**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

“ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ”

(ФГБОУ ВО “ВГТУ”, ВГТУ)

Факультет информационных технологий

и компьютерной безопасности

Кафедра систем информационной безопасности

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

по дисциплине «Электроника и схемотехника»

Тема: **Расчет и анализ усилительных устройств на транзисторах**

Выполнил студент БТ-202 И. И. Иванов

группа подпись инициалы, фамилия

Руководитель О.В. Исаев

подпись инициалы, фамилия

Нормоконтроль О.В. Исаев

подпись инициалы, фамилия

Защищена Оценка .

Воронеж 2025

**Замечание руководителя**

СОДЕРЖАНИЕ

[Введение 4](#_Toc169030296)

[1 Теоретическая часть 5](#_Toc169030297)

[1.1 Определение транзистора 5](#_Toc169030298)

[1.2 Биполярные транзисторы (БТ) 6](#_Toc169030299)

[1.3 Полевые транзисторы (ПТ) 8](#_Toc169030300)

[1.4 Классификация транзисторов 9](#_Toc169030301)

[2 Практическая часть 10](#_Toc169030302)

[2.1 Исходные данные, порядок расчета и построения частотных характеристик усилителя 10](#_Toc169030303)

[2.2 Расчет однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером 11](#_Toc169030304)

[2.3 Методика расчета усилителя по постоянному току 14](#_Toc169030305)

[2.4 Методика расчета усилителя по переменному току 22](#_Toc169030306)

[2.5 Методика построения частотных характеристик усилителя 26](#_Toc169030307)

[2.6 Методика оценки искажений усилителя 33](#_Toc169030308)

[Заключение 35](#_Toc169030309)

[Список литературы 36](#_Toc169030310)

# ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей при проектировании радиоэлектронных средств является усиление электрических сигналов по току, напряжению или мощности до требуемой величины.

Целью курсовой работы по дисциплине «Электроника и схемотехника» является изучение методологии разработки и исследования усилительных устройств на основе транзисторных элементов. В рамках данного проекта предполагается изучение основ схемотехнического проектирования усилительных каскадов, использующих биполярные и полевые транзисторы, а также применение современных электронных компонентов для создания усилительных устройств.

Основные задачи проектирования усилительных устройств включают:

1. изучение аналогов предварительных и оконечных усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах с целью совершенствования проектируемого усилителя;
2. решение задач согласования входного и выходного сопротивления усилителя с источником входного сигнала и нагрузкой;
3. обеспечение высокого коэффициента полезного действия, минимальных линейных и нелинейных искажений выходного сигнала, а также максимальной мощности в нагрузке.

Для моделирования используемых электронных компонентов, расчёта и анализа усилительных устройств рекомендуется изучить и применять известные программные продукты, например, "Electronics Workbench".

Результатом курсового проектирования является разработка принципиальной электрической схемы усилительного каскада на биполярном или полевом транзисторе, а также многокаскадного усилителя в соответствии с индивидуальным заданием. Проект также включает изготовление макета усилителя с выполненной настройкой и регулировкой в соответствии с техническим заданием, метрологическим анализом выходных сигналов и оценкой неопределенности в измерениях параметров усилителей.

## 1 Теоретическая часть

### Определение транзистора

Биполярные и полевые транзисторы находят широкое применение в качестве основной элементной базы при проектировании современных радиоэлектронных средств и электронных устройств различного назначения. Транзистор изобрели американцы У. Шокли, У. Брайттейн, Дж. Бардин в 1948 году [1].

Транзистор - это полупроводниковое устройство, которое используется для усиления или переключения электрических сигналов. Он состоит из трех слоев полупроводникового материала, которые образуют два p-n-перехода. Основные типы транзисторов — это биполярные транзисторы (БТ) и полевые транзисторы (ПТ) [2].

Транзистор основан на принципе усиления тока. Он состоит из трех полупроводниковых слоев, обычно кремния или германия, которые легированы примесями для создания областей избытка или недостатка электронов. Эти три слоя известны как эмиттер, база и коллектор.

Ток течет через транзистор, когда на базу подается напряжение. В зависимости от типа транзистора могут быть две основные конфигурации: NPN-транзистор и PNP-транзистор. В NPN-транзисторе ток течет от эмиттера к коллектору при подаче положительного напряжения на базу, а в PNP-транзисторе ток течет от коллектора к эмиттеру при подаче отрицательного напряжения на базу.

Основными характеристиками транзистора являются коэффициент усиления по току, входное сопротивление и выходное сопротивление. Коэффициент усиления по току, также известный как коэффициент усиления, определяет величину усиления, которую может обеспечить транзистор. Входное сопротивление показывает, насколько легко ток может течь в базе, а выходное сопротивление - насколько легко ток может течь в коллекторе.

Помимо усиления сигналов, транзисторы также используются для переключения сигналов. Когда на базу подается напряжение, транзистор переходит из состояния отсечки, когда через него не протекает ток, в состояние насыщения, когда ток течет свободно. Эта коммутационная способность сыграла ключевую роль в разработке цифровых схем и логических устройств [3].

### Биполярные транзисторы (БТ)

Биполярные транзисторы получили свое название из-за участия двух типов носителей заряда в процессе формирования тока - электронов и дырок. Они состоят из трех областей: эмиттера, базы и коллектора. В зависимости от последовательности слоев полупроводников, различают два типа структур: n-p-n и p-n-p [4].

Структура и принцип действия (рис.1):

1. n-p-n-транзистор: В этой структуре эмиттер и коллектор сделаны из n-материала, а база - из p-материала. Электроны инжектируются из эмиттера в базу и далее в коллектор.
2. p-n-p-транзистор: В этой структуре эмиттер и коллектор сделаны из p – материала, а база - из n-материала. Дырки инжектируются из эмиттера в базу и далее в коллектор.

