

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Курсовой проект по дисциплине
«Аналоговая схемотехника электронных средств» (АСЭС)
Пояснительная записка

Студент гр. 238-1

_____ Михо Р.Б.

22.12.2020

Руководитель

Доцент кафедры КИПР, к.т.н.

_____ Кривин Н.Н

(оценка) 22.12.2020

Реферат

Курсовой проект, 62 с., 40 рис., 8 таблиц, 6 источников литературы, 7 приложений. ТРАНЗИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, РАБОЧАЯ ТОЧКА, ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ЧАСТОТНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ, НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ. Целью курсового проекта является приобретение навыков проектирования деталей, узлов и модулей электронных средств (в данном случае усилители), в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизированного проектирования.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ

УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»(ТУСУР)

Курсовой проект

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий каф. КИПР

_____ Н. Н. Кривин
« 2 » _____ сентября 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на выполнение курсового проекта по дисциплине АСЭС

1. Наименование работы: ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ

Таблица 1. Исходные данные к проекту (вариант № 13):

№	Параметр	Значение	Наименование параметра
1	n-p-n (p-n-p)	n-p-n, n-канал	Тип проводимости транзистора
2	$U_{вхм}$, мВ	250	Амплитудное значение входного напряжения
3	$R_{Г}$, Ом	60	Внутреннее сопротивление источника $U_{вх}$
4	$P_{н}$, Вт	0.0009	Мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку сопротивлением $R_{н}$
5	$R_{н}$, Ом	100	Сопротивление нагрузки
6	$I_{н}$, мА	3	Ток, отдаваемый усилителем в нагрузку сопротивлением $R_{н}$
7	t°_{max} , °C	25	Максимальная рабочая температура
8	$f_{н}$, Гц и $f_{в}$, кГц	100,60	Нижняя и верхняя частота усиливаемого сигнала в полосе Δf
9	$M_{очн}(\omega_{н})$, $M_{осв}(\omega_{в})$	0,94;0,94	Коэффициенты частотных искажений амплитудно-частотной характеристики усилителя, задаваемые при значениях нижней $\omega_{н}=2\pi f_{н}$, и верхней $\omega_{в}=2\pi f_{в}$

2. Оформить проект в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 2013.01[1].

3. Отчёт должен содержать:

3.1. Титульный лист.

3.2. Реферат.

3.3. Техническое задание на работу.

3.4. Содержание.

3.5. Введение. Приводятся краткие сведения о характере работы, целях и задачах, используемых методах и ожидаемых результатах.

3.6. Основная часть пояснительной записки (расчетная).

3.7. Заключение.

3.8. Список использованной литературы и других источников информации.

3.9. Приложения.

4. Рекомендуемая литература:

1. Перепелкин Д. А. Схемотехника усилительных устройств. Учебное пособие для вузов. – 2-е издание. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 238 с.

2. Гурский Д.А., Турбина Е.С. Вычисления в Mathcad 14. - СПб.: Питер, 2006. - 544 с.

3. Аксенов А.И. и др. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Диоды. Транзисторы: Справочник. Радио и связь, 1992. – 224 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1190).

4. Аронов В.А., Баюков А.В. и др. Под общ. ред. Н.Н. Горюнова Полупроводниковые приборы: Транзисторы. П53 Справочник – М.: Энергоиздат, 1982. – 907 с.

5. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. - 464 с.

6. Озеркин Д.В. Общая электротехника и электроника. Часть 2 – Общая электроника. Томск: Томский государственный университет систем управления и радио-электроники, 2012.- 160 с.

7. ОС ТУСУР 01-2013 (СТО 02069326.1.01-2013). Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. Томск ТУСУР, 2013. – 57 с.

Руководитель:

Задание принял к исполнению:

_____ Н.Н. Кривин

_____ Р.Б.Михо

« 2 » сентября 2020 г.

« 2 » сентября 2020 г.

Оглавление

1. Введение	8
2. Теоретическая часть	9
2.1. Биполярный транзистор	9
2.2 Полевой транзистор	10
2.3 Усилительные устройства	11
3. Расчёт схемы транзисторного усилителя	13
3.1 Расчёт оконечного каскада	13
3.1.1 Предварительный выбор рабочей точки	13
3.1.2 Выбор транзистора	14
3.1.3 Построение статической и динамической кривой нагрузки на выходных ВАХ биполярного транзистора	16
3.1.4 Построение входных характеристик транзистора	20
3.1.5 Расчёт элементов фиксации рабочей точки	21
3.1.6 Предварительный расчёт емкостных элементов оконечного каскада	22
3.1.7 Моделирование работы оконечного каскада	23
3.2 Расчёт каскада предварительного усиления	26
3.2.1 Выбор рабочей точки усилительного каскада	26
3.2.2 Выбор транзистора	26
3.2.3 Построение статической кривой нагрузки на стоковых и стоко-затворных ВАХ полевого транзистора	27
3.2.4 Согласование предварительного и оконечного каскада	29
3.2.5 Построение стоко-затворной характеристики	32
3.2.6 Расчёт коэффициента усиления для промежуточного каскада	32
3.2.8 Моделирование работы предварительного каскада	33
3.3 Расчёт трёхкаскадного усилителя	36
3.3.1 Окончательный расчёт конденсаторов схемы	36
3.3.2 Расчёт коэффициента усиления усилителя	36
3.3.3 Расчёт цепи обратной связи усилителя	37
3.3.4 Моделирование работы усилителя	37
3.3.5 Оптимизация схемы усилителя	40
3.3.6 Подбор элементов для усилителя	45
Заключение	48
Список используемой литературы	49
Приложение А (обязательное)	50
Приложение Б (Обязательное)	52
Приложение В (Обязательное)	54
Приложение Г (Обязательное)	55

Приложение Д (Обязательное).....	56
Приложение Е (Обязательное)	57
Приложение Ж (Обязательное)	62

1.Введение

В современной электронной промышленности используются электронные средства, способные преобразовывать электрические сигналы и энергию. Основным элементом в усилительной технике является транзистор способный усиливать сигнал, проходящий через него.

Электронные усилители обладают возможностью многократно усиливать входной сигнал без искажения его формы и частотного спектра. Усиление сигнала происходит за счёт источника питания, входящего в схему усилителя.

Целью курсового проекта является приобретение навыков проектирования деталей, узлов и модулей электронных средств (в данном случае усилителей), в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизированного проектирования.

2. Теоретическая часть.

2.1. Биполярный транзистор

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий 3-х слойную полупроводниковую структуру с чередующимися типами слоёв. Биполярный транзистор имеет два распространённых типа чередования слоёв – p-n-p и n-p-n структуры.

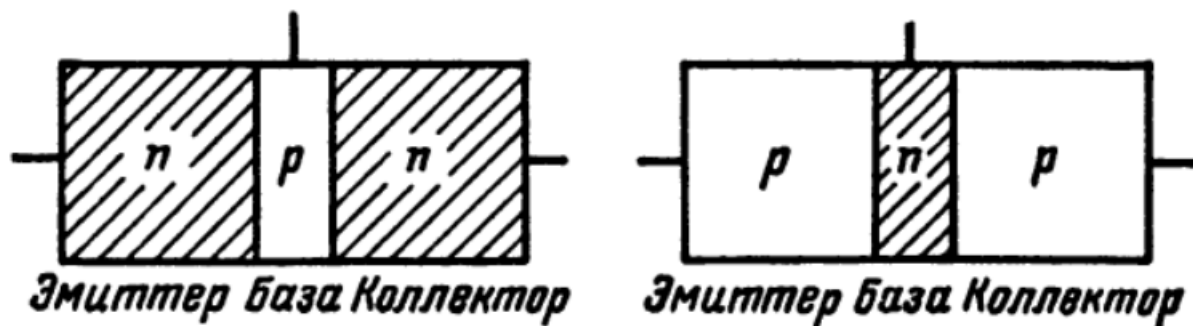


Рисунок 2.1. – Структура биполярного транзистора разных типов.

У биполярного транзистора существует 4 режима работы:

- 1 – Режим отсечки;
- 2 – Режим насыщения;
- 3 – Активный режим;
- 4 – Инверсный режим.

Режим отсечки: Ионы базы препятствуют движению дырок из эмиттера в коллектор. Оба p-n перехода смещены в обратном направлении, т.е. закрыты. Ток в базе практически не течёт. Транзистор работает в режиме отсечки.

Режим насыщения: Через транзистор протекает максимальный ток коллектора, но он не управляется. Значение тока, протекающего через транзистор, зависит лишь от величины питающего напряжения и величины нагрузки в коллекторной цепи. Входной сигнал не усиливается, поскольку коллекторный ток не воспринимает изменений тока базы. Транзистор работает в режиме насыщения.

