h \leftarrow (T \cdot s + 1) \quad \text{if } n = 1 \\ h \leftarrow (T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1) \quad \text{if } n = 2 \\ h \leftarrow s \quad \text{if } n = 3 \\ z \leftarrow \frac{g}{h} \end{array} \right.$$

Рисунок 2.2 — Функция для формирования передаточной функции в форме отношения полиномов из типовых динамических звеньев

Задание передаточных функций через типовые динамические звенья — удобный и часто используемый способ задания передаточных функций. Но для расчёта частотных характеристик необходимы полиномы. Поэтому выполняется пересчёт следующим простейшим образом для звеньев числителя и знаменателя:

$$\left. \begin{array}{l} T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1 \rightarrow a_2 s^2 + a_1 s + 1; \\ Ts + 1 \rightarrow a_1 s + 1, \end{array} \right\}$$

где параметры типовых динамических звеньев T и ξ известны.

Функция $Z()$ — функция для совмещения различных способов задания типовых динамических звеньев. В данном случае является вспомогательной для функции $FW3()$.

```
Z(n,T,u) :=
  if u = 1
    if n ≥ 0
      n if T ≠ 0
      0 if T = 0
    0 if n < 0
  if u = 2
    if n < 0
      |n| if T ≠ 0
      3 if T = 0
    0 if n ≥ 0
```

Рисунок 2.3 — Функция для совмещения различных способов задания типовых динамических звеньев, применяется для $FW3$

Функция $FW_{\omega}()$ — формирует передаточную функцию в виде, предназначенном для использования в программе для расчёта частных характеристик.

```
FWω(h,g) :=
  n ← rows(h)
  m ← rows(g)
  for j ∈ 1..n
    zj,2 ← hj
  for j ∈ 1..m
    zj,1 ← gj
  for j ∈ 1..n
    r ← j
    break if hj ≠ 0
  z ←  $\frac{z}{h_r}$ 
```

Рисунок 2.4 — Функция для формирования передаточной функции в виде, предназначенном для использования в программе для расчёта ЛЧХ

2.3 Библиотека функций для расчёта асимптотических передаточных функций ЛЧХ-библиотека-2.xmcd

В состав библиотеки 2 входят следующие функции.

```

ALfun(Npoint, ωmin, ωmax, K, T, n, q) :=
  q ←  $\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}\right)^{\frac{1}{N_{\text{point}}}}$  if q = 0
  ω0 ←  $\frac{1}{T}$  if T ≠ 0
  ω0 ← 1 if T = 0
  for j ∈ 1..Npoint + 1
    ω ← ωmin · q(j-1)
    if ωmin ≤ ω ≤ ωmax
      if T ≠ 0
        z ← 20·log(K) if ω < ω0
        z ← 20·log(ωn) - (20·log(ω0n) - 20·log(K)) if ω0 ≤ ω
      z ← 20·log(ωn) - (20·log(ω0n) - 20·log(K)) if T = 0
      Dj,1 ← ω
      Dj,2 ← z
  D
  
```

Рисунок 2.5 — Функция для расчёта асимптотических частотных характеристик одного звена

Функция ALfun() — для расчёта асимптотических частотных характеристик одного звена: находит точки перегиба — частоты сопряжения с ЛАЧХ других звеньев, а также сами значения асимптотической характеристики как линейной функции между точками перегиба.

Функция GrafLACH() — формирует графики из рассчитанных с помощью функции ALfun() значений характеристик.

```

GrafLACH(W, ωmin, ωmax, Npoint) := q ←  $\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}\right)^{\frac{1}{N_{\text{point}}}}$ 
N ← cols(W)
for j ∈ 1..N
  Hj,1 ← j
  Hj,2 ← ωmin if W3,j = 0
  Hj,2 ←  $\frac{1}{W_{3,j}}$  if W3,j ≠ 0
Z ← csort(H, 2)
for j ∈ 1..N
  k ← Zj,1
  V1,j ← W1,k
  V2,j ← W2,k
  V3,j ← W3,k
  V4,j ← W4,k
for j ∈ 1..N
  D ← ALfun(Npoint, ωmin, ωmax, V2,j, V3,j, V1,j, q)
  if j = 1
    F<1> ← D<1>
    F<2> ← D<2>
  F<j+1> ← D<2> if j > 1
F

```

Рисунок 2.6 — Функция для формирования графиков.

Использует функцию ALfun()

Она также выбирает изменение текущих частот, чтобы в логарифмическом масштабе получить равномерно отстоящие друг от друга точки.

Функция GrafVis() обеспечивает визуализацию рассчитанных асимптотических характеристик с учётом особенностей графиков MathCAD. Определяются вспомогательные построения на графике: точки перегиба, линии соединения этих точек с осью абсцисс (осью частот). Эта информация выводится в виде соответствующих массивов.

$$\text{GrafVis}(G, W, \omega_{\min}) := \left| \begin{array}{l} N \leftarrow \text{cols}(W) \\ \omega \leftarrow G^{(1)} \\ M \leftarrow \text{rows}(\omega) \\ \text{for } j \in 1..N \\ \quad \left| \begin{array}{l} w_j \leftarrow \omega_{\min} \text{ if } W_{3,j} = 0 \\ w_j \leftarrow \frac{1}{W_{3,j}} \text{ if } W_{3,j} \neq 0 \\ m_j \leftarrow 1 \text{ if } M \leq 1 \\ \text{for } i \in 2..M \quad \quad \quad \text{if } M > 1 \\ \quad m_j \leftarrow i \text{ if } \omega_{i-1} \leq w_j \leq \omega_i \\ L_j \leftarrow (G^{(j+1)})_{(m_j)} \end{array} \right. \\ L_{\text{rez}} \leftarrow \sum_{j=2}^{N+1} G^{(j)} \\ \text{for } j \in 1..N \\ \quad \left| \begin{array}{l} m \leftarrow 1 \text{ if } M \leq 1 \\ \text{for } i \in 2..M \quad \quad \quad \text{if } M > 1 \\ \quad m \leftarrow i \text{ if } \omega_{i-1} \leq w_j \leq \omega_i \\ L_{s,j,2} \leftarrow L_{\text{rez}_m} \\ L_{s,j,1} \leftarrow w_j \end{array} \right. \\ \text{for } j \in 1..N \\ \quad \text{for } k \in 1..2 \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} \text{Lin0}_{1,j} \leftarrow 0 \\ \text{Lin0}_{2,j} \leftarrow L_{s,j,2} \\ w0_{1,j} \leftarrow L_{s,j,1} \\ w0_{2,j} \leftarrow L_{s,j,1} \end{array} \right. \\ (L \ L_{\text{rez}} \ L_s \ \text{Lin0} \ w0)^T \end{array} \right.$$

Рисунок 2.7 — Функция для формирования вспомогательной информации для построения графиков

Выводы по разделу 2

Разработаны и программно реализованы функции для расчёта и визуализации на графиках MathCAD асимптотических ЛАЧХ.