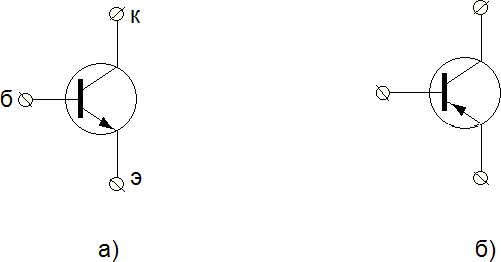


Рисунок 1 – Виды и обозначения на схемах биполярных транзисторов:

а) n-p-n; б) p-n-p

Основные параметры биполярного транзистора:

1. входное сопротивление (1);
2. выходное сопротивление (2);
3. коэффициент усиления по напряжению (3);
4. коэффициент усиления по току (4);
5. коэффициент усиления по мощности (5) [5].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |
|  |  | (2) |
|  |  | (3) |

где , , - приращения соответственно выходного и входного напряжений.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

где , – приращения соответственно выходного и входного токов транзистора.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

где , - приращения соответственно мощностей на выходе и входе транзистора.

Режимы работы:

* активный режим: Транзистор работает как усилитель. База-эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллектор-база в обратном.
* насыщение: Оба перехода смещены в прямом направлении, транзистор работает как замкнутый ключ.
* отсечка: Оба перехода смещены в обратном направлении, транзистор работает как разомкнутый ключ.

Способы включения:

* общий эмиттер: Наиболее часто используемый способ включения, обеспечивающий усиление по току и напряжению.
* общая база: Используется для высокочастотных приложений, обеспечивает низкое входное и высокое выходное сопротивление.
* общий коллектор: Обеспечивает высокое входное и низкое выходное сопротивление, используется для согласования каскадов.

### Полевые транзисторы (ПТ)

Полевые транзисторы называются униполярными, так как ток в них создается одним типом носителей заряда - либо электронами, либо дырками. Основными типами полевых транзисторов являются транзисторы с управляющим p-n-переходом (Junction Field-Effect Transistor, JFET) и транзисторы с изолированным затвором (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) [6].

Структура и принцип действия:

* JFET: Состоит из канала n-типа или p-типа, который контролируется p-n-переходом. Когда на затвор подается напряжение, p-n-переход контролирует ток через канал.
* MOSFET: Имеет изолированный от канала затвор, что позволяет управлять током через канал при помощи электрического поля. MOSFET может работать в режиме обогащения (канал создается при подаче напряжения) или истощения (канал существует без подачи напряжения).

Режимы работы:

1. линейный режим: Транзистор работает как резистор, контролируя ток через канал в зависимости от напряжения на затворе.
2. сатурация (активный режим): Ток через транзистор практически не зависит от напряжения между истоком и стоком, а определяется напряжением на затворе.

Способы включения:

* общий исток: Наиболее распространенный способ включения, аналогичен общему эмиттеру у биполярных транзисторов.
* общий затвор: Аналогичен общей базе у биполярных транзисторов, используется для высокочастотных приложений.
* общий сток: Аналогичен общему коллектору у биполярных транзисторов, используется для согласования каскадов.

### Классификация транзисторов

Транзисторы классифицируются по нескольким критериям: по функциональному назначению, диапазону рабочих частот и мощности.

По функциональному назначению:

* усилительные транзисторы,
* переключательные транзисторы,
* генераторные транзисторы.

По диапазону частот:

* низкочастотные (до 30 МГц)
* высокочастотные (до 300 МГц)
* сверхвысокочастотные (более 300 МГц)

По мощности:

* малой мощности (до 0,3 Вт),
* средней мощности (до 1,5 Вт),
* большой мощности (свыше 1,5 Вт)​​.

## 2 Практическая часть

### 2.1 Исходные данные, порядок расчета и построения частотных характеристик усилителя

Исходными данными для расчёта усилительного каскада с общим эмиттером являются следующие:

1. Uп – напряжение источника питания;
2. Um – амплитуда напряжения на выходе усилительного каскада;
3. Rн – сопротивление нагрузки;
4. уровни рабочего диапазона частот: fн, fв – нижнее и верхнее значения усиливаемой полосы частот;
5. значения допустимого уровня частотных искажений на нижней и верхней граничных частотах: Mн, Mв – уровни частотных искажений на нижней и верхней граничной частоте;
6. рабочий диапазон температур окружающей среды: tmin, °C, tmax, °C – минимальное и максимальное значения температуры;
7. Ri – сопротивление источника входного сигнала;
8. режим работы усилительного каскада – класс А.

Исходные данные для варианта 17 (таблица 1).

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер варианта | , В | , Ом | , Гц |  |  | , Ом | , ֯C | , ֯C |
| №\_\_ | 25 | 119 | 10 | 1,2 | 1,4 | 1200 | 0 | 120 |

В результате расчёта и анализа усилительного каскада должны быть определены, рассчитаны параметры транзистора и каскада и выполнено графическое построение следующим образом:

1. Выбрать тип транзистора по рассчитанным: току коллектора Iк, мощности транзистора P, верхней рабочей частоте fв и напряжению Uкэ, и вольтамперные статические входные и выходные характеристики.
2. На статических характеристиках построить нагрузочную прямую, рабочую точку и определить ток и напряжение покоя ( Iкп, Uкэп).
3. По статическим входным и выходным характеристикам определить h-параметры транзистора:

* h11 – входное сопротивление;
* h12 – коэффициент обратной связи по напряжению;
* h21 – коэффициент передачи тока базы;
* h22 – выходную проводимость.

1. Рассчитать номинальные значения сопротивлений и ёмкостей конденсаторов принципиальной электрической схемы усилительного каскада.
2. Rвх – входное сопротивление усилителя.
3. Rвых – выходное сопротивление усилителя.
4. KU – коэффициент передачи (усиления) по напряжению входного сигнала.
5. KI – коэффициент передачи по току входного сигнала.
6. KP –коэффициент усиления по мощности входного сигнала.
7. Определить частотные искажения усилителя.
8. Построить схемы замещения усилительного каскада.
9. Определить передаточные функции для схем замещения усилителя.
10. На основе передаточных функций схем замещения построить амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики усилителя.

### 2.2 Расчет однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером

Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ приведена на рисунке 2.