Активный режим: В данном режиме работы эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный в обратном. Транзистор хорошо управляется и способен усиливать сигнал. Данный режим является основным режимом работы для биполярного транзистора.

Инверсный режим: Полностью противоположен активному режиму. Эмиттерный переход смещён в обратном направлении, а коллекторный в прямом. Однако такой режим тоже может использоваться для усиления, но из-за конструктивных различий между областями коллектора и эмиттера, поэтому усилительные свойства гораздо хуже. Практически не используется в схемах усиления.

Различают три схемы включения биполярных транзисторов:

1. Схема с общей базой;
2. Схема с общим эмиттером;
3. Схема с общим коллектором.

В схеме с общей базой усиливается только напряжение (повторитель тока).

В схеме с общим эмиттером усиливается и ток и напряжение.

В схеме с общим коллектором усиливается только ток. Альтернативное название – эмиттерный повторитель.

На практике основной схемой является схема с общим эмиттером, т.к. она даёт самое большое усиление по мощности.

2.2 Полевой транзистор

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, управляемый электрическим полем. Управление полевым транзистором происходит при помощи входного напряжения, а не входного тока, как это делается в биполярном транзисторе.

Полевые транзисторы делятся на две большие группы:

1. Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом
2. Полевые транзисторы с изолированным затвором, они же МОП-транзисторы, или МДП-транзисторы.

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом – это полевой транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала р-п-переходом, смещенным в обратном направлении.

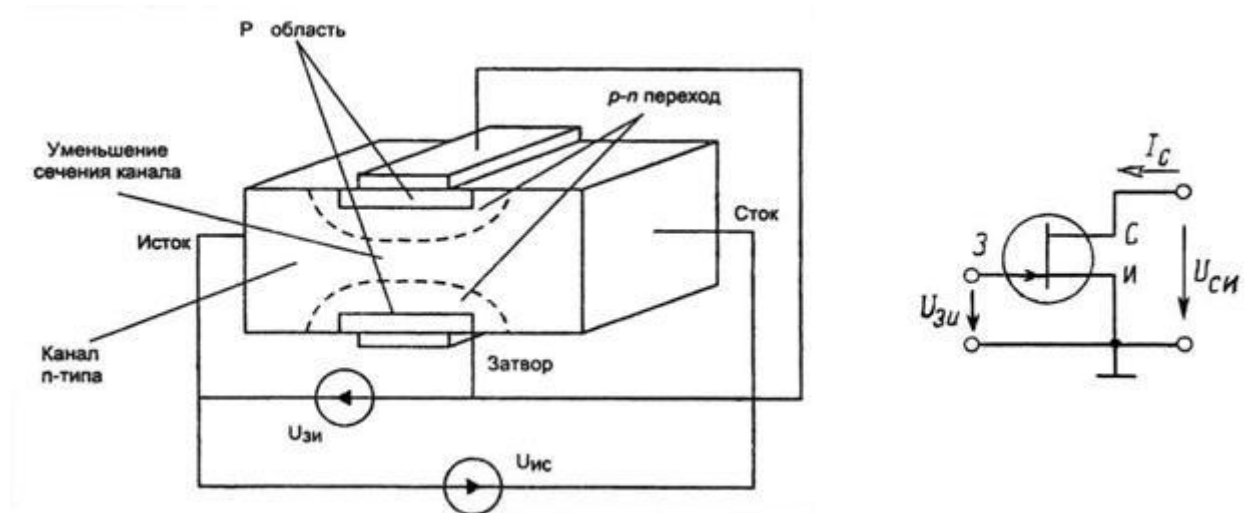


Рисунок 2.2 – Полевой транзистор с управляющим р-п переходом

Поскольку входное сопротивление полевого транзистора достаточно высоко, то входной ток и мощность, потребляемые от источника входного сигнала практически равны нулю.

2.3 Усилительные устройства

Электронный усилитель – это устройство, способное усиливать электрическую мощность.

Усилитель имеют множество классификаций, по которым их можно разделить.

1. По частотному диапазону усиливаемых сигналов:

- Усилитель низкой частоты;
- Усилитель средней частоты;
- Усилитель высокой частоты;

2. По типу связи:

- С гальванической связью;
- С резистивно-ёмкостной связью;
- С трансформаторной связью;

3. По местоположению в многокаскадных усилителях

- Предварительные;
- Оконечные;
- Буферные;

4. По соотношению между выходным и входным сопротивлением:

- Выходное сопротивление больше входного (схема с ОБ);
- Выходное сопротивление меньше входного (схема с ОК);
- Выходное сопротивление согласовано с входным (схема с ОЭ).

У каждого усилительного устройства существуют основные параметры, по которым можно оценить работу всех каскадов или каждого по отдельности. В основном эти параметры зависят не только от транзисторов, но и от правильно подобранных резисторов и конденсаторов для согласования каскадов и термостабилизации.

Коэффициент передачи – это отношение выходного сигнала к входному. В усилительных устройствах его называют коэффициентом усиления. Стоит заметить, что существует три коэффициента усиления: усиление по напряжению, усилению по току и усилению по мощности. Коэффициент усиления по мощности состоит из коэффициента усиления по току и напряжению.

Также немаловажными характеристиками для усилительного устройства являются амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики. Исходя из этих характеристик можно судить о амплитудном значении сигнала с увеличением частоты и разности фаз входного и выходного сигналов.

Нелинейные искажения – это искажения сигнала при прохождении его через нелинейные элементы. На выходе в сигнале всегда присутствуют дополнительные частотные составляющие.

3.Расчёт схемы транзисторного усилителя

3.1 Расчёт оконечного каскада

Для вычисления действующего значения напряжения, воспользуемся формулой (3.1)

$$U_H = I_H \cdot R_H, \quad (3.1)$$

где U_H – действующее значение напряжения на нагрузке;

I_H – ток, протекающий через нагрузку;

R_H – сопротивление нагрузки.

$$U_H = I_H \cdot R_H = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,3 \text{ В}$$

Амплитудные значения тока и напряжения вычисляются по формулам (3.2) и (3.3)

$$I_{Hm} = \sqrt{2} \cdot I_H \quad (3.2)$$

$$U_{Hm} = \sqrt{2} \cdot U_H \quad (3.3)$$

$$I_{Hm} = \sqrt{2} \cdot I_H = \sqrt{2} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \approx 4,24 \text{ мА}$$

$$U_{Hm} = \sqrt{2} \cdot U_H = \sqrt{2} \cdot 0,3 \approx 0,42 \text{ В}$$

3.1.1 Предварительный выбор рабочей точки

Выбор рабочей точки транзистора сводится к поиску тока коллектора покоя и напряжения коллектора эмиттер покоя[2].

Для режима работа усилителя в классе А, координаты рабочей точки должны удовлетворять следующим условиям:

$$U_{КЭА} \geq |U_{Hm} + U_{КЭmin}|, \quad (3.4)$$

$$I_{КА} \geq \frac{I_{Hm}}{K_3}, \quad (3.5)$$

$$U_{СИА} \geq |U_{Hm} + U_{СИmin}|, \quad (3.6)$$

$$I_{СА} \geq \frac{I_{Hm}}{K_3}, \quad (3.7)$$

где U_{Hm} – напряжение коллектор эмиттер рабочей точки ;

$U_{КЭmin}$ ($U_{СИmin}$)– напряжение на коллекторе (стоке), соответствующее началу квазигоризонтального участка выходных ВАХ;

$I_{КА}$ – ток коллектора рабочей точки ;

K_3 – коэффициент запаса (0,7 ÷ 0,95);

I_{CA} – ток стока рабочей точки;

$U_{CиA}$ – напряжение сток-исток рабочей точки .

Формулы (3.4) и (3.5) справедливы для каскадов на БТ, а формулы (3.6) и (3.7) для каскадов на ПТ.

Для маломощных транзисторов напряжение насыщения следует принять

$$|U_{KЭmin}| = |U_{Cиmin}| = 1...2,5 \text{ В};$$

Для мощных транзисторов $|U_{KЭmin}| = |U_{Cиmin}| = 2.5 ... 4 \text{ В}$.

Для каскадов с общим эмиттером и общим истоком, работающих в классе А, напряжения $U_{KЭA}$ и $U_{CиA}$ связаны с напряжением питания следующими соотношениями:

$$E_{\pi} \geq 2 * U_{KЭA} \quad (3.8)$$

$$E_{\pi} \geq 2 * U_{CиA} \quad (3.9)$$

Формула (3.8) справедлива для схемы с общим эмиттером, (3.9) с общим истоком.

По (3.4) и (3.5) рассчитываем координаты рабочей точки:

$$U_{KЭA} = |U_{Hm} + U_{KЭmin}| = 0,42 + 1 = 1,42 \text{ В}$$

$$I_{KA} = \frac{I_{Hm}}{K_3} = \frac{4,24 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 6,06 \text{ мА}$$

Согласно (3.7) определяем напряжение питания:

$$E_{\pi} \geq 2 * U_{KЭA} = 2 * 1,42 = 2,84 \text{ В}$$

Полученное значение округляется в большую сторону с учётом ближайшего напряжения питания.