3 Тестирование разработанного программного обеспечения

3.1 Тестирование программы для расчёта точных ЛАЧХ

Программа для тестирования расчётов точных ЛАЧХ приведена в приложении (Приложение В). На первой странице рабочего листа MathCAD осуществляется ссылка на библиотеку 1 (см. подраздел 2.2). Затем задаются передаточные функции, соединение которых образует общую передаточную функцию системы, для которой рассчитываются и строятся точные логарифмические частотные характеристики, в том числе амплитудно-частотная. Эта характеристика выводится на график (Рисунок 3.1).

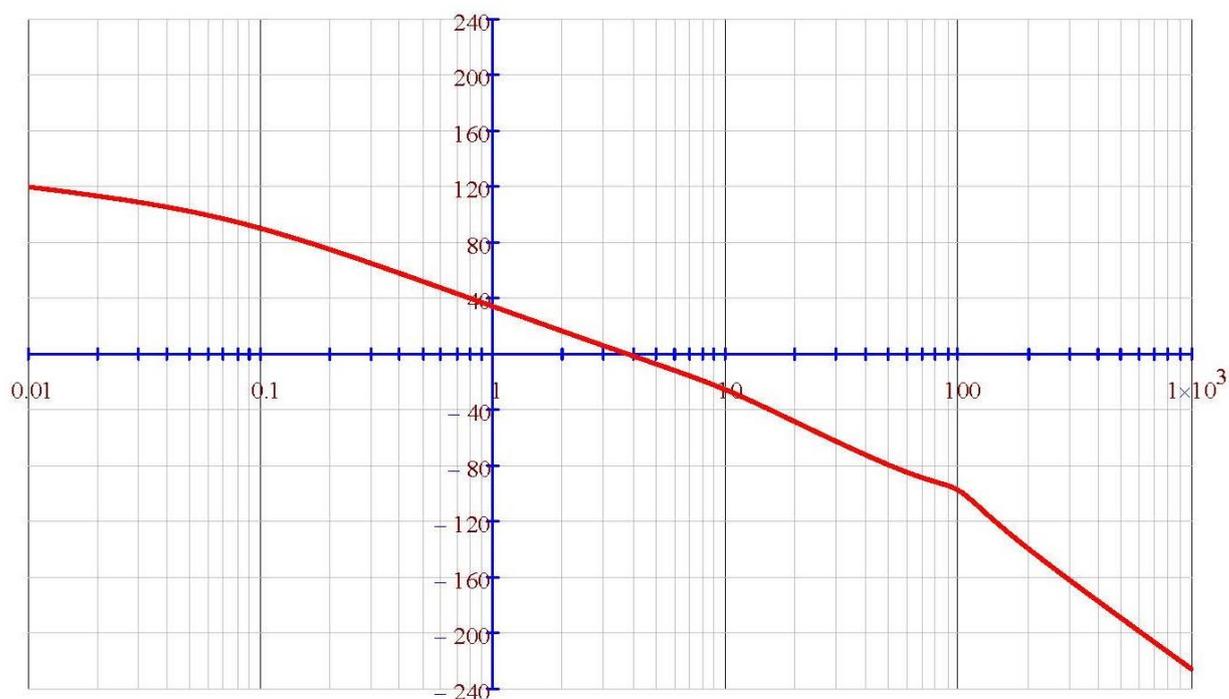


Рисунок 3.1 — Точная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

Остальная подробная информация о процессе построения характеристики приведена на рабочем листе.

3.2 Тестирование программы для расчёта асимптотических ЛАЧХ

Программа для тестирования расчётов асимптотических ЛАЧХ приведена в приложении (Приложение Г). На первой странице рабочего листа MathCAD осуществляется ссылка на библиотеку 1 (см. под раздел 2.2) и библиотеку 2 (см. подраздел 2.3). Затем задаются передаточные функции, соединение которых образует общую передаточную функцию, для которой рассчитывается и строится асимптотические логарифмические амплитудно-частотные характеристики. Эти характеристики выводятся на график (Рисунок 3.2).

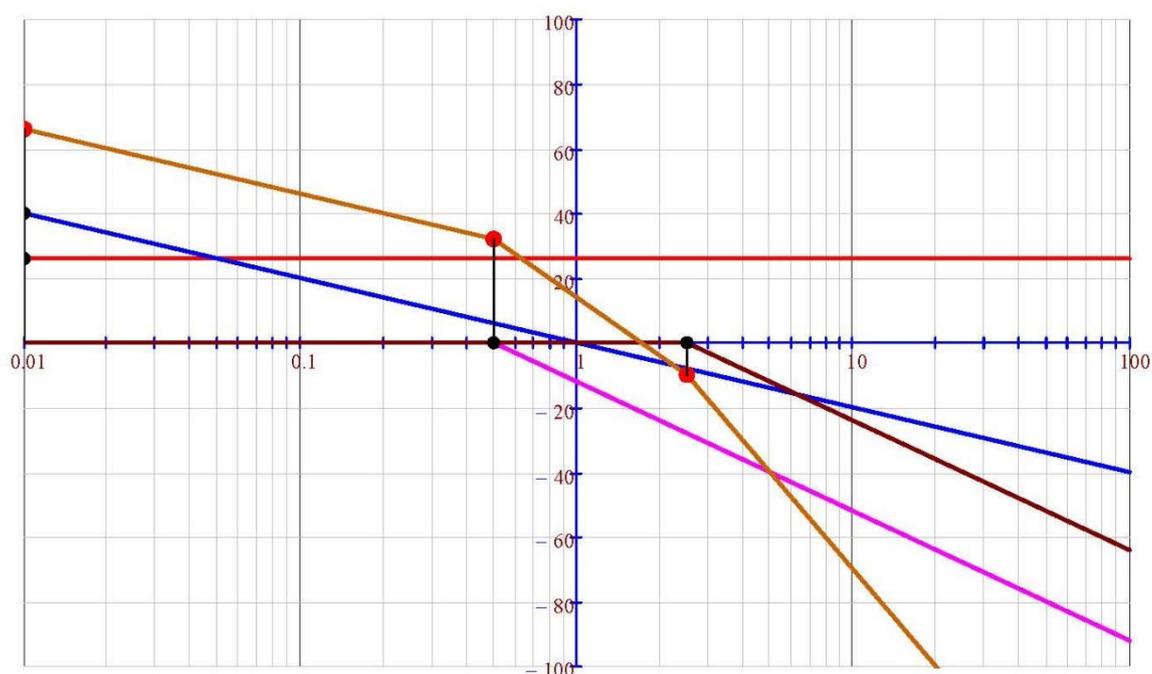


Рисунок 3.2 — Асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

Асимптотические амплитудно-частотные характеристики представляют собой прямые с перегибами в определённых точках, соответствующих постоянным времени характеристик. Выводятся ЛАЧХ каждого звена и суммарная ЛАЧХ всей системы (последовательно соединённых звеньев). Выводятся также точки перегиба (сопряжения) и линии, соединяющие эти точки с осью абсцисс (осью частот).

3.3 Тестирование программы для совместного расчёта точных и асимптотических ЛАЧХ

Программа для тестирования расчётов точных и асимптотических ЛАЧХ с их последующим сравнением приведена в приложении (Приложение Д). На первой странице рабочего листа MathCAD осуществляется ссылка на библиотеку 1 (см. под раздел 2.2) и библиотеку 2 (см. подраздел 2.3). Затем задаются передаточные функции, соединение которых образует общую передаточную функцию, для которой рассчитываются и строятся точная и асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотные характеристики. Эти характеристики выводятся на график (Рисунок 3.3).