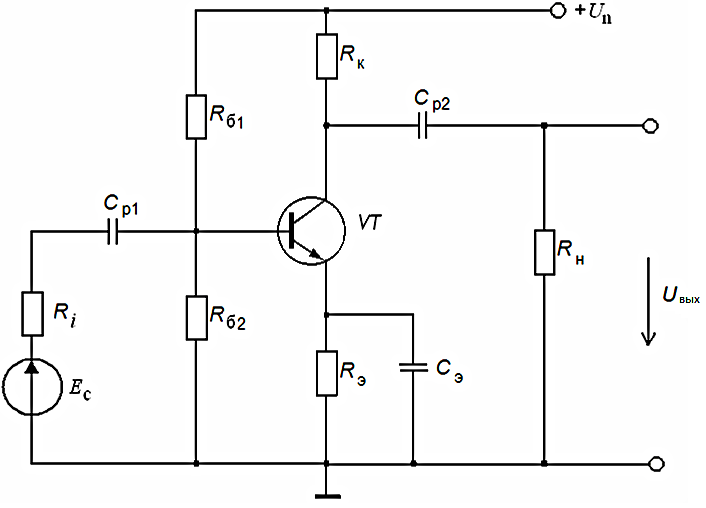
****

Рисунок 2 – Схема усилительного каскада с ОЭ

Усилительный каскад выполнен на биполярном транзисторе n-p-n-типа. На вход усилителя подключен источник входного сигнала Ec**,** который имеет внутреннее сопротивление Ri. Конденсаторы Cp1 и Cp2 предназначены для разделения режима работы усилителя по постоянному току, не пропускают постоянную составляющую переменного сигнала.

Резисторы Rб1 и Rб2 составляют делитель напряжения на входе транзистора, формируют напряжение смещения, которое определяет положение рабочей точки транзистора на нагрузочной прямой на выходных характеристиках транзистора. Резистор Rк является нагрузочным в цепи коллектора по постоянному току, определяет выходное сопротивление усилительного каскада и коэффициент усиления по напряжению KU. С увеличением значения Rк (до определённого ограничения) коэффициент KU возрастает.

Для термостабиизации рабочей точки транзистора применяется последовательная отрицательная обратная связь по току, которая формируется через резистор Rэ. Конденсатор Cэ является шунтирующим, служит для увеличения коэффициента усиления каскада по переменной составляющей, а также для формирования частотной характеристики усилителя. Усилительный каскад на рисунке 1 имеет параллельную структуру, является фазоинверсным, так как фаза выходного напряжения изменяется на угол π по отношению к входному напряжению. Усилитель с ОЭ усиливает входной сигнал по току, напряжению и мощности. Входное сопротивление каскада определяется сопротивлениями Rб1, Rб2 и входным сопротивлением транзистора h11. Выходное сопротивление каскада зависит от сопротивления коллектора (6):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

Коэффициент усиления по напряжению определяется зависимостью выходного напряжения от входного (7):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |

Ток коллектора рассчитывается на основе тока базы Iб и коэффициента передачи тока базы β (8):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

Частотные свойства усилителя зависят от частотных характеристик базового транзистора, выходного сопротивления источника сигнала и нагрузки.

Нелинейные искажения усилительного каскада определяются внутренним сопротивлением генератора на входе, сопротивлением нагрузки и уровнем амплитуды выходного сигнала.

Усилительные каскады на биполярных транзисторах находят наибольшее применение в предварительных усилительных каскадах, так как усиливают ток и напряжение, а, следовательно, обеспечивается усиление сигнала по мощности.

### 2.3 Методика расчета усилителя по постоянному току

Основываясь на исходных данных, приведенных в таблице 1, проведем расчет усилительного каскада.

Выбираем транзистор VT, исходя из выполнения следующих условий. Сопротивление коллектора (9):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

где = 5…10.

Выбираем = 10·119 Ом = 1190 Ом (для максимального значения = 10). Рассчитанное значение сопротивления коллектора выбираем из номинального ряда = 1200 Ом. , принимаем

Допустимая максимальная мощность (10-11):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (10)  (11) |

Предполагаем, что (12):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (12) |

Вычислим (13):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (13) |

Далее вычислим максимальную мощность (14):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (14) |

Отсюда получаем (15):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (15) |

Рабочая частота транзистора fр.

По рассчитанным значениям:

1. = 21 мА;
2. = 10 мА;
3. = 125 Вт ;

из справочника по полупроводниковым приборам (транзисторам малой мощности) выбираем транзистор n-p-n 2N3904 со следующими параметрами (табл.2):

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , мВт | , МГц | *,* В |  |  | , |
| 210 | 300 | 40 | 200 | 1 | 40…100 |

Рассчитываем значение резистора. Полагаем, что = (0,1...0,5)\*, тогда выбираем = 0,25\*1,2 кОм =0,3 кОм.

Для определения рабочей точки транзистора и уточнения значений тока и напряжения покоя на статических входных и выходных характеристиках биполярного транзистора с ОЭ (рис.3-4) строим нагрузочную прямую на выходных характеристиках

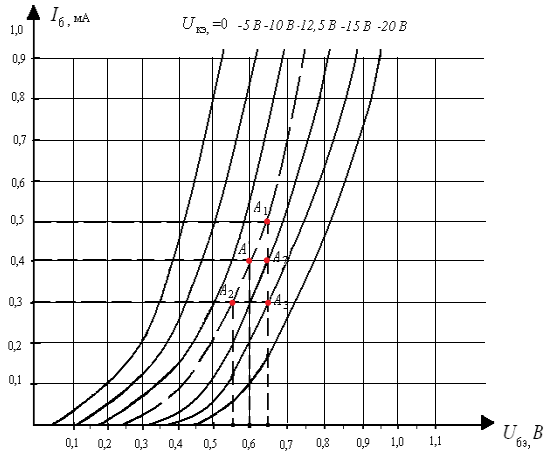


Рисунок 3 – Статические входные характеристики биполярного транзистора с ОЭ

Нагрузочная прямая на выходных характеристиках строится в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Для выходной цепи транзистора (коллектор-эмиттер) по второму закону Кирхгофа (16).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (16) |

В режиме XX

*,* при этом

В режиме КЗ при этом (17):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (17) |

На выходных характеристиках откладываем точку E, соответствующую режиму ХХ и точку D, соответствующую режиму КЗ. Через точки D и Е проводим нагрузочную прямую, на которой отмечаем точку покоя А по координате тока коллектора покоя .