Согласно [3], ближайшее напряжение питания является $E_{\pi} = 3 \text{ В}$.

3.1.2 Выбор транзистора

Для того, чтобы выбрать подходящий транзистор, требуется оценить максимальную мощность, выделяющуюся на коллекторе:

$$P_K = U_{KЭA} * I_{KA} = 1,42 * 6,06 * 10^{-3} = 8,6 \text{ мВт}$$

Для выбора транзистора следует руководствоваться условиями из таблицы 3.1

Таблица 3.1 – Критерии выбора транзистора

Рассчитанные значения	Условие выбора	Предельно допустимые значения из справочника
Мощность, выделяемая на коллекторе транзистора	$<$	Максимальная мощность коллектора транзистора
Напряжение питания	$<$	Максимальное напряжение на коллектор-эмиттер
Максимальный ток коллектора $I_{Kmax} = 2 * I_{KA}$	$<$	Максимальный ток коллектора
$f_{max} = 10 * f_B$	$<$	Граничная частота
Тип проводимости		n-p-n

С учётом полученных данных и данных из технического задания, определим требуемый транзистор с помощью классификаций.[2]

Выбранный транзистор должен быть n-p-n проводимости, малой мощности, и работать в области низких частот.

Используя вышеперечисленные критерии, был выбран транзистор BC846, отечественным аналогом которого является КТ230А9.

В таблице 3.2 приведено сравнение параметров транзистора с рассчитанными.

Таблица 3.2 – Расчётные параметры и параметры транзистора

Параметр	Рассчитанный параметр	Параметр транзистора
Мощность, выделяющаяся на коллекторе	8,6 мВт	0,25 Вт
Напряжение коллектор – эмиттер	3 В	65 В
Ток коллектора	12,12 мА	100 мА
Граничная частота передачи	600 кГц	100 МГц
Структура	n-p-n	

3.1.3 Построение статической и динамической кривой нагрузки на выходных ВАХ биполярного транзистора

Для моделирования процесса и построения ВАХ транзистора используется пакет программного обеспечения MicroCap 12. Анализ проводится при постоянном токе. Схема для анализа представлена на рисунке 3.1

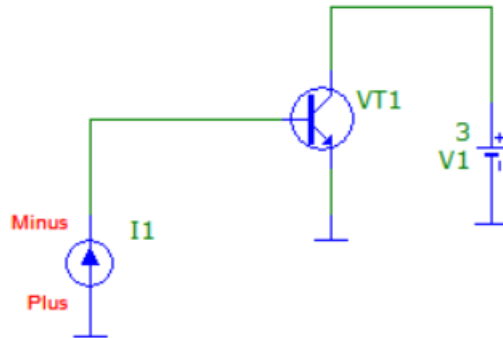


Рисунок 3.1 – Схема для снятия выходных ВАХ транзистора

Для построения статической линии нагрузки, на выходные ВАХ наносятся две точки. В данном случае для статической линии первой точкой является ток короткого замыкания транзистора, при котором $U_{кэ} = 0$, а $I_k = \frac{E_{п}}{R_{общ}}$. Второй точкой будет режим холостого хода при $U_{кэ} = E_{п}$, а $I_k = 0$.

Для динамической линии нагрузки первая точка рассчитывается аналогично статическому режиму, а режим холостого хода с учётом параметров рабочей точки.

По формуле (3.11) рассчитывается ток коллектора в режиме короткого замыкания транзистора.

$$I_k = \frac{E_{п}}{R_{общ}} \quad , \quad (3.11)$$

Где, I_k – ток коллектора в режиме короткого замыкания;

$R_{общ} = R_{э} + R_{к}$ – сопротивление при статическом режиме работы;

Расчёт сопротивлений для эмиттерной и коллекторной цепи выполняется по формулам (3.12) и (3.13)

$$R_k = \frac{E_{п} - U_{кэА}}{I_{кА}} \quad (3.12)$$

Для хорошей термостабилизации требуется принять сопротивление в эмиттерной цепи следующим:

$$R_э = (0,1 \dots 0,3) * R_к \quad (3.13)$$

$$R_к = \frac{E_п - U_{кэА}}{I_{кА}} = \frac{3 - 1,42}{6,06 * 10^{-3}} = 261 \text{ Ом}$$

$$R_э = 0,1 * 261 = 26,1 \text{ Ом}$$

По формуле (3.11) рассчитываем ток коллектора короткого замыкания для статической линии нагрузки:

$$I_к = \frac{E_п}{R_{общ}} = \frac{3}{261 + 26,1} = 10,4 \text{ мА} - \text{для статической линии нагрузки}$$

Далее идёт построение уравнения прямой, проходящей через 2 точки. Сразу определим координаты точек для статической линии:

Для статической линии:

Точка С = (0 В ; 10,4 мА);

Точка В = (3В ; 0 мА).

Уравнение прямой строится по формуле (3.14):

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} \quad (3.14)$$

Подставив координаты точек и сделав преобразования, получаем 2 уравнения для линии нагрузки:

$$y = \frac{-10,4 * 10^{-3} * x}{3} + 10,4 * 10^{-3}$$

Где y – ток коллектора;

x – напряжение коллектор-эмиттер.

Для нанесения динамической линии нагрузки рассчитываем параллельное сопротивление резистора в коллекторной цепи с нагрузочным резистором:

$$R_{общ} = \frac{R_к * R_н}{R_к + R_н} = \frac{261 * 100}{261 + 100} = 72,2 \text{ Ом}$$

По формуле (3.15) определяем угол φ :

$$\varphi = \text{arcctg} \left(\frac{R_{общ}}{R_к} \right) = \text{arcctg} \left(\frac{72,2}{50} \right) = 34,7^\circ \quad (3.15)$$

Под полученным углом строим прямую, проходящую через точку, пересекающуюся со статической линией нагрузки.

На рисунке 3.2 представлены выходные ВАХ с нанесёнными линиями статической и динамической нагрузки.

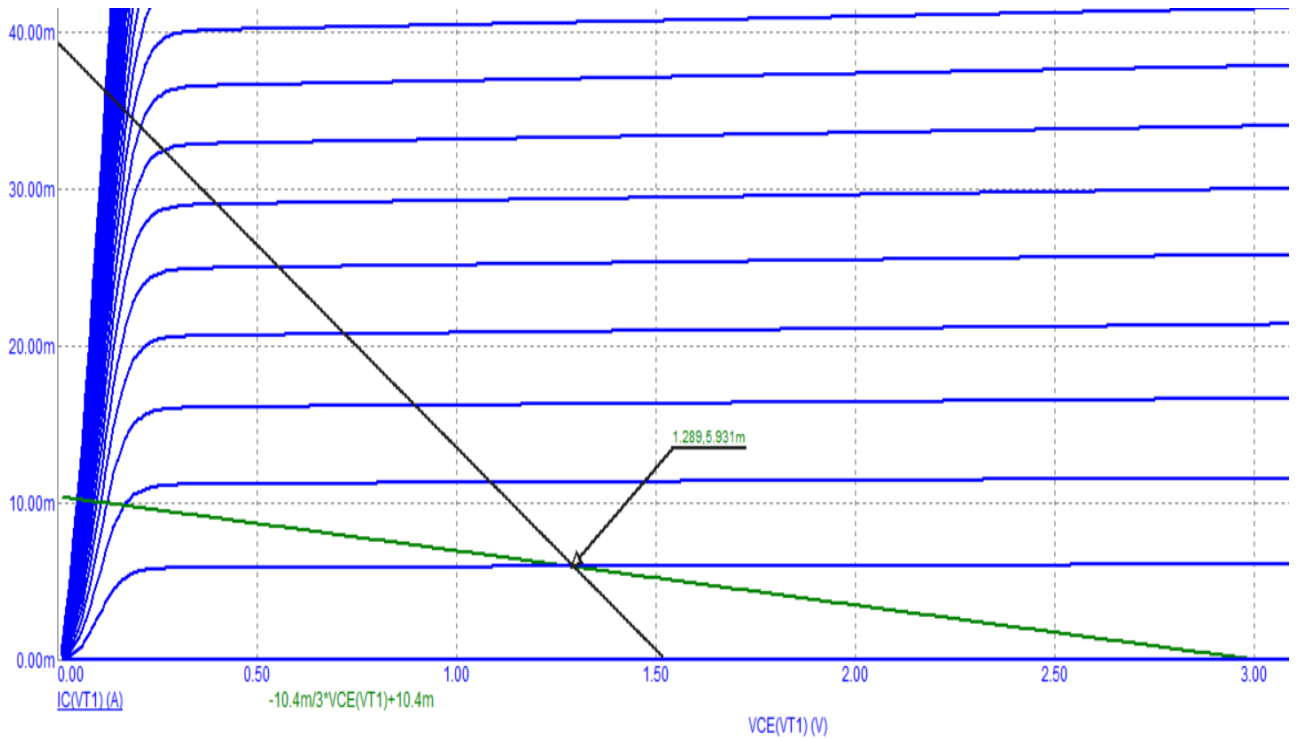


Рисунок 3.2 – Статическая и динамическая линии нагрузки на выходных ВАХ
Уточним положение рабочей точки при $I_K = I_{KA}$, $U_{КЭА} = 1,289$ В.