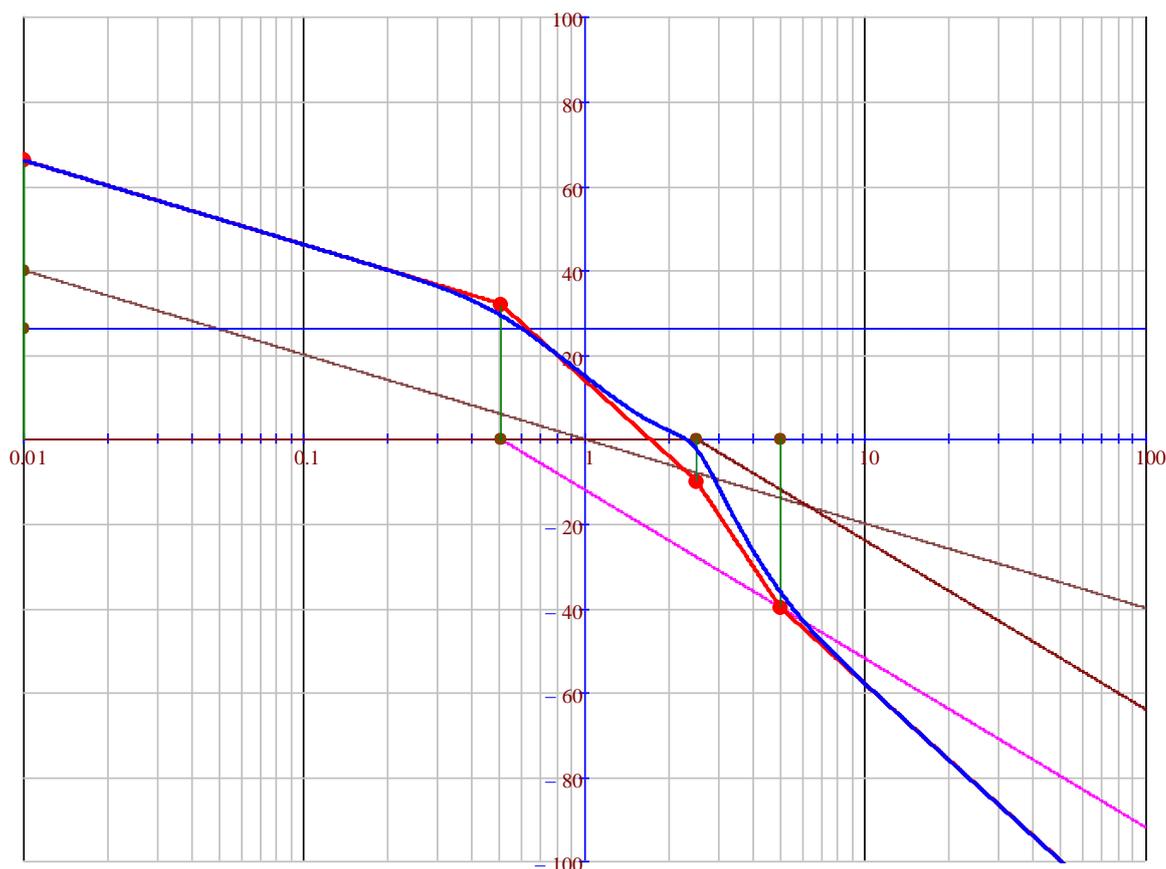


Рисунок 3.3 — Сравнение точной и асимптотической логарифмических амплитудно-частотных характеристик

Сравнение точной и асимптотической частотных характеристик показывает, что на ровных участках характеристики полностью совпадают, а свойство

асимптотичности проявляется в точках перегиба характеристик (в точках сопряжения нескольких характеристик отдельных звеньев).

Одновременный расчёт точных и асимптотических характеристик даёт возможность проектировщикам дополнительную информацию, благодаря которой можно повысить точность проектирования автоматических систем методом частотных характеристик.

Выводы по разделу 3

Результаты тестирования разработанных программ для расчёта и построения точных и асимптотических логарифмических амплитудно-частотных характеристик показали их корректную работу. Данное программное обеспечение может использоваться при проектировании систем автоматического регулирования методами частотных характеристик. Оно существенно облегчает просмотр вариантов передаточных функций отдельных блоков системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено математическое и методическое обеспечение для использования частотных характеристик при автоматизированном проектировании систем автоматического регулирования.

Разработано программное обеспечение в форме двух библиотек программных модулей и трёх головных программ, обеспечивающее автоматическое построение точных и асимптотических частотных характеристик, что позволяет автоматизировать использование этих методов при проектировании систем автоматического регулирования.

На тестовых примерах продемонстрирована методика применения разработанного программного обеспечения с пояснениями непосредственно на рабочих листах MathCAD.

Данный материал является математической основой для разработки и реализации программного комплекса, обеспечивающего исследование систем автоматического регулирования различными методами.

СОКРАЩЕНИЯ

- ВТ — (кафедра) вычислительной техники
- ИКИТ — Институт космических и информационных технологий
- ЛАЧХ — логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
- ЛФЧХ — логарифмическая фазо-частотная характеристика
- ЛЧХ — логарифмическая частотная характеристика
- НУЛ — научно-учебная лаборатория
- САПР — системы автоматизированного проектирования
- САР — система автоматического регулирования
- СФУ — Сибирский федеральный университет
- ТАУ — теория автоматического регулирования

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Егоров, А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с. – ISBN 5-9221-0543-4.

2 Макаров, И. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 1982. – 504 с.

3 Методы автоматизированного проектирования нелинейных систем / под ред. Ю. И. Топчеева. – Москва : Машиностроение, 1993. – 576 с.

4 Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5-и тт. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – ISBN 5-7038-2194-0.

5 Очков, В. Ф. MathCAD 14 для инженеров и конструкторов / В. Ф. Очков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2007. – 368 с. – ISBN 978-5-9775-0129-3.

6 Солодовников, В. В. Спектральные методы расчёта и проектирования систем управления / В. В. Солодовников, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов. – Москва : Машиностроение, 1986. – 440 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Рабочие листы MathCAD.