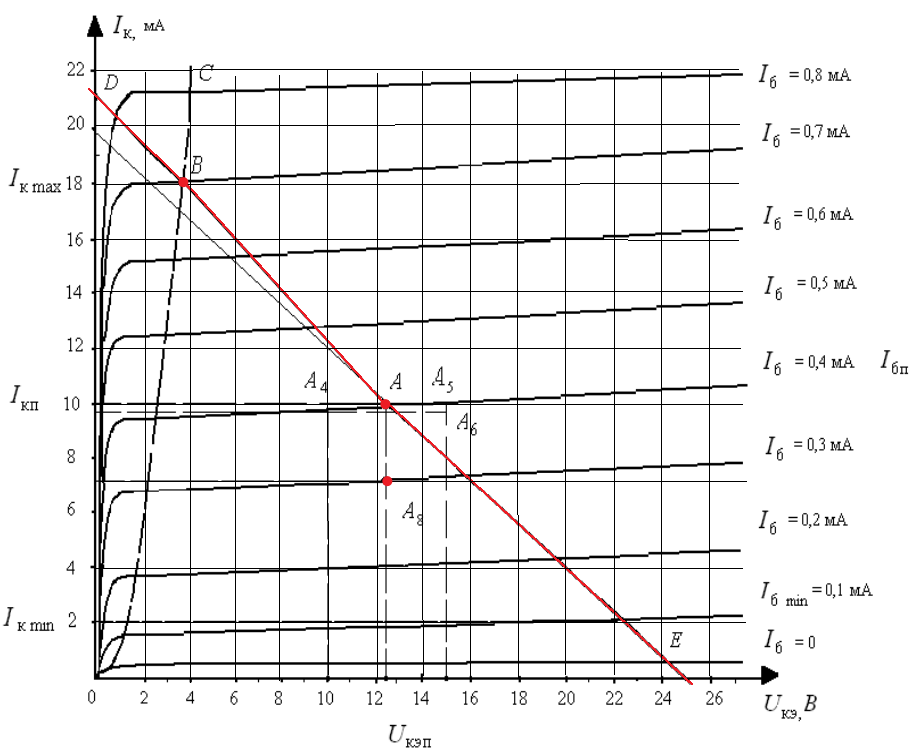


Рисунок 4 – Статические выходные характеристики биполярного транзистора с ОЭ

Для определения откладываем соответствующий . соответствует точка пересечения нагрузочной прямой DE и штриховой линии ОС, отделяющей на выходных характеристиках режим насыщения (точка В). определяется по формуле (18):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (18) |

Рабочей точке А соответствует напряжение =12,5 В.

Мощность рассеяния на коллекторе будет равно (19):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (19) |

Согласно справочным данным для выбранного транзистора режим работы транзистора по мощности рассеяния должен быть допустим. Если этот режим не выполняется, то следует увеличить или уменьшить .

Выполняется расчет h – параметров транзистора по характеристическим треугольникам в области рабочей точки А на выходных характеристиках и в области рабочей точки А’ на входных характеристиках. На входные характеристики рабочую точку А переносим по значениям тока базы = 0,4 мА и напряжению = 12,5 В.

Для построения характеристического треугольника на равных расстояниях от точки А на входных характеристиках откладываются перпендикуляры на ось и Тогда входное сопротивление транзистора (20), выходная проводимость (21):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (20)  (21) |

Коэффициент обратной связи по напряжению (23) определяется по входным характеристикам при постоянном токе базы для точек *А’* и *А*7, коэффициент передачи тока базы транзистора (24).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (22)  (23)  (24) |

По эквивалентной Т – образной схеме замещения транзистора с ОЭ определяются физические параметры (рис. 5) , , , β (26-27).

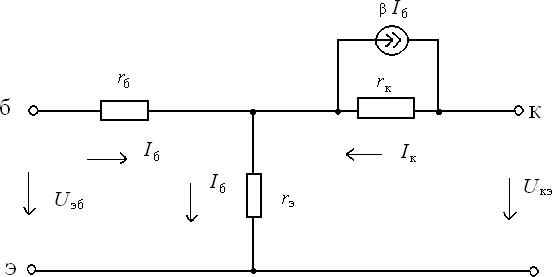


Рисунок 5 – Т – образная схема замещения биполярного транзистора с ОЭ

Коэффициент передачи тока базы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | ;  ;  . | (25)  (26) (27) |

В рассматриваемом усилительном каскаде с ОЭ для стабилизации тока коллектора используется эмиттерная стабилизация. Увеличение тока коллектора, например, при воздействии температуры окружающей среды, приводит к возрастанию тока эмиттера и падению напряжения на резисторе *R*э. Это напряжение (с минусом) подаётся через делитель напряжения Rб1 и Rб2 на базу транзистора, препятствуя возрастанию тока коллектора.

При изменении температуры окружающей среды приращение тока коллектора определяется приращением следующих параметров (28):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (28) |

где S – коэффициент нестабильности тока коллектора *I*к (29); – приращение напряжения на эмиттерном переходе; – приращение коэффициента передачи по току; *R*б – эквивалентное сопротивление базы (30); – приращение обратного тока коллектора.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (29) |

где – коэффициент токораспределения в цепи коллектора;

=0,429

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (30) |

Подставляя полученное значение γ в формулу для определения коэффициента нестабильности (31):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | , | (31)  (32) |

где *Е* – температурный коэффициент напряжения *U*бэ, для кремниевых транзисторов, согласно справочным данным, .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (33) |

Изменение коэффициента передачи тока при изменении температуры определяется по зависимостям из справочных данных. Принимаем .

Приращение обратного тока коллектора при изменении температуры окружающей среды (34):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (34) |

где *Т*\* – температура удвоения тока коллектора; *T*0 – начальная температура, при которой определялся обратный ток *I*ко (0 °С).

Обратный ток коллектора для транзистора 2N3904 берётся из справочника: *I*ко = 1 мкА.

Приращение тока коллектора будет равно (35):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (35) |

Подставляем рассчитанные значения *S*, , *R*б, , в формулу для определения приращения *I*к (36):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (36) |

Рассчитываем сопротивления делителя напряжения *R*б1 , *R*б2 (37-38):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (37) |

где ;

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (37) |

По шкале номинальных значений сопротивлений принимаем *R*б1 = 16 кОм.

Рассчитываем *R*б2 по формуле (38):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (37) |

Принимаем *R*б2 = 0,41 кОм.