Для режима работы усилителя в классе А[4], должны соблюдаться следующие условия:

$$U_{КЭ \max} \geq U_{КЭА} + U_{Hm} \quad (3.16)$$

$$U_{КЭ \min} \leq U_{КЭА} - U_{Hm} \quad (3.17)$$

В нашем случае:

$$U_{КЭ \max} \geq U_{КЭА} + U_{Hm} \geq 1,289 + 0,42 \geq 1,709 \text{ В}$$

$$U_{КЭ \min} \leq U_{КЭА} - U_{Hm} \leq 1,289 - 0,42 \leq 0,869 \text{ В}$$

На рисунке 3.2 $U_{КЭ \max} = 1,51$ В, из этого следует, что необходимо перенести рабочую точку в область большего напряжения.

Выберем новые координаты рабочей точки $A = (2 \text{ В}; 44,44 \text{ мА})$. Исходя из ряда источников питания примем новое значение, равное $E_{\Pi} = 5,6$ В.

Рассчитываем заново новые сопротивления коллекторной и эмиттерной цепи и ток короткого замыкания для статической линии нагрузки:

$$R_K = \frac{5,6 - 2}{44,44 \cdot 10^{-3}} = 81 \text{ Ом}$$

$$R_э = 0,1 \cdot 81 = 8,1 \text{ Ом}$$

$$I_k = \frac{5,6}{81 + 8,1} = 62,3 \text{ мА}$$

Новое уравнение для статической линии нагрузки:

$$y = \frac{-62,3 \cdot 10^{-3} \cdot x}{5,6} + 62,3 \cdot 10^{-3}$$

Новое общее сопротивление для динамической линии

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_k * R_H}{R_k + R_H} = \frac{81 * 100}{81 + 100} \approx 45 \text{ Ом}$$

Угол φ' :

$$\varphi' = \text{arcctg} \left(\frac{R_{\text{общ}}}{K} \right) = \text{arcctg} \left(\frac{45}{50} \right) = 48^\circ$$

На рисунке 3.3 представлены новые статическая и динамическая линии и координаты рабочей точки.

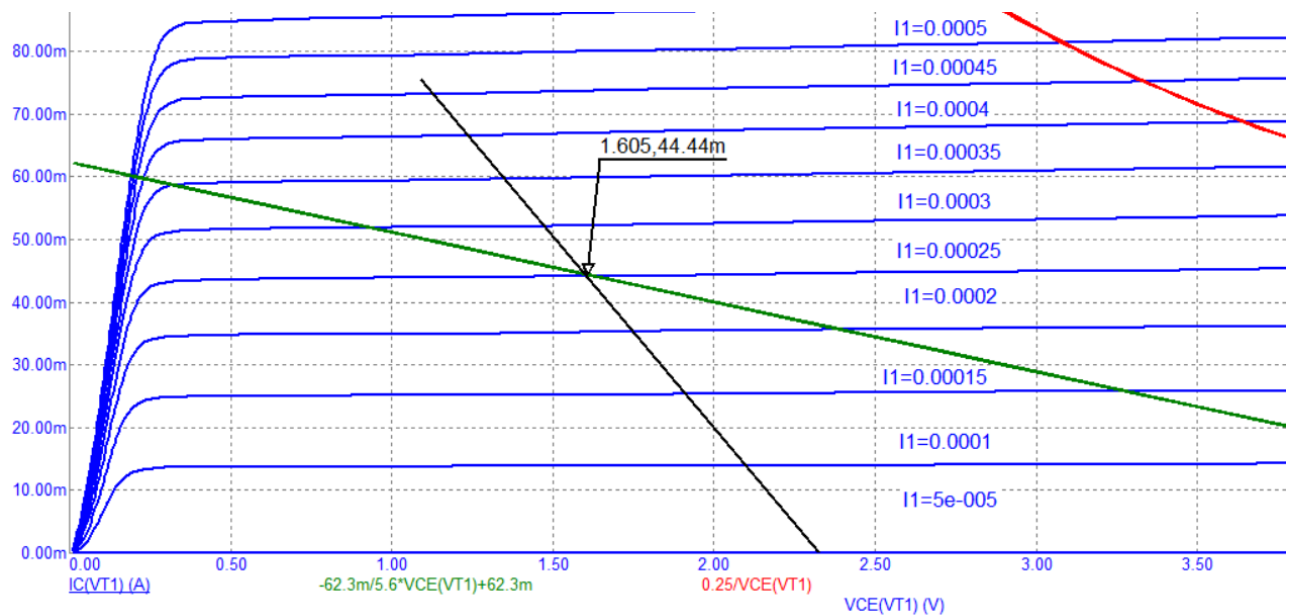


Рисунок 3.3 – Новая статическая и динамическая прямая с координатой РТ (красная линия – линия допустимой мощности)

Исходя из графика, рабочая точка сместилась по напряжению на 0,4В.

Рассмотрим новые условия соблюдения режима работы:

$$U_{KЭ \max} \geq U_{KЭА} + U_{Hm} \geq 1,605 + 0,42 \geq 2,025 \text{ В}$$

$$U_{KЭ \min} \leq U_{KЭА} - U_{Hm} \leq 1,605 - 0,42 \leq 1,185 \text{ В}$$

На графике $U_{KЭ \max} = 2,315 \text{ В}$, что соответствует условиям (3.16) и (3.17).

Воспользуемся рисунком 3.4 для расчёта коэффициента усиления по току, где предварительно нанесены метки для расчёта h -параметров.

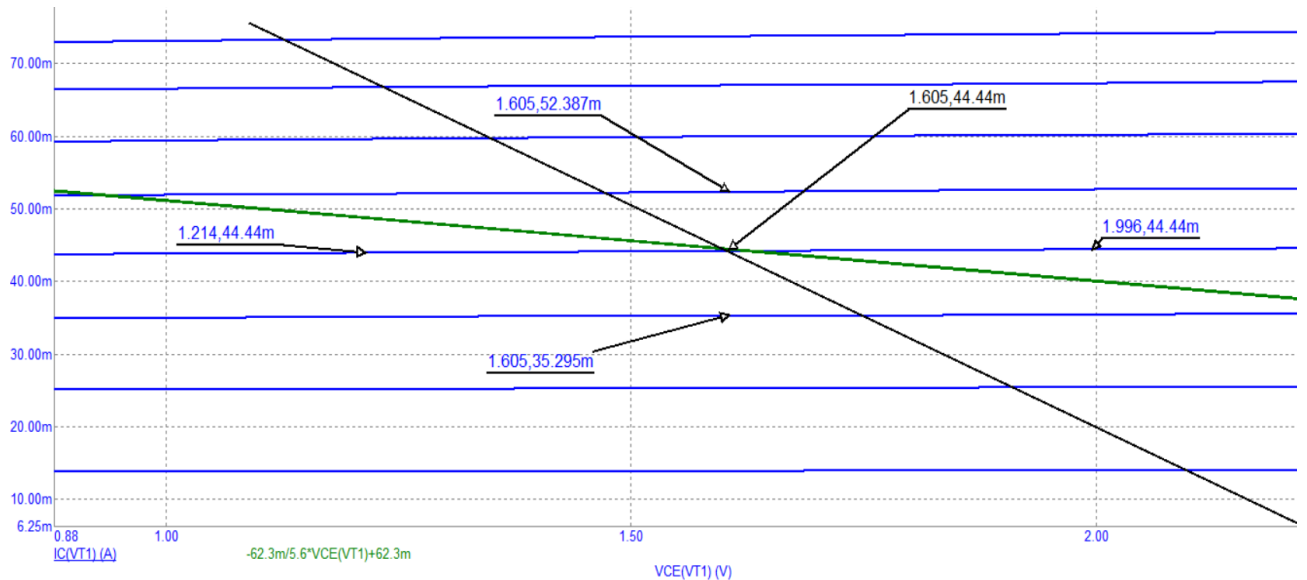


Рисунок 3.4 – График для определения h-параметров

Находим h_{22} (выходная проводимость) и h_{21} (коэффициент передачи тока):

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{(52,387 - 35,295) \cdot 10^{-3}}{1,996 - 1,214} = 21,85 \text{ мСм}$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} = \frac{(52,387 - 35,295) \cdot 10^{-3}}{(0,25 - 0,15) \cdot 10^{-3}} = 171$$

3.1.4 Построение входных характеристик транзистора

Для построения входных характеристик транзистора и определения h-параметров смоделируем схему как на рисунке 3.5

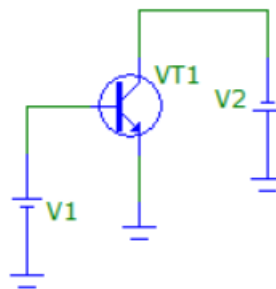


Рисунок 3.5 – Схема для снятия входных ВАХ транзистора

Воспользуемся рисунком 3.3 для определения тока базы. Согласно графику, $I_Б = 200 \text{ мкА}$. Отметим на входной характеристике $U_{КЭmax}$ и $U_{КЭmin}$, используя всё тот же график.