Библиотека функций для построения точных частотных характеристик

```

ORIGIN:= 1
ERRKOEFF:= 10-3
Частотные характеристики. Библиотека функций
CHCH(W, wmin, wmax, npoint) :=
    g ← W(ORIGIN)
    h ← W(ORIGIN+1)
    ng ← last(g)
    nh ← last(h)
    ii ← √-1
    ZORIGIN, ORIGIN+4 ← 0
    dw1 ←  $\frac{\log(wmax) - \log(wmin)}{npoint}$ 
    dw2 ←  $\frac{wmax - wmin}{npoint}$ 
    for k ∈ ORIGIN .. (npoint - 1 + ORIGIN)
        w ← 10(k-ORIGIN+1)·dw1 · wmin
        Zk, ORIGIN ← w
        jw ← w·ii
        gar ← gORIGIN
        har ← hORIGIN
        for j ∈ ORIGIN + 1 .. ng if ORIGIN < ng
            gar ← gar + gj·jwj-ORIGIN
        for j ∈ ORIGIN + 1 .. nh if ORIGIN < nh
            har ← har + hj·jwj-ORIGIN
        q ←  $\frac{gar}{har}$ 
        P ← Re(q)
        Q ← Im(q)
        Zk, ORIGIN+3 ← P
        Zk, ORIGIN+4 ← Q
        if q = 0
            Zk, ORIGIN+1 ← -1·10300
            Zk, ORIGIN+2 ← 0
        if q ≠ 0
            Zk, ORIGIN+1 ←  $\sqrt{P^2 + Q^2}$ 
            faz ←  $\arg(q) \cdot \frac{180}{\pi}$ 
            if k > ORIGIN
                faz1 ← Zk-1, ORIGIN+2
                kfaz1 ← floor( $\frac{|faz - faz1|}{360}$ )
                faz2 ← if(faz1 ≥ 0, 360, -360)
                faz ← faz + faz2·(kfaz1 + 1) if |faz - faz1| > 180
            Zk, ORIGIN+2 ← faz
    Z

```

Формирование передаточной функции в виде типовых динамических звеньев

$$FW3(K, m, \tau, \zeta, n, T, \xi) := \begin{cases} g \leftarrow K & \text{if } m = 0 \\ g \leftarrow K \cdot (\tau \cdot s + 1) & \text{if } m = 1 \\ g \leftarrow K \cdot (\tau^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot s + 1) & \text{if } m = 2 \\ g \leftarrow s & \text{if } m = 3 \\ h \leftarrow 1 & \text{if } n = 0 \\ h \leftarrow (T \cdot s + 1) & \text{if } n = 1 \\ h \leftarrow (T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1) & \text{if } n = 2 \\ h \leftarrow s & \text{if } n = 3 \\ z \leftarrow \frac{g}{h} \end{cases}$$

Совместимость с функцией FW3

$$Z(n, T, u) := \begin{cases} \text{if } u = 1 \\ \begin{cases} \text{if } n \geq 0 \\ \begin{cases} n & \text{if } T \neq 0 \\ 0 & \text{if } T = 0 \end{cases} \\ 0 & \text{if } n < 0 \end{cases} \\ \text{if } u = 2 \\ \begin{cases} \text{if } n < 0 \\ \begin{cases} |n| & \text{if } T \neq 0 \\ 3 & \text{if } T = 0 \end{cases} \\ 0 & \text{if } n \geq 0 \end{cases} \end{cases}$$

Формирование полиномов числителя и знаменателя

$$FW_{\omega}(h, g) := \begin{cases} n \leftarrow \text{rows}(h) \\ m \leftarrow \text{rows}(g) \\ \text{for } j \in 1..n \\ \quad z_{j,2} \leftarrow h_j \\ \text{for } j \in 1..m \\ \quad z_{j,1} \leftarrow g_j \\ \text{for } j \in 1..n \\ \quad \begin{cases} r \leftarrow j \\ \text{break if } h_j \neq 0 \end{cases} \\ z \leftarrow \frac{z}{h_r} \end{cases}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рабочие листы MathCAD. Библиотека функция для построения асимптотических частотных характеристик

ORIGIN = 1

Частотные характеристики. Библиотека 2

Расчёт амплитудно-фазовой ЛАЧХ одного звена

```
ALfun(Npoint, ωmin, ωmax, K, T, n, q) :=  
  q ←  $\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}\right)^{\frac{1}{N_{\text{point}}}}$  if q = 0  
  ω0 ←  $\frac{1}{T}$  if T ≠ 0  
  ω0 ← 1 if T = 0  
  for j ∈ 1..Npoint + 1  
    ω ← ωmin · q(j-1)  
    if ωmin ≤ ω ≤ ωmax  
      if T ≠ 0  
        z ← 20 · log(K) if ω < ω0  
        z ← 20 · log(ωn) - (20 · log(ω0n) - 20 · log(K)) if ω0 ≤ ω  
      z ← 20 · log(ωn) - (20 · log(ω0n) - 20 · log(K)) if T = 0  
      Dj,1 ← ω  
      Dj,2 ← z  
  D
```

```

GrafLACH(W, ωmin, ωmax, Npoint) := q ←  $\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}\right)^{\frac{1}{N_{\text{point}}}}$ 
N ← cols(W)
for j ∈ 1 .. N
  Hj,1 ← j
  Hj,2 ← ωmin if W3,j = 0
  Hj,2 ←  $\frac{1}{W_{3,j}}$  if W3,j ≠ 0
Z ← esort(H, 2)
for j ∈ 1 .. N
  k ← Zj,1
  V1,j ← W1,k
  V2,j ← W2,k
  V3,j ← W3,k
  V4,j ← W4,k
for j ∈ 1 .. N
  D ← ALfun(Npoint, ωmin, ωmax, V2,j, V3,j, V1,j, q)
  if j = 1
    F⟨1⟩ ← D⟨1⟩
    F⟨2⟩ ← D⟨2⟩
  F⟨j+1⟩ ← D⟨2⟩ if j > 1
F