### 2.4 Методика расчета усилителя по переменному току

Расчет по переменному току проводится на основе использования эквивалентной схемы, приведенной на рисунке 6 усилительного каскада с ОЭ переменного тока

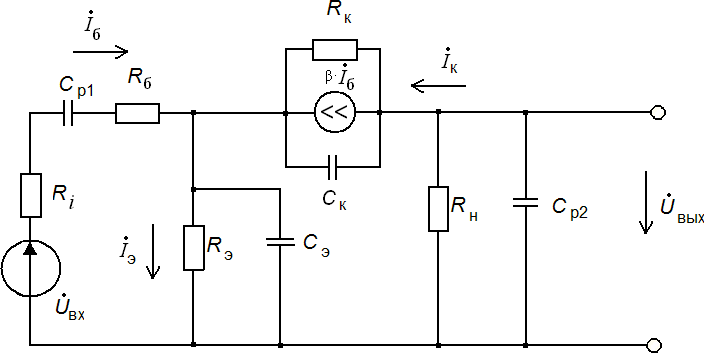


Рисунок 6 – Эквивалентная схема усилительного каскада с ОЭ при переменном токе

Входное сопротивление усилительного каскада для переменной составляющей (38-39) , где Rвх т – входное сопротивление транзистора, Rвх т = h11э= 500 Ом.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | = = ,  *=0,4* кОм*ǀ0,5* кОм*=* | (38)  (39) |

Выходное сопротивление усилителя для переменной составляющей (40):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (40) |

где .

Коэффициент усиления по напряжению каскада при переменном токе (41):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (41) |

Коэффициент усиления каскада по току (42):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | = | (41) |

Коэффициент усиления каскада по мощности (42):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (42) |

Ёмкость разделительного конденсатора Cр1 определяется по следующей зависимости (43):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Cр1 = = = 16,87 мкФ | (43) |

где τ =

Ёмкость конденсатора Cр2 определяется следующим образом (44):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Cр2 = | (44) |

Рассчитываем ёмкость конденсатора (45):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (45) |

где .

По шкале номинальных значений принимаем 800 мкФ.

Верхняя предельная частота транзистора 2N3904 определяется по следующей зависимости (46):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (46) |

где Kб – коэффициент в цепи отрицательной обратной связи, учитывающий ответвление тока коллектора в базу (47); τквч – постоянная времени, учитывающая нарастание тока коллектора на высокой частоте где =

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (47)  (48) |

где – постоянная времени цепи обратной связи на предельной частоте для транзистора 2N3904, = 300 пс ; Cк – ёмкость коллекторного перехода (справочные данные[10]), Cк = 4 пФ .

Рассчитываем (49):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (49) |

Подставляем полученные значения Kб и tквч в формулу для определения ωв (50-51)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (50)  (51) |

Принципиальная электрическая схема с указанием рассчитанных номиналов элементов приведена на рисунке 7.

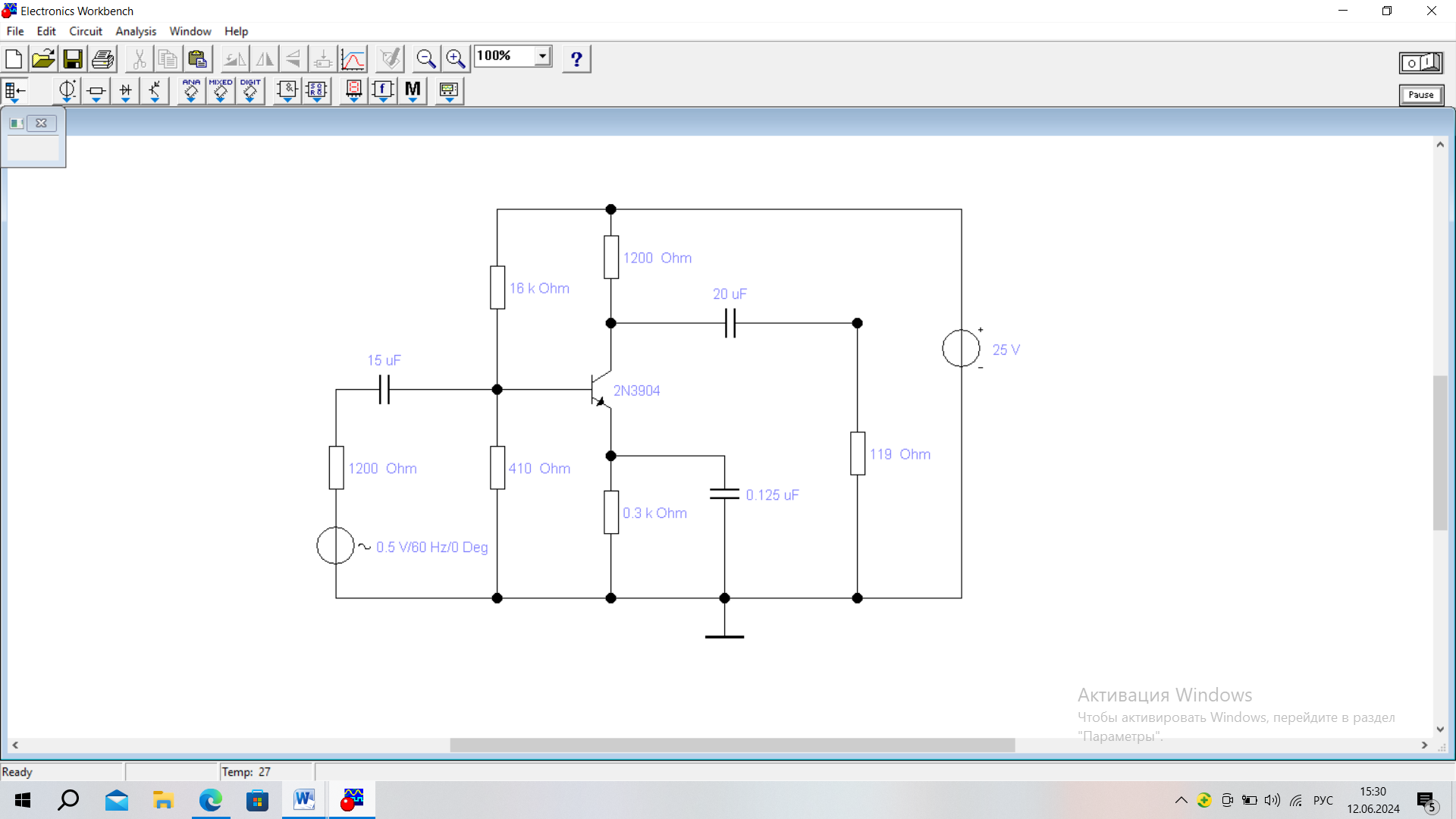


Рисунок 7 – Принципиальная электрическая схема усилителя с рассчитанными значениями номиналов элементов