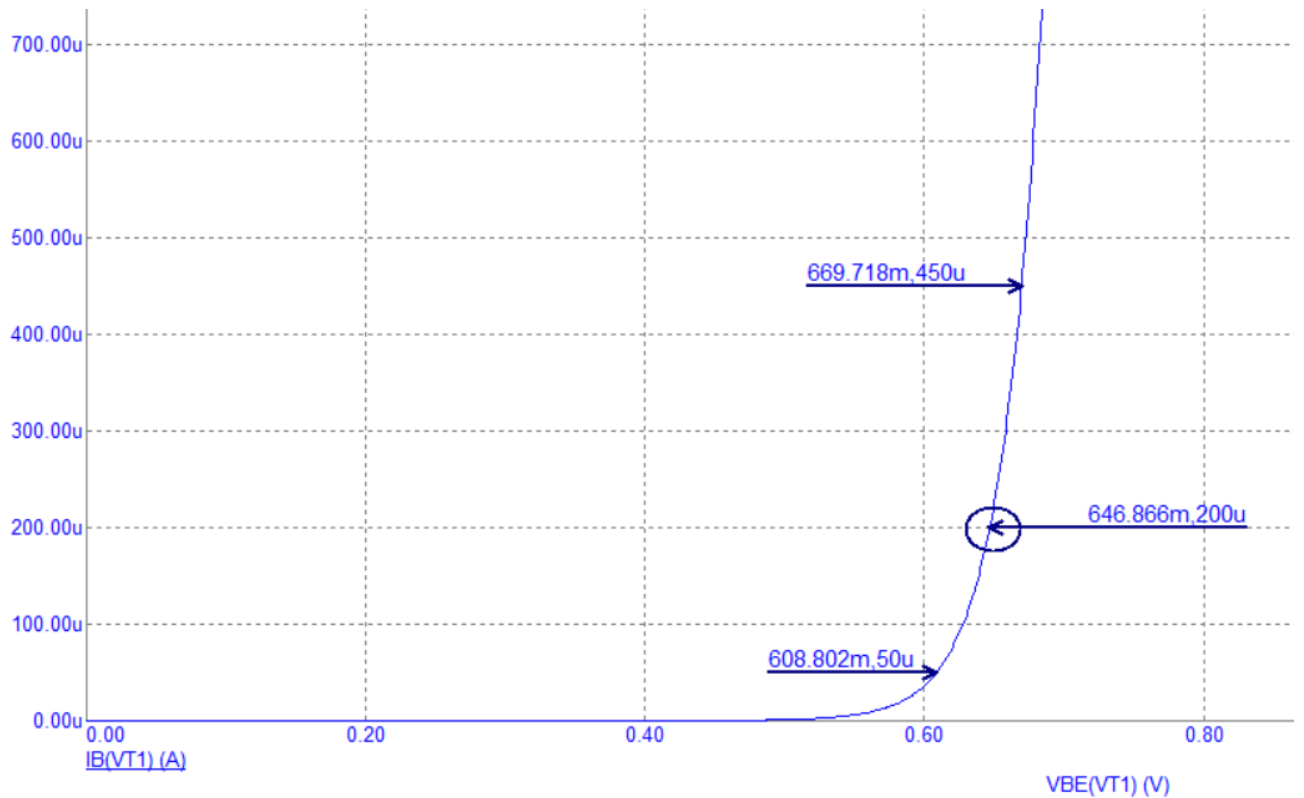


Рисунок 3.6 – Входная характеристика биполярного транзистора с отмеченной рабочей точкой

При помощи отмеченных точек, рассчитаем входное сопротивление транзистора по формуле (3.18):

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б}, \quad (3.18)$$

Где $\Delta U_{бэ}$ – разница напряжений база-эмиттер;

$\Delta I_б$ – разница токов базы.

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} = \frac{(669,7 - 608,8) \cdot 10^{-3}}{(450 - 50) \cdot 10^{-6}} = 152,3 \text{ Ом}$$

Напряжение база-эмиттер в рабочей точке А $U_{БЭА} = 647 \text{ мВ}$.

3.1.5 Расчёт элементов фиксации рабочей точки

Фиксация рабочей точки осуществляется при помощи резистивных делителей для каскада на БТ по формулам (3.19) и (3.20).

$$R_2 = \frac{U_{БЭА} + I_{ЭА} \cdot R_э}{I_Д}, \quad (3.19)$$

Где R_2 – нижнее плечо делителя;

$I_{ЭА} = I_{БА} + I_{КА}$ – ток эмиттера в рабочей точке А;

$I_D = (5 \div 10) \cdot I_{BA}$ – ток делителя.

$$R_1 = \frac{E_{II} + I_D \cdot R_2}{I_D + I_{BA}} \quad (3.20)$$

$$I_{ЭА} = I_{BA} + I_{KA} = 200 \cdot 10^{-6} + 44 \cdot 10^{-3} = 44,2 \text{ мА}$$

$$I_D = 10 \cdot I_{BA} = 10 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 2 \text{ мА}$$

$$R_2 = \frac{U_{БЭА} + I_{ЭА} \cdot R_3}{I_D} = \frac{0,647 + 44,2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,1}{2 \cdot 10^{-3}} = 503 \text{ Ом}$$

$$R_1 = \frac{E_{II} - I_D \cdot R_2}{I_D + I_{BA}} = \frac{5,6 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 503}{2 \cdot 10^{-3} + 200 \cdot 10^{-6}} = 2088 \text{ Ом}$$

Общее выражение для расчёта коэффициента усиления по напряжению выглядит так:

$$K_U = \left| -\beta \frac{R_K \parallel R_H}{\left(\frac{h_{11}}{R_6} + 1 \right) \cdot R_{\Gamma} + h_{11}} \right|, \quad (3.21)$$

Где, R_{Γ} – сопротивление предыдущего каскада (в данном случае $R_{\Gamma} = R_K$)

$R_6 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ – параллельное сопротивление делителя.

$$K_U = \left| -\beta \frac{R_K \parallel R_H}{\left(\frac{h_{11}}{R_6} + 1 \right) \cdot R_{\Gamma} + h_{11}} \right| = \left| -171 \cdot \frac{45}{\left(\frac{152,3}{\frac{503 \cdot 2088}{503 + 2088}} + 1 \right) \cdot 81 + 152,3} \right| = 29,17$$

3.1.6 Предварительный расчёт емкостных элементов окончного каскада

Ёмкости конденсаторов C_1 и C_2 рассчитываются по формулам (3.23) и (3.24):

$$C_1 \geq \frac{1}{\omega_H(R_{\Gamma} + R_{BX})} \quad (3.23)$$

$$C_2 \geq \frac{1}{\omega_H(R_K + R_H)} \quad (3.24)$$

Для конденсатора в эмиттерной цепи воспользуемся (3.25):

$$C_3 = \frac{3 \cdot h_{21}}{\omega_H \cdot h_{11}} \quad (3.25)$$

$$C_1 \geq \frac{1}{\omega_H(R_{\Gamma} + R_{BX})} \geq \frac{1}{100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (81 + 111)} \geq 8,29 \text{ мкФ}$$

$$C_2 \geq \frac{1}{\omega_H(R_K + R_H)} \geq \frac{1}{100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (81 + 100)} \geq 8,8 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = \frac{3 \cdot h_{21}}{\omega_H \cdot h_{11}} = \frac{3 \cdot 201}{100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 152,3} = 6301 \text{ мкФ}$$

3.1.7 Моделирование работы оконечного каскада

Рассчитав основные элементы для оконечного каскада, смоделируем его работу в системе автоматизированного проектирования Microcap. Для оценки работы требуется провести основные виды анализов: амплитудно-временной, частотный, , а также провести анализ токов и напряжений в узлах схемы.