```

```

GrafVis(G,W,ωmin) := N ← cols(W)
ω ← G(1)
M ← rows(ω)
for j ∈ 1..N
  wj ← ωmin if W3,j = 0
  wj ←  $\frac{1}{W_{3,j}}$  if W3,j ≠ 0
  mj ← 1 if M ≤ 1
  for i ∈ 2..M if M > 1
    mj ← i if ωi-1 ≤ wj ≤ ωi
  Lj ← (G(j+1))(mj)
Lrez ←  $\sum_{j=2}^{N+1} G^{(j)}$ 
for j ∈ 1..N
  m ← 1 if M ≤ 1
  for i ∈ 2..M if M > 1
    m ← i if ωi-1 ≤ wj ≤ ωi
  Ls,j,2 ← Lrez,m
  Ls,j,1 ← wj
for j ∈ 1..N
  for k ∈ 1..2
    Lin01,j ← 0
    Lin02,j ← Ls,j,2
    w01,j ← Ls,j,1
    w02,j ← Ls,j,1
(L Lrez Ls Lin0 w0)T

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Рабочие листы MathCAD. Точные частотные характеристики

ORIGIN:= 1

ERRKOEFF:= 10^{-3}

Точные частотные характеристики

1 Вызов библиотек

 Reference:D:\00\0-Готовое\ЛЧХ-библиотека-1.xmcd(R)

2 Задание передаточных функций блоков, составляющих систему

2.1 Задание передаточных функций блоков:

$$W_1 := \text{FW3}(k_1, 0, \tau_1, \zeta, 3, T_1, \xi) \rightarrow \frac{k_1}{s}$$

$$W_2 := \text{FW3}(k_1, 0, \tau_1, \zeta, 1, T_1, \xi) \rightarrow \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1}$$

$$W_3 := \text{FW3}(k_2, 1, \tau_1, \zeta, 1, T_2, \xi) \rightarrow \frac{k_2 \cdot (s \cdot \tau_1 + 1)}{T_2 \cdot s + 1}$$

$$W_4 := \text{FW3}(k_3, 0, \tau, \zeta, 2, T_3, \xi_3) \rightarrow \frac{k_3}{T_3^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_3 \cdot T_3 \cdot s + 1}$$

$$W_5 := \text{FW3}(k_4, 0, \tau, \zeta, 2, T_4, \xi_4) \rightarrow \frac{k_4}{T_4^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_4 \cdot T_4 \cdot s + 1}$$

2.2 Последовательное соединение передаточных функций:

2.2.1 Число передаточных функций (блоков): $N_w := \text{rows}(W) \rightarrow 5$

2.2.2 Перемножение последовательных передаточных функций

$$W(s) := \prod_{j=1}^{N_w} W_j \rightarrow \frac{k_1^2 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (s \cdot \tau_1 + 1)}{s \cdot (T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1) \cdot (T_3^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_3 \cdot T_3 \cdot s + 1) \cdot (T_4^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_4 \cdot T_4 \cdot s + 1)}$$

2.3 Параметры типовых звеньев передаточных функций

2.3.1 Параметры типовых звеньев числителя: $\tau_1 := 0.1$

2.3.2 Параметры типовых звеньев знаменателя

Коэффициенты усиления:	$k_1 := 100$	$k_2 := 1$	$k_3 := 1$	$k_4 := 1$
Постоянные времени:	$T_1 := 20$	$T_2 := 10$	$T_3 := 0.1$	$T_4 := 0.01$
Декременты затухания:			$\xi_3 := 0.7$	$\xi_4 := 0.2$

2.4 Подстановка параметров в передаточную функцию:

2.4.1 Раскрытие передаточной функции после задания значений параметров: если раскрыть математическое выражение после задания значений параметров, то они привнесутся (по принципу -- заданное выше присваивается тому, что ниже)

$$\underline{W(s)} := W(s) \rightarrow \frac{k_1^2 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (s \cdot \tau_1 + 1)}{s \cdot (T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1) \cdot (T_3^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_3 \cdot T_3 \cdot s + 1) \cdot (T_4^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_4 \cdot T_4 \cdot s + 1)}$$

2.4.2 Проверка попадания параметров в передаточную функцию:

$$W(s) \rightarrow \frac{1000.0 \cdot s + 10000}{s \cdot (10 \cdot s + 1) \cdot (20 \cdot s + 1) \cdot (0.14 \cdot s + 0.01 \cdot s^2 + 1) \cdot (0.0001 \cdot s^2 + 0.004 \cdot s + 1)}$$

2.5 Подготовка массива коэффициентов для построения частотных характеристик

2.5.1 Перемножение типовых динамических звеньев и переход к полиномам числителя и знаменателя:

$$\underline{W}(s) := W(s) \begin{cases} \text{expand} \\ \text{collect, s} \end{cases} \rightarrow \frac{1.0e9 \cdot s + 1.0e10}{200.0 \cdot s^7 + 10830.0 \cdot s^6 + 2.133621e6 \cdot s^5 + 2.9119854e7 \cdot s^4 + 2.0433066e8 \cdot s^3 + 3.0144e7 \cdot s^2 + 1.0e6 \cdot s}$$

2.5.2 Выделение полинома числителя:

$$G := \text{numer}(W(s)) \rightarrow 1.0e9 \cdot s + 1.0e10$$

2.5.3 Выделение коэффициентов полинома числителя:

$$\underline{g} := G \text{ coeffs, s} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.0e10 \\ 1.0e9 \end{pmatrix}$$

2.5.4 Выделение полинома знаменателя:

$$H := \text{denom}(W(s)) \rightarrow 200.0 \cdot s^7 + 10830.0 \cdot s^6 + 2.133621e6 \cdot s^5 + 2.9119854e7 \cdot s^4 + 2.0433066e8 \cdot s^3 + 3.0144e7 \cdot s^2 + 1.0e6 \cdot s$$

2.5.5 Выделение коэффициентов полинома знаменателя:

$$h := H \text{ coeffs, s} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1.0e6 \\ 3.0144e7 \\ 2.0433066e8 \\ 2.9119854e7 \\ 2.133621e6 \\ 10830.0 \\ 200.0 \end{pmatrix}$$

2.5.6 Формирование массива из коэффициентов полиномов числителя и знаменателя для расчёта частотных характеристик:

$$W_{\omega} := FW_{\omega}(h, g) = \begin{pmatrix} 1 \times 10^4 & 0 \\ 1 \times 10^3 & 1 \\ 0 & 30.144 \\ 0 & 204.331 \\ 0 & 29.12 \\ 0 & 2.134 \\ 0 & 0.011 \\ 0 & 2 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Пояснение. Коэффициенты полиномов числителя расположены в столбце 1, начиная со свободного коэффициента. Коэффициенты полинома знаменателя расположены в столбце 2, начиная со свободного коэффициента

3 Расчёт частотных характеристик

3.1 Число точек графика: $N_{\text{point}} := 1000$

3.2 Минимальная частота: $\omega_{\text{min}} := 0.01$

3.3 Максимальная частота: $\omega_{\text{max}} := 1000$

3.4 Вызов процедуры для расчёта частотных характеристик: $\text{ХарЧаст} := \text{CHCH}(\omega, \omega_{\text{min}}, \omega_{\text{max}}, N_{\text{point}})$

4 Построение частотных характеристик

4.1 Частота, рад/с: $\omega := \text{ХарЧаст}^{(1)}$

4.2 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ): $A := \text{ХарЧаст}^{(2)}$

4.3 Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ): $L := 20 \cdot \log(A)$

4.4 Фазо-частотная характеристика (ФЧХ): $\varphi := \text{ХарЧаст}^{(3)}$

4.5 Вещественная частотная характеристика (ВЧХ): $P := \text{ХарЧаст}^{(4)}$

4.6 Мнимая частотная характеристика (МЧХ): $Q := \text{ХарЧаст}^{(5)}$

4.7 Цикл по всем рассчитанным точкам: $k := \text{ORIGIN} .. (\text{ORIGIN} + N_{\text{point}} - 1)$

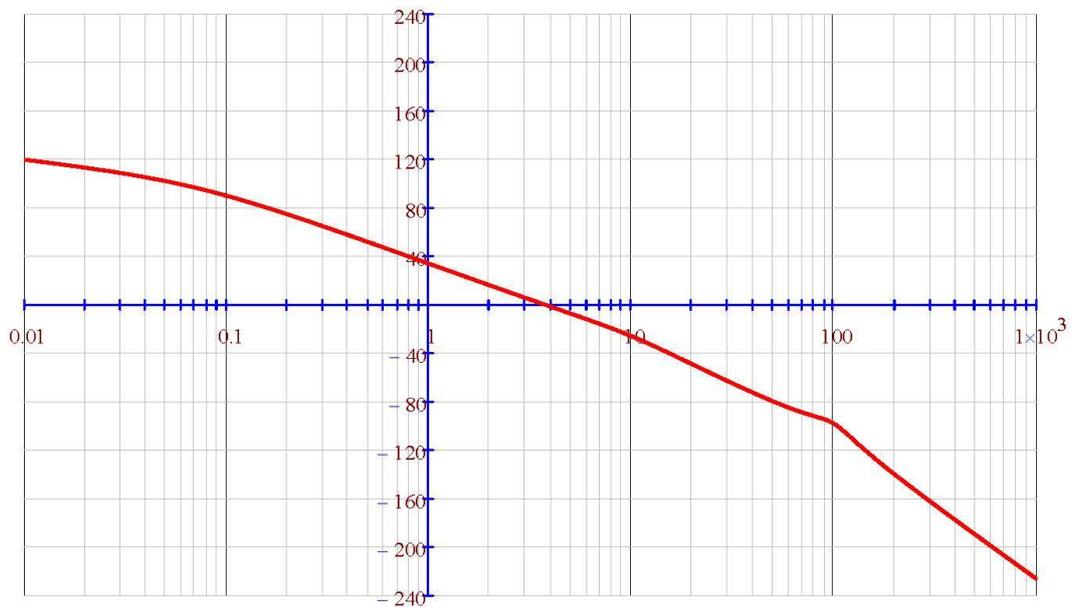


Рисунок 1 - Логарифмические амплитудно-частотная характеристика, дБ

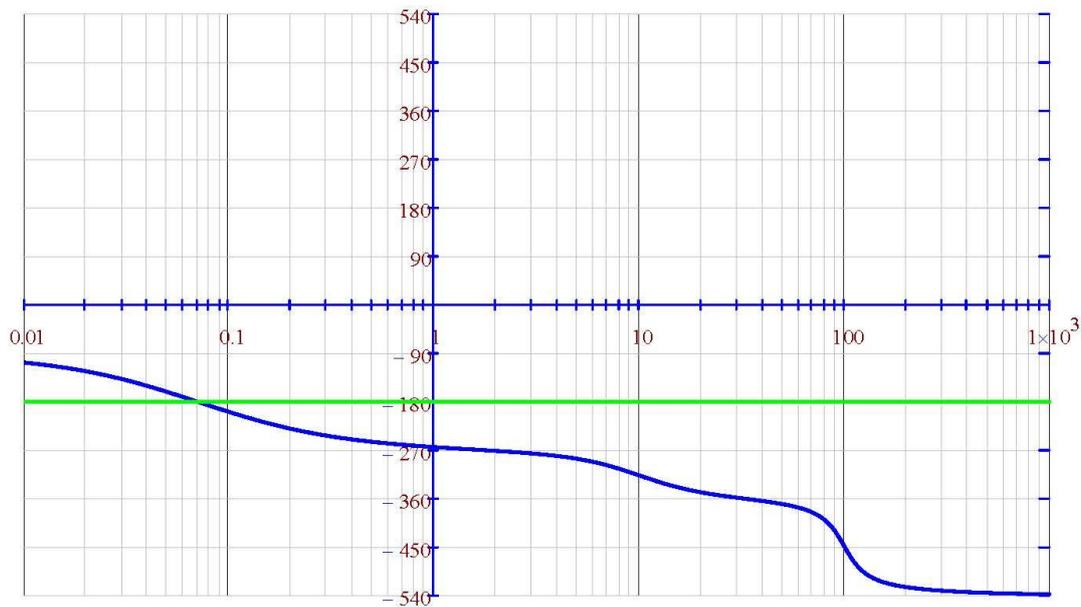


Рисунок 2 - Логарифмические фазочастотная характеристика, град

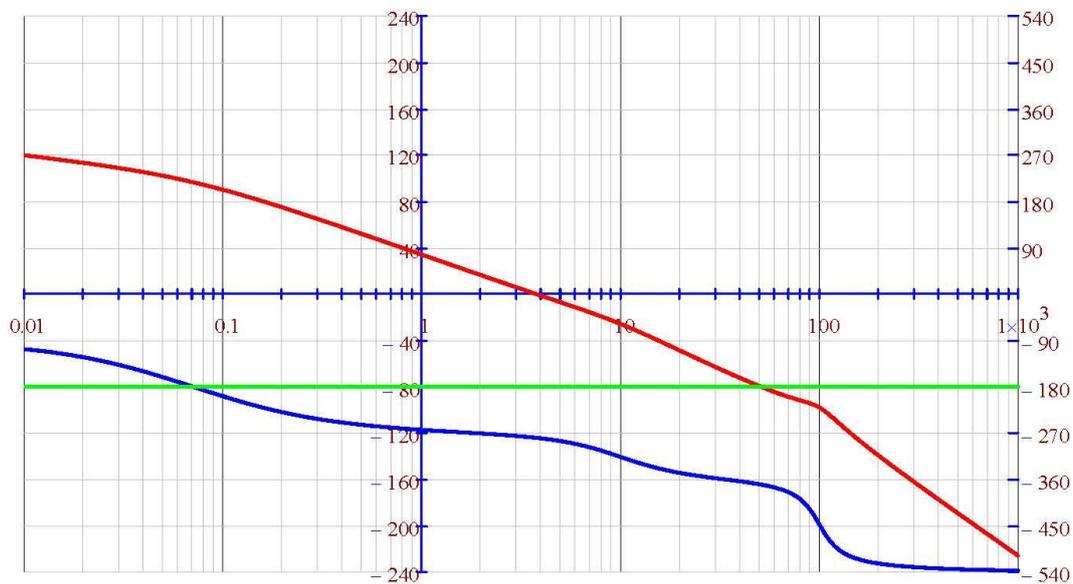


Рисунок 3 - Логарифмические амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Рабочие листы MathCAD. Асимптотические частотные характеристики

ORIGIN= 1

Асимптотические логарифмические частотные характеристики

1 Вызов библиотек

 Reference:D:\00\MathCAD\0-Готовое\ЛЧХ-библиотека-2.xmcd(R)

2 Асимптотические ЛАЧХ отдельных звеньев и всей системы с заданием передаточной функции в виде массива параметров

2.1 Параметры типовых динамических звеньев:

Степень полинома n (+ числитель, - знаменатель, 3 - чистый оператор s)
 Коэффициент усиления k
 Постоянные времени T
 Коэффициенты затухания ξ

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} \quad W^{(1)} := \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad W^{(2)} := \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad W^{(3)} := \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 2 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad W^{(4)} := \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$

2.2 Передаточная функция через типовые динамические звенья

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -2 & -2 \\ 20 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.2 \end{pmatrix}$$

2.3 Число звеньев:

$$N_{zv} := \text{cols}(W) = 4$$

2.4 Диапазон абсцисс графика:

$$\omega_{\min} := 0.01 \quad \omega_{\max} := 100$$

2.5 Диапазон ординат графика:

$$L_{\min} := -100 \quad L_{\max} := 100$$

2.6 Число точек расчёта:

$$N_{\text{point}} := 4000$$

2.7 Расчёт графиков:

$$G := \text{GrafLACH}(W, \omega_{\min}, \omega_{\max}, N_{\text{point}})$$

2.8 Расчёт данных для построения графиков:

$$V := \text{GrafVis}(G, W, \omega_{\min})$$

2.9 Массив частот:

$$\omega := G^{(1)}$$