### 2.5 Методика построения частотных характеристик усилителя

Для построения частотных характеристик усилителя – логарифмической амплитудно-частотной и фазо-частотной, составляется схема замещения усилителя, которая представлена на рисунке 8. Для того, чтобы расчет и построение частотных характеристик упростились, следует схему замещения представить двумя схемами замещения, которые содержат по одному конденсатору. Тогда передаточные функции для этих схем замещения будут первого порядка, так как схемы описываются дифференциальными уравнениями, связывающими входные и выходные сигналы схемы, первого порядка.

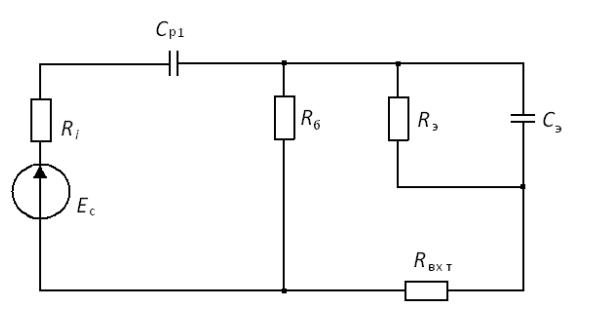


Рисунок 8 – Схема замещения усилителя

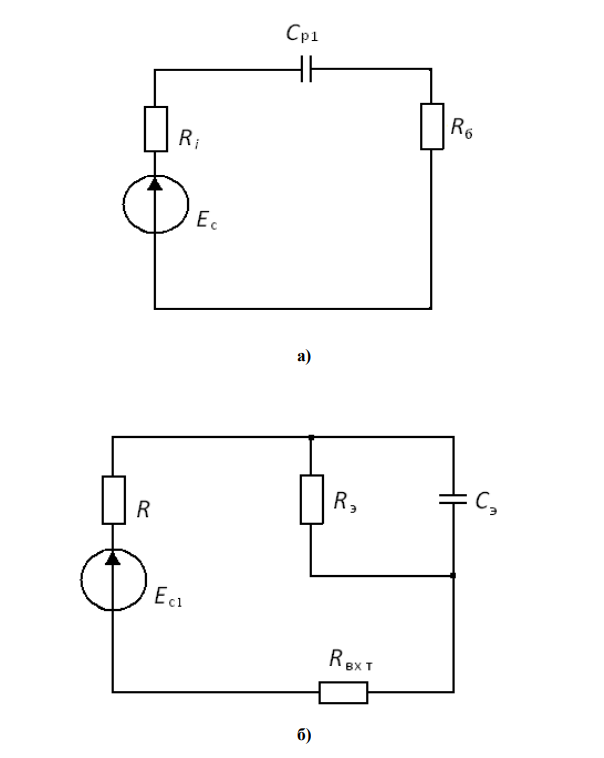


Рисунок 9 – Схемы замещения усилительного каскада: а) схема замещения 1; б) схема замещения 2

Последующие расчёты представлены на рисунке 10.

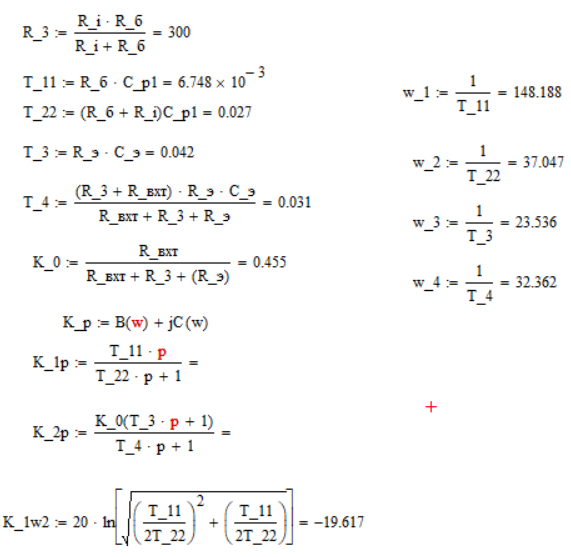


Рисунок 10 – Расчет Mathcad

Общий вид логарифмических амплитудно-частотных характеристик для известных R C - цепей и передаточных функций для схем замещения (рис. 11-13).

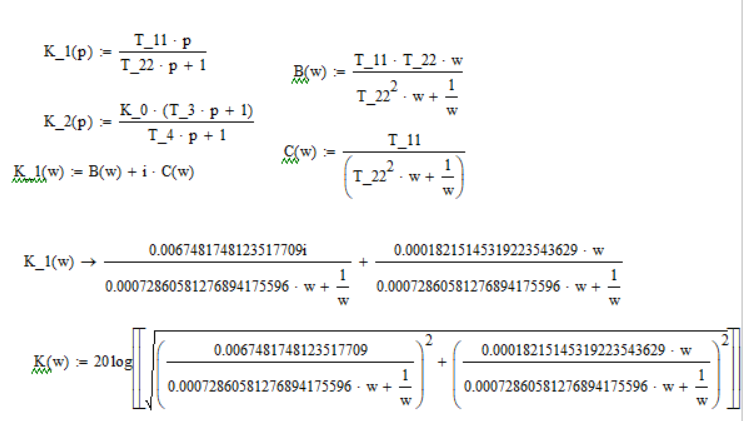


Рисунок 11 – Расчет Mathcad для построения графика ЛАЧХ известных элементарных RC-цепей для передаточной функции K1(p)