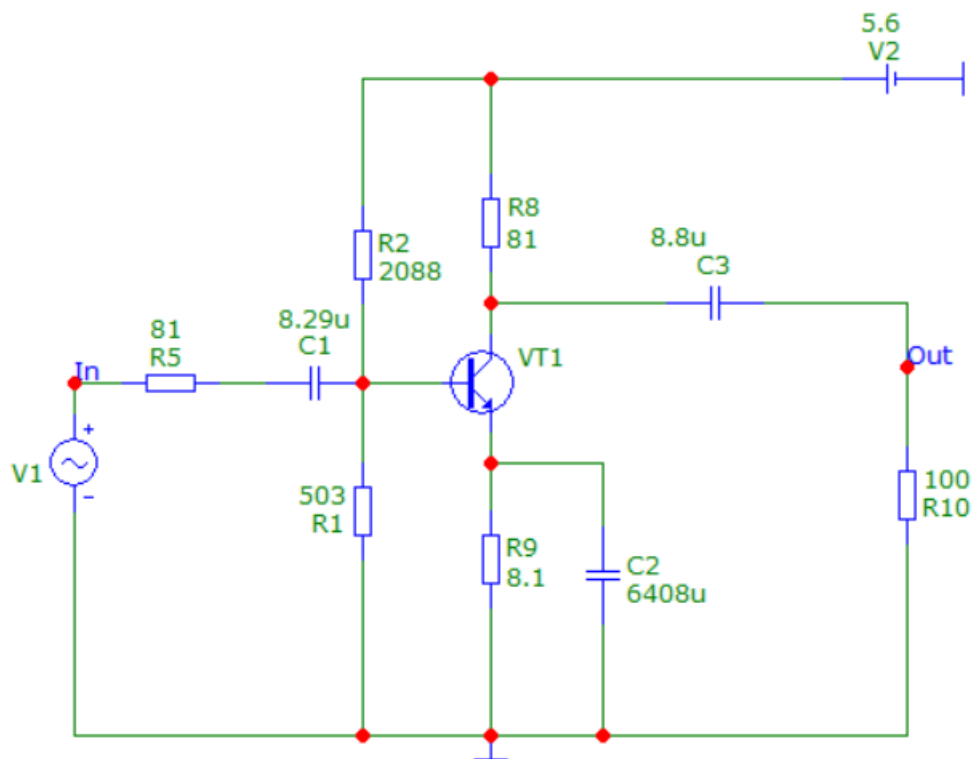


Рисунок 3.7 - Схема оконечного каскада для моделирования

Стоит заметить, что резистор R_5 заменяет по условию выходное сопротивление полевого транзистора в каскаде предварительного усиления, но поскольку его моделирование ещё не было произведено, мы берём численное значение, равное резистору в коллекторной цепи оконечного каскада, полагая, что выходное сопротивление и R_K одного порядка.

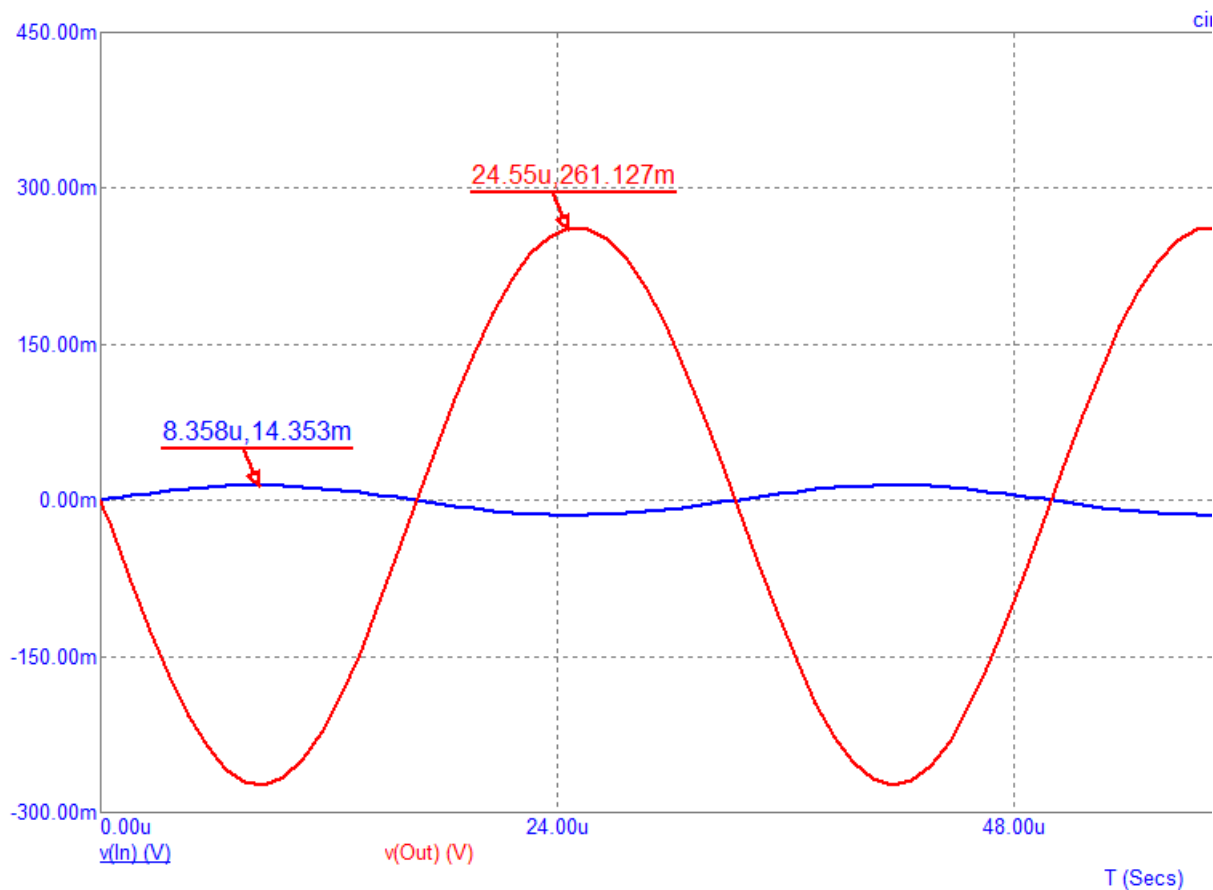


Рисунок 3.8 – Амплитудно-временная характеристика

Для того, чтобы оценить корректность графика на рис.(3.8), вспомним, что схема с ОЭ инвертирует выходное напряжение, т.е. поворачивает его на 180° .

Моделирование в частотной области будем проводить при граничной частоте в $f_v = 60$ кГц (указано в п. 3.1.2). Минимальное значение частоты $f_{min} = 1$ Гц.