2.10 ЛАЧХ отдельных звеньев:

$$L_1 := G^{(2)} \quad L_2 := G^{(3)} \quad L_3 := G^{(4)} \quad L_4 := G^{(5)}$$

2.11 ЛАЧХ системы:

$$L_{\text{rez}} := V_2$$

2.12 Абсциссы для визуализации точек сопряжения:

$$w := (V_3)^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.01 \\ 0.5 \\ 2.5 \end{pmatrix}$$

2.13 Ординаты для визуализации точек сопряжения отдельных звеньев:

$$L_w := V_1 = \begin{pmatrix} 26.021 \\ 39.98 \\ -1.2 \times 10^{-3} \\ -2.4 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

2.14 Ординаты для визуализации точек сопряжения всей системы:

$$L_s := (V_3)^{(2)} = \begin{pmatrix} 66.001 \\ 66.001 \\ 32.039 \\ -9.903 \end{pmatrix}$$

2.15 Массив ординат вертикальных линий для точек сопряжения:

$$Lin0 := V_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 66.001 & 66.001 & 32.039 & -9.903 \end{pmatrix}$$

2.16 Массив ординат вертикальных линий для точек сопряжения:

$$w0 := V_5 = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.01 & 0.5 & 2.5 \\ 0.01 & 0.01 & 0.5 & 2.5 \end{pmatrix}$$

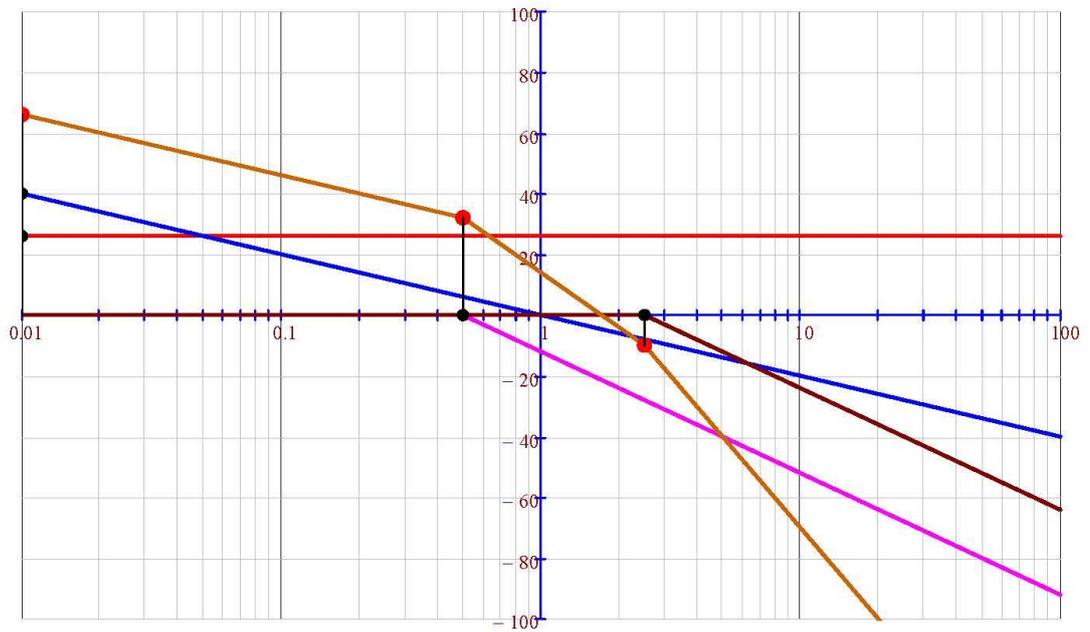


Рисунок 1 - Асимптотические ЛАЧХ отдельных звеньев и всей системы

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Рабочие листы MathCAD. Совмещённые точные и асимптотические частотные характеристики

ORIGIN=1 Точные и асимптотические логарифмические частотные характеристики

1 Вызов библиотек

Reference:D:\00\0-Готовое\ЛЧХ-библиотека-1.xmcd(R)

Reference:D:\00\0-Готовое\ЛЧХ-библиотека-2.xmcd(R)

2 Задание передаточных функций через типовые динамические звенья

2.1 Для расчёта асимптотических ЛАЧХ

Параметры типовых динамических звеньев:

$$\begin{pmatrix} n & \text{"Степень полинома (+числитель, - знаменатель, 0 чистый коэффициент)"} \\ k & \text{"коэффициент усиления"} \\ T & \text{"постоянная времени"} \\ \xi & \text{"коэффициент затухания"} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} \quad W^{(1)} := \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad W^{(2)} := \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad W^{(3)} := \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 2 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad W^{(4)} := \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix} \quad W^{(5)} := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0.2 \\ 0.6 \end{pmatrix}$$

Передаточная функция через типовые динамические звенья:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -2 & -2 & 2 \\ 20 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.2 & 0.6 \end{pmatrix}$$

2.2 Для расчёта точных ЛАЧХ

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} := W^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad w_1 := \text{FW3}(k, Z(n, T, 1), T, \xi, Z(n, T, 2), T, \xi) \rightarrow 20$$

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} := W^{(2)} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad w_2 := \text{FW3}(k, Z(n, T, 1), T, \xi, Z(n, T, 2), k, \xi) \rightarrow \frac{1}{s}$$

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} := W^{(3)} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 2 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad w_3 := \text{FW3}(k, Z(n, T, 1), T, \xi, Z(n, T, 2), T, \xi) \rightarrow \frac{1}{2.8s + 4s^2 + 1}$$

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} := W^{(4)} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix} \quad w_4 := \text{FW3}(k, Z(n, T, 1), T, \xi, Z(n, T, 2), T, \xi) \rightarrow \frac{1}{0.16s + 0.16s^2 + 1}$$

$$\begin{pmatrix} n \\ k \\ T \\ \xi \end{pmatrix} := W^{(5)} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0.2 \\ 0.6 \end{pmatrix} \quad w_5 := \text{FW3}(k, Z(n, T, 1), T, \xi, Z(n, T, 2), T, \xi) \rightarrow 0.24s + 0.04s^2 + 1$$

Число звеньев:

$$N_{zv} := \text{cols}(W) = 5$$

Перемножение последовательных передаточных функций:

$$W_s(s) := \prod_{j=1}^{N_{zv}} w_j \rightarrow \frac{20 \cdot (0.24 \cdot s + 0.04 \cdot s^2 + 1)}{s \cdot (0.16 \cdot s + 0.16 \cdot s^2 + 1) \cdot (2.8 \cdot s + 4 \cdot s^2 + 1)}$$