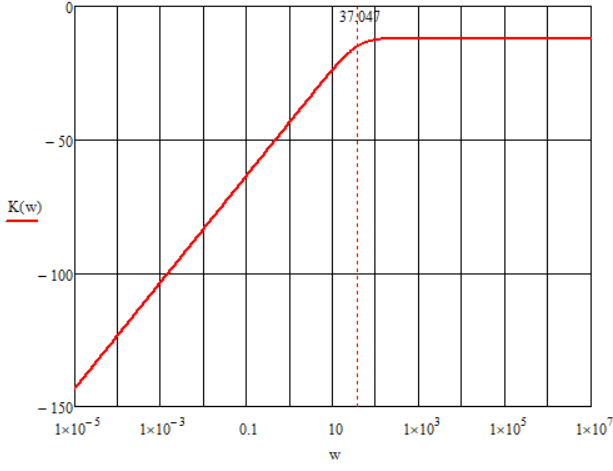


Рисунок 12 – ЛАЧХ известных элементарных RC-цепей для передаточной функции K1(p)

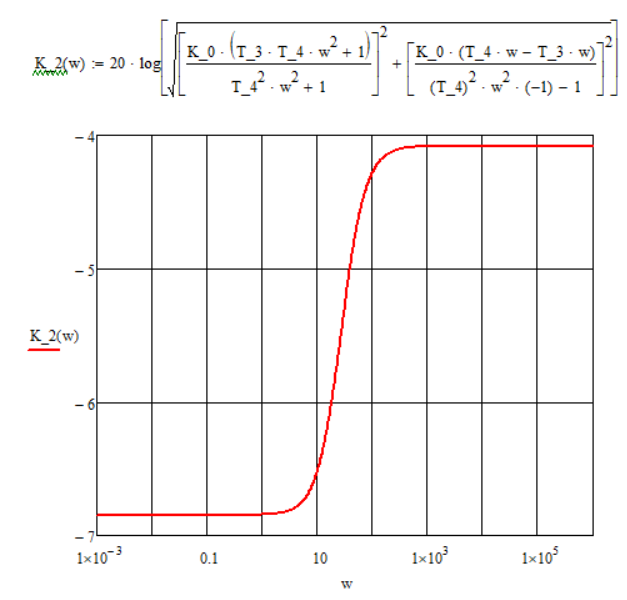


Рисунок 13 – ЛАЧХ известных элементарных RC-цепей для передаточной функции K2(p)

Построим фазочастотную характеристику усилителя с ОЭ. Согласно передаточной функции для схемы замещения ФЧХ определяется следующим образом (рис. 14):

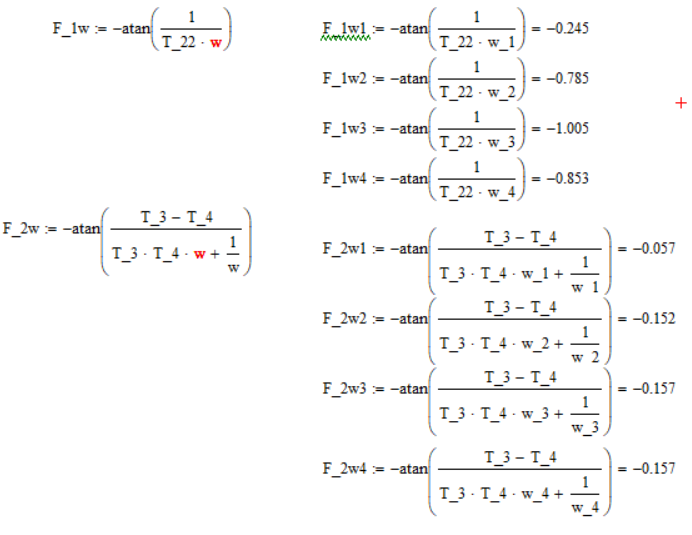


Рисунок 14 – Расчет Mathcad

Фазо-частотная характеристика строится в соответствии с полученными зависимостями (ω) ϕ1 и (ω) ϕ2 , а затем суммируются для получения общей ФЧХ усилительного каскада с ОЭ.

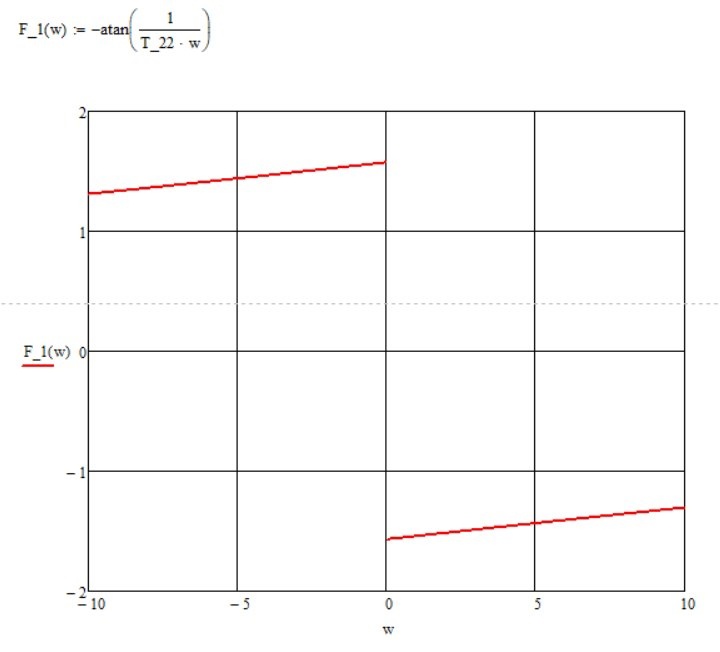


Рисунок 15 – график

В соответствии с передаточной функцией K2 (p) для схемы замещения на рис. 8, б ФЧХ будет иметь следующее выражение():