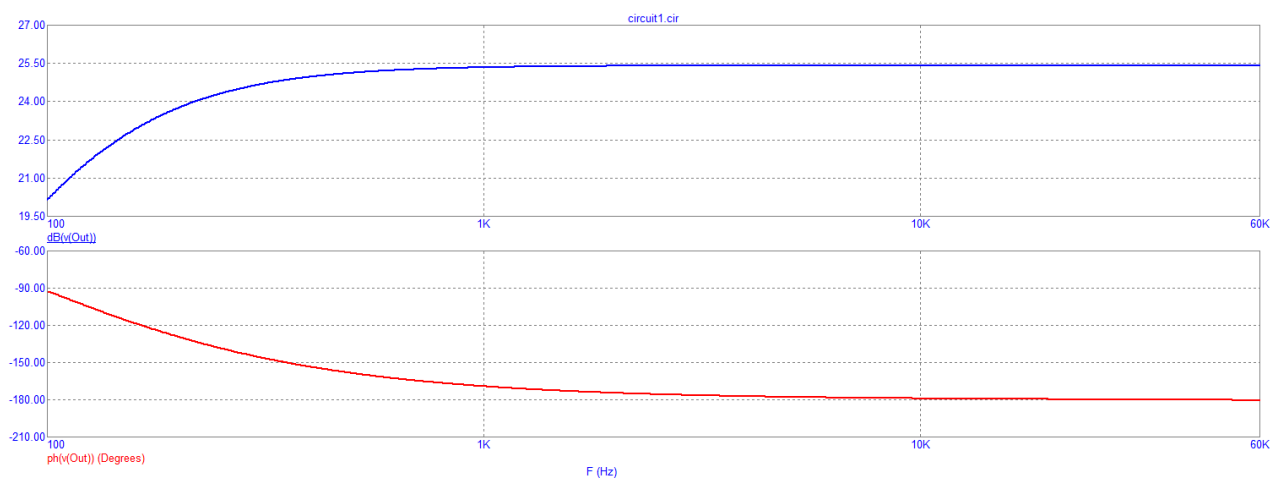


Рисунок 3.9 – Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

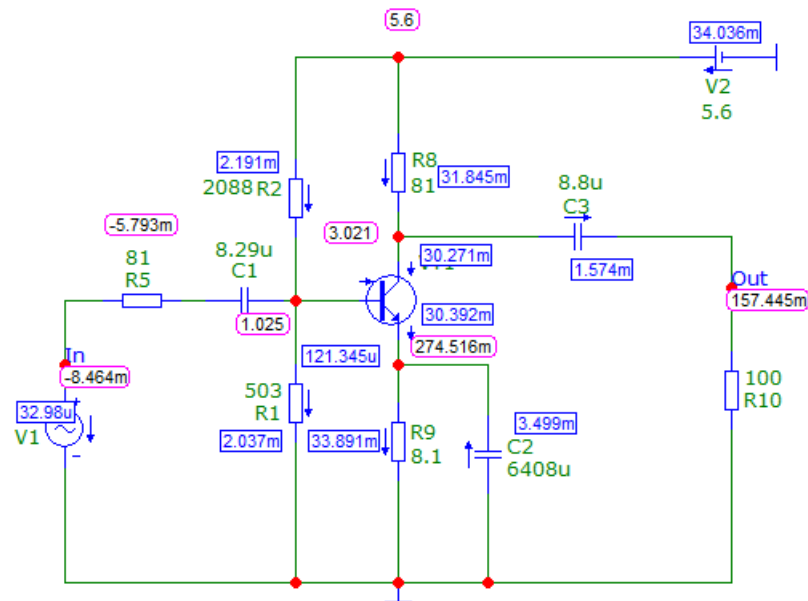


Рисунок 3.10 – Распределение токов и напряжений в узлах и на элементах схемы

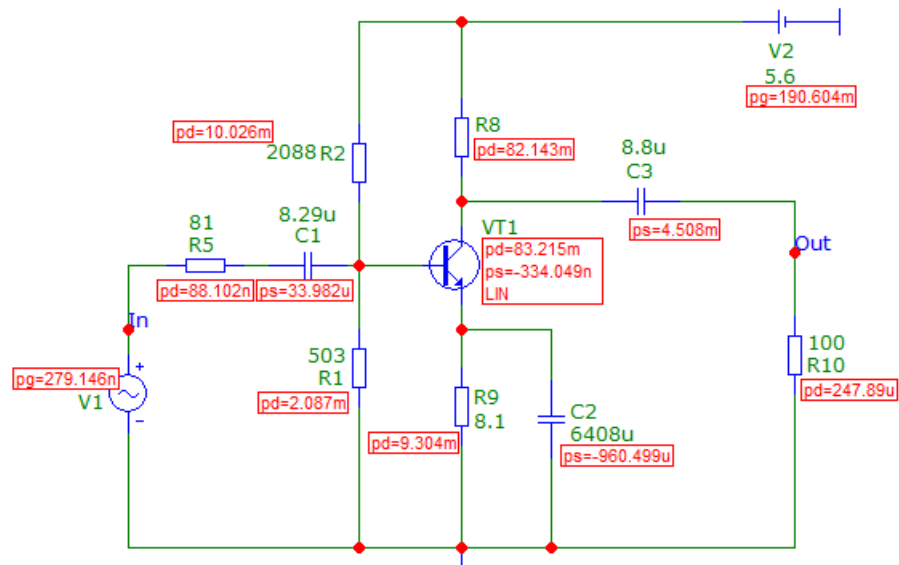


Рисунок 3.11 – Распределение мощностей в схеме и состояние транзистора в режиме усиления

Исходя из графика на рисунке 3.2 видно, что полученный коэффициент усиления не соответствует теоретическому. Следовательно, требования ТЗ не удовлетворяются. В дальнейшем будет произведена ручная регулировка номиналов схемы.

$$K_U = 29,17$$

$$K_{U\text{получ}} = 18,26$$

3.2 Расчёт каскада предварительного усиления

3.2.1 Выбор рабочей точки усилительного каскада

Каскад предварительного усиления будет состоять из транзистора по схеме с общим истоком. Расчёт рабочей точки полевого транзистора будет аналогичен алгоритму для биполярного в пункте (3.1.1). Также предполагаем, что на выходе каскада будет стоять сопротивление нагрузки.

По (3.1) и (3.2) рассчитываем значения для рабочей точки:

$$U_{Hm} = U_H \cdot \sqrt{2} = 0,3 \cdot \sqrt{2} = 0,42 \text{ В}$$

$$I_{Hm} = I_H \cdot \sqrt{2} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2} = 4,24 \text{ мА}$$

Из (3.6) и (3.7) выбираем условия для тока стока и напряжения сток-исток:

$$U_{CиА} = 0,42 + 2 = 2,42 \text{ В}$$

$$I_{CA} = \frac{4,24 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 5,3 \text{ мА}$$

Выбираем напряжения источника питания по формуле (3.9):

$$E_{\Pi} = 2 \cdot U_{CиА} = 2 \cdot 2,42 = 4,84 \text{ В}$$

Исходя из расчётов, ближайшее значение $E_{\Pi} = 5,6 \text{ В}$

3.2.2 Выбор транзистора

Для выбора транзистора необходимо оценить выделяющуюся мощность при его работе.

$$P = U_{CиА} \cdot I_{CA} = 2,42 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3} = 12,8 \text{ мВт}$$

Таблица 3.4 – Условия выбора полевого транзистора

Рассчитанные значения	Условие выбора	Предельно допустимые значения из справочника
Мощность, выделяемая на транзисторе	<	Максимальная мощность транзистора

Продолжение таблицы 3.4

Напряжение питания	<	Максимальное напряжение на сток-исток
Напряжение затвор-исток	>	Напряжение пробоя затвор-исток
Максимальный ток стока $I_{Cmax} = 2 \cdot I_{CA}$	<	Максимальный ток стока
Тип канала		n-тип

Исходя из критериев выбора, указанных в таблице 3.4, был выбран полевой транзистор SST4416, ближайшим аналогом будет КП302.

Таблица 3.5 Характеристики полевого транзистора SST4416

Параметры	Рассчитанный параметр	Параметр транзистора
Мощность транзистора	12,8 мВт	0,35 Вт
Напряжение сток-исток	4,84 В	30 В
Напряжение затвор-исток	-	- 30 В
Ток стока	10,6 Ма	15 мА
Тип канала	n-канал	n-канал

3.2.3 Построение статической кривой нагрузки на стоковых и стоко-затворных ВАХ полевого транзистора

Построение выходных ВАХ полевого транзистора будет проводиться при постоянном токе. Отличие от выходных ВАХ биполярного транзистора лишь в том, что прикладываемое напряжение на вход полевого транзистора будет отрицательным, поскольку у нас n-канал. На рисунке 3.12 изображена схема подключения полевого транзистора для снятия выходных ВАХ.

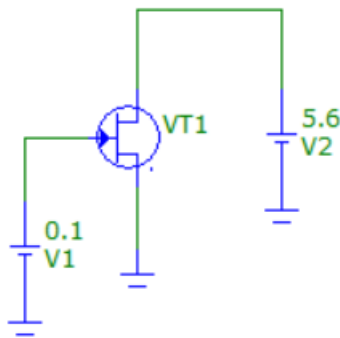


Рисунок 3.12 – Схема для снятия стоковых ВАХ транзистора

Первоначально рассчитаем сопротивления стока и истока в цепи транзистора по формулам (3.26) и (3.27):

$$R_c = \frac{E_{\pi} - U_{СИА}}{I_{СА}} \quad (3.26)$$

$$R_{и} = \frac{|U_{ЗИА}|}{I_{СИА}} \quad (3.27)$$

$$R_c = \frac{E_{\pi} - U_{СИА}}{I_{СА}} = \frac{5,6 - 2,42}{5,3 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Ом}$$

$$R_{и} = \frac{|U_{ЗИА}|}{I_{СИА}} = \frac{|-1,2|}{5,3 \cdot 10^{-3}} = 226,4 \text{ Ом}$$

Сопротивление затвора выбирается достаточно высоким, но оно не должно превышать входное сопротивление полевого транзистора. Обычно полагают $R_3 \leq 1 \text{ МОм}$ [5].

$$R_3 = 100 \text{ кОм.}$$

Ток стока при статическом режиме определяется по формуле (3.28):

$$I_C = \frac{E_{\pi}}{R_c + R_{и}} \quad (3.28)$$

$$I_C = \frac{E_{\pi}}{R_c + R_{и}} = \frac{5,6}{600 + 226,4} = 6,8 \text{ мА}$$

Уравнение для построения статической прямой имеет вид:

$$y = \frac{-6,8 \cdot 10^{-3}}{5,6} \cdot x + 6,8 \cdot 10^{-3}$$

Построим динамическую линию нагрузки, учитывая что $R_H = h_{11}$ биполярного транзистора:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_c \cdot R_H}{R_c + R_H} = \frac{600 \cdot 152,3}{600 + 152,3} = 121 \text{ Ом}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{R_{обш}}{K_M}\right) = \arctg\left(\frac{121}{250}\right) = 64^\circ$$

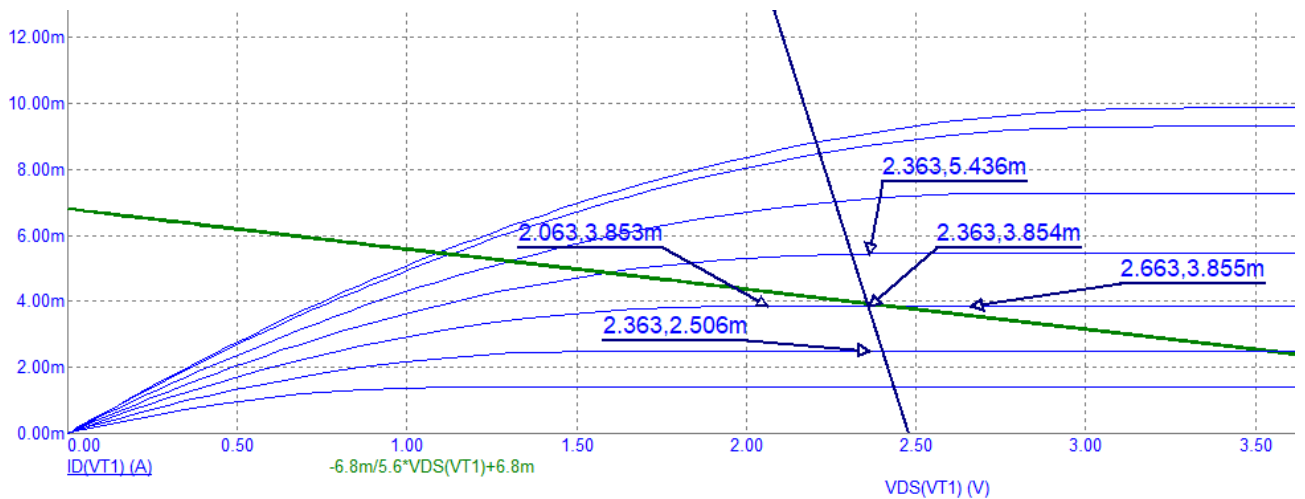


Рисунок 3.13 – Стоковые ВАХ со статической и динамической прямой

$$U_{симах} \geq U_{СИА} + U_{nm} \quad (3.29)$$

$$2,48 \text{ В} \geq 2,36 \text{ В} + 0,42 \text{ В}$$

Из рисунка 3.13 видно, что динамическая прямая имеет очень крутой наклон, возникает необходимость в применении эмиттерного повторителя, для согласования каскадов, поскольку сопротивление стока сильно велико, и смещение рабочей точки не даст ощутимого эффекта.

Параметры окончательной рабочей точки: $E_{п} = 5,6 \text{ В}$; $U_{зи} = -1,3 \text{ В}$; $I_{CA} = 3,854 \text{ мА}$; $U_{си} = 2,363 \text{ В}$.

Определим выходное сопротивление транзистора:

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} = \frac{2,663 - 2,063}{(5,436 - 2,506) \cdot 10^{-3}} = 205 \text{ Ом}$$

3.2.4 Согласование предварительного и окончного каскада

Для согласования выходного сопротивления полевого транзистора и входного сопротивления требуется вставить между входным и выходным каскадом эмиттерный повторитель (Схема с общим коллектором). Особенность схемы с ОК высокое входное сопротивление и низкое выходное сопротивление.

В качестве сопротивления эмиттера будет входное сопротивление биполярного транзистора, численно равное параметру h_{11} . Проанализируем параметры на основе которых требуется выбрать транзистор.

Входное сопротивление каскада с общим коллектором зависит от коэффициента усиления по току.

$$R_{\text{вх}} = \frac{\beta + 1}{2} \cdot R_{\text{н}}, \quad (3.30)$$

Где, $R_{\text{н}}$ - входное сопротивление оконечного каскада;

$R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление оконечного каскада.

Таким образом, чем больше коэффициент усиления по току, тем лучше будет происходить согласование каскадов.

Схема с общим коллектором представлена на рисунке 3.14.

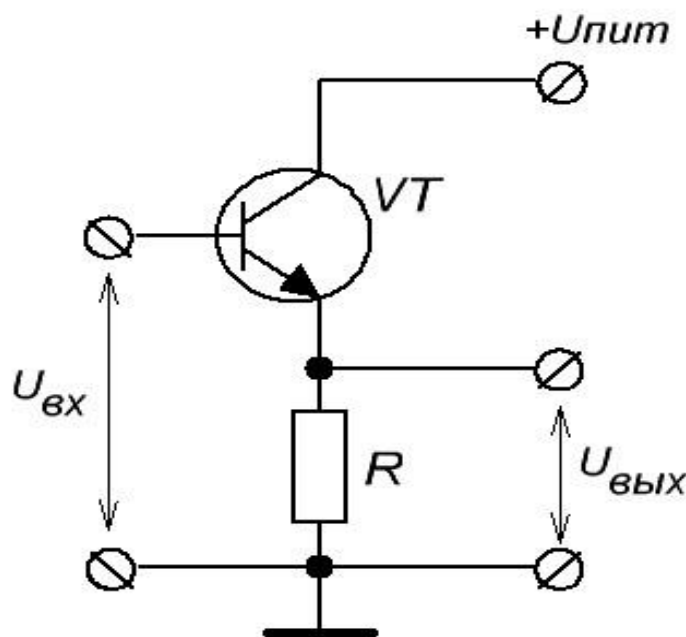


Рисунок 3.14 – Схема с общим коллектором

Исходя из рисунка, сопротивлением R будет входное сопротивление биполярного транзистора.

Экспериментальным путём был подобран транзистор 2N5830

Таблица 3.6 Параметры транзистора 2N5830

Предпочтительный параметр		Параметр транзистора
Рассеиваемая мощность, Вт	Не более 1 Вт	0,625 Вт
Статический коэффициент передачи тока	Не менее 50	80
Структура	NPN	NPN

С учётом параметров, рассчитаем наклон динамической линии:

$$R_{BX} = \frac{\beta+1}{2} \cdot R_H = \frac{80+1}{2} \cdot 152,3 = 6168 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_C \cdot R_{BX}}{R_C + R_{BX}} = \frac{6168 \cdot 600}{6168 + 600} = 567 \text{ Ом}$$

Новый угол динамической прямой:

$$\varphi' = \text{arcctg} \left(\frac{R_{\text{общ}}}{K_M} \right) = \text{arcctg} \left(\frac{567}{250} \right) = 24,6^\circ$$

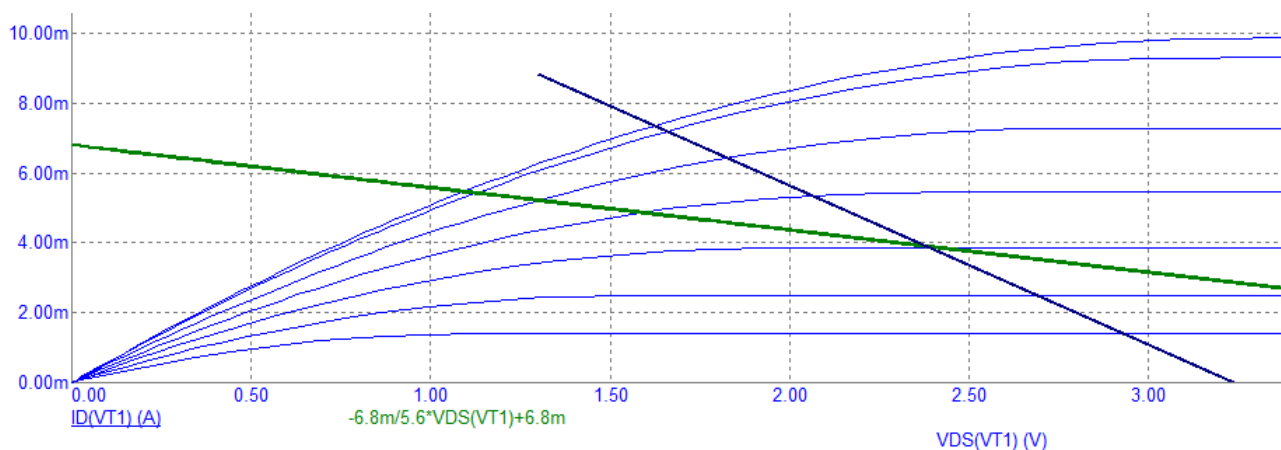


Рисунок 3.15 – Нагрузочная прямая при включении эмиттерного повторителя

$$U_{\text{смах}} \geq U_{\text{СИА}} + U