Перемножение типовых динамических звеньев и переход к полиномам числителя и знаменателя:

$$\underline{W_s}(s) := W_s(s) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{collect, s} \end{array} \right. \rightarrow \frac{100.0 \cdot s^2 + 600.0 \cdot s + 2500.0}{80.0 \cdot s^5 + 136.0 \cdot s^4 + 576.0 \cdot s^3 + 370.0 \cdot s^2 + 125.0 \cdot s}$$

Выделение полинома числителя:

$$G := \text{numer}(\underline{W_s}(s)) \rightarrow 100.0 \cdot s^2 + 600.0 \cdot s + 2500.0$$

Выделение коэффициентов полинома числителя:

$$\underline{g} := G \text{ coeffs, s} \rightarrow \begin{pmatrix} 2500.0 \\ 600.0 \\ 100.0 \end{pmatrix}$$

Выделение полинома знаменателя:

$$H := \text{denom}(\underline{W_s}(s)) \rightarrow 80.0 \cdot s^5 + 136.0 \cdot s^4 + 576.0 \cdot s^3 + 370.0 \cdot s^2 + 125.0 \cdot s$$

Выделение коэффициентов полинома знаменателя:

$$h := H \text{ coeffs, s} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 125.0 \\ 370.0 \\ 576.0 \\ 136.0 \\ 80.0 \end{pmatrix}$$

Формирование массива из коэффициентов полиномов числителя и знаменателя для расчёта частотных характеристик:

$$W_\omega := \text{FW}_\omega(h, g) = \begin{pmatrix} 20 & 0 \\ 4.8 & 1 \\ 0.8 & 2.96 \\ 0 & 4.608 \\ 0 & 1.088 \\ 0 & 0.64 \end{pmatrix}$$

3 Параметры расчёта

Диапазон абсцисс графика:

$$\omega_{\min} := 0.01$$

$$\omega_{\max} := 100$$

Диапазон ординат графика:

$$L_{\min} := -100$$

$$L_{\max} := 100$$

Число точек расчёта:

$$N_{\text{point}} := 4000$$

4 Расчёт ЛАЧХ

4.1 Расчёт точных ЛАЧХ

Вызов процедуры для расчёта частотных характеристик:

$$\text{ХарЧаст} := \text{CHCH}(W, \omega_{\min}, \omega_{\max}, N_{\text{point}})$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ):

$$L_f := 20 \cdot \log(\text{ХарЧаст}^{(2)})$$

4.2 Расчёт асимптотических ЛАЧХ

Расчёт графиков:

$$\underline{G} := \text{GrafLACH}(W, \omega_{\min}, \omega_{\max}, N_{\text{point}})$$

Расчёт данных для построения графиков:

$$\underline{V} := \text{GrafVis}(G, W, \omega_{\min})$$

Массив частот:

$$\omega := G^{(1)}$$

ЛАЧХ отдельных звеньев:

$$L_1 := G^{(2)} \quad L_2 := G^{(3)} \quad L_3 := G^{(4)} \quad L_4 := G^{(5)}$$

ЛАЧХ системы:

$$L_{\text{rez}} := V_2$$

Абсциссы для визуализации точек сопряжения:

$$w := (V_3)^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.01 \\ 0.5 \\ 2.5 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Ординаты для визуализации точек сопряжения отдельных звеньев:

$$\underline{w} := V_1 = \begin{pmatrix} 39.98 \\ 26.021 \\ -1.2 \times 10^{-3} \\ -2.4 \times 10^{-3} \\ 1.2 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Ординаты для визуализации точек сопряжения всей системы:

$$L_s := (V_3)^{(2)} = \begin{pmatrix} 66.001 \\ 66.001 \\ 32.039 \\ -9.903 \\ -40.002 \end{pmatrix}$$

Массив ординат вертикальных линий для точек сопряжения:

$$\text{Lin0} := V_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 66.001 & 66.001 & 32.039 & -9.903 & -40.002 \end{pmatrix}$$

Массив ординат вертикальных линий для точек сопряжения:

$$w0 := V_5 = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.01 & 0.5 & 2.5 & 5 \\ 0.01 & 0.01 & 0.5 & 2.5 & 5 \end{pmatrix}$$

Организация вывода графиков (0 - не выводить)

$h_1 := 1$

$h_2 := 1$

$h_3 := 1$

$h_4 := 1$

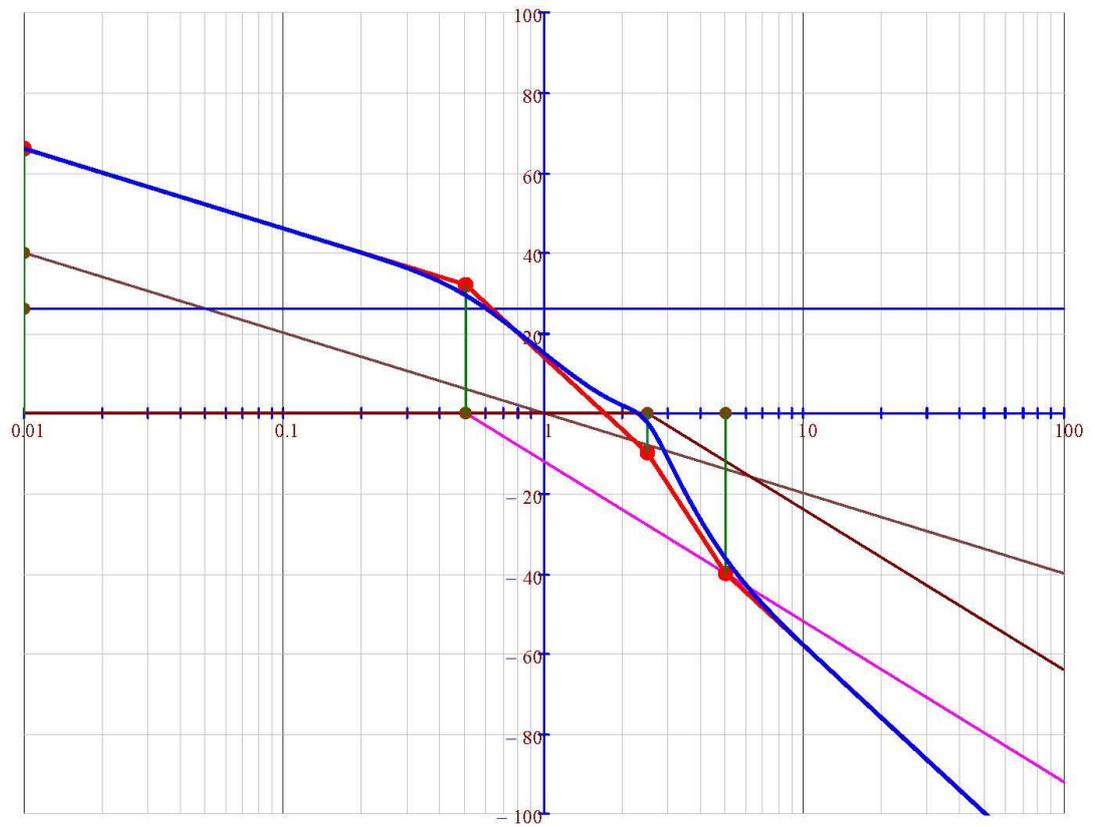
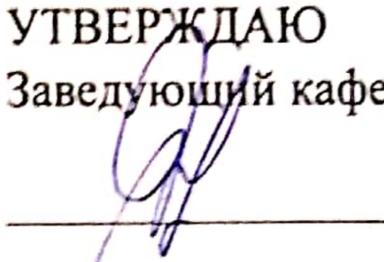


Рисунок 1 - Точная и асимптотические ЛАЧХ отдельных звеньев и всей системы

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


_____ О.В.Непомнящий

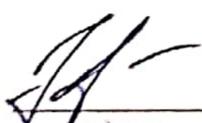
«20» 06 2022 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

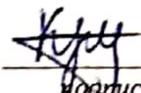
**Комплекс программ для исследования
систем автоматического регулирования**

Руководитель



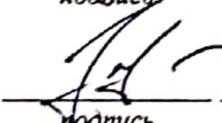
доц., канд. техн. наук Н. А. Никулин
подпись дата должность, ученая степень

Выпускник



И. И. Круглов

Нормоконтролер



доц., канд. техн. наук Н. А. Никулин
подпись дата должность, ученая степень

Красноярск 2022