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | arctg = | (19) |

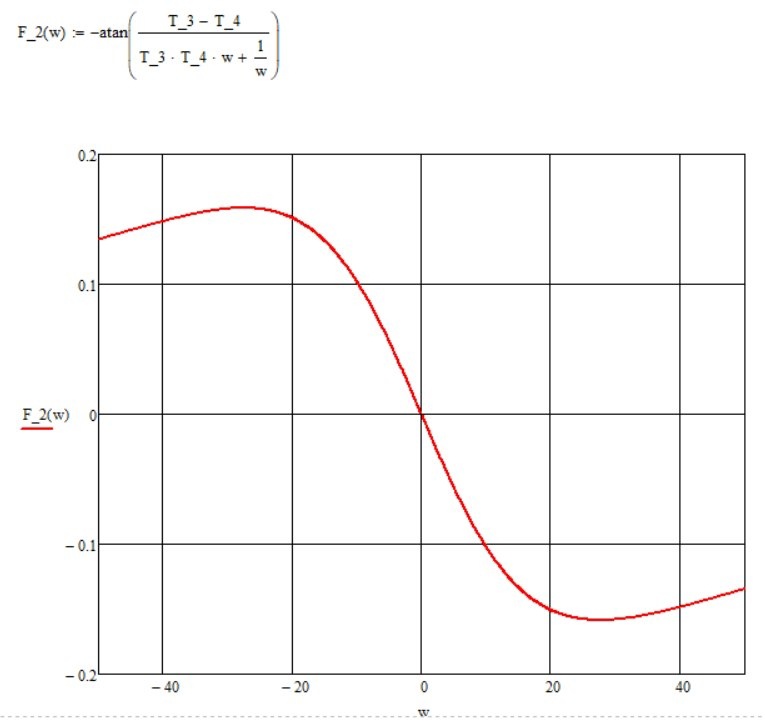


Рисунок 16 -

Фазочастотная характеристика строится в соответствии с полученными зависимостями (ω) и (ω) , а затем суммируются для получения общей ФЧХ усилительного каскада с ОЭ (рис.20).

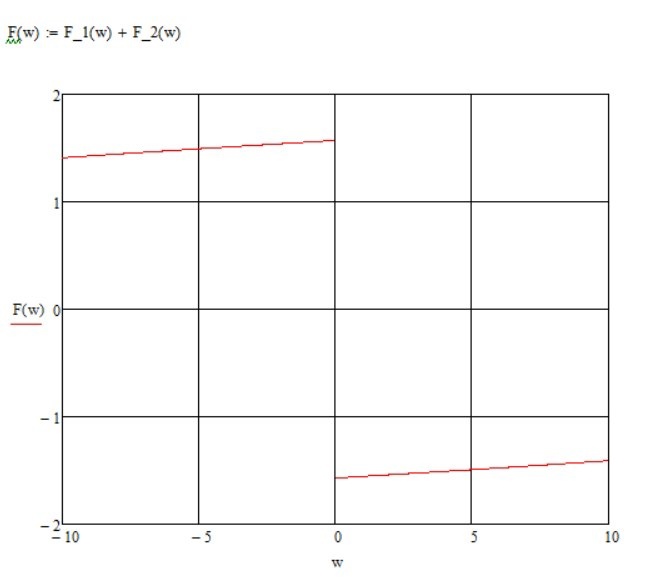


Рисунок 17 – Суммарная ФЧХ

### 2.6 Методика оценки искажений усилителя

Нелинейные искажения в усилителе появляются по следующим основным причинам: из-за наличия в схеме усилителя элементов с нелинейными вольтамперными характеристиками (входными и выходными), нестабильности внутреннего сопротивления источника входного сигнала и сопротивления нагрузки. Значительные искажения в усилитель вносят нестабильность источника питания и изменение температуры окружающей среды.

При оценке искажений в усилителе можно определить коэффициент шума усилителя при нормальных условиях эксплуатации для средних частот по следующему выражению (рис.18).

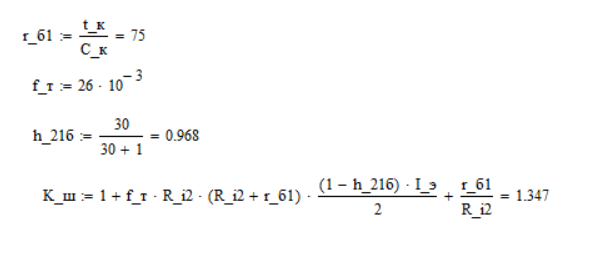


Рисунок 18 – Расчёт Mathcad

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения курсового проекта были успешно достигнуты поставленные цели и задачи. Расширены знания о физических процессах в полупроводниковых элементах, их параметрах и характеристиках, а также о процессах, протекающих в электронных цепях, с учетом влияния паразитных параметров и отклонений параметров элементов схем.

Изучены и применены на практике методы расчета и анализа усилительных устройств с использованием современных информационных технологий и программных продуктов. Получены ценные практические навыки, которые являются важным этапом в подготовке будущих специалистов.

Освоены принципы построения усилительных устройств на основе биполярных и полевых транзисторов, что позволило углубить понимание функционирования этих элементов и их применения в различных схемах. Приобретены навыки работы с научно-технической и справочной литературой при изучении и проектировании усилительных устройств в соответствии с техническим заданием.

Таким образом, выполнение курсового проекта способствовало всестороннему развитию профессиональных навыков, необходимых для дальнейшей инженерной деятельности, и обеспечило углубленное понимание ключевых аспектов электроники и электротехники.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванова З.М. Схемотехника электронных средств: учебное пособие / З.М. Селиванова. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 80 с. – 100 экз.
2. Устройство и работа биполярных транзисторов / [Электронный ресурс] // : [сайт]. - URL: https://poznayka.org/s79711t2.html (дата обращения: 10.05.2025).
3. Особенности биполярного транзистора: все, что вам нужно знать / [Электронный ресурс] // : [сайт]. - URL: https://polaridad.es/ru/transistor-de-union-bipolar-caracteristicas/ (дата обращения: 10.05.2025).
4. Биполярные транзисторы, принцип действия / [Электронный ресурс] // : [сайт]. - URL: https://studfile.net/preview/2495800/page:3/ (дата обращения: 10.05.2025).
5. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах / [Электронный ресурс] // : [сайт]. - URL: https://pandia.org/text/77/404/36259-9.php (дата обращения: 10.05.2025).
6. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Биполярные транзисторы мредней и большой мощности низкочастотные. Справочник. В. 4 т. Т. 2. Петухов В. М. Издание второе, исправленное. – М.: ИП РадиоСофт, 2000.-688с: ил.
7. Прянишников, В. А. Электроника: Полный курс лекций. – 4-ое изд. – СПБ: КОРОНА принт, 2004 - 416 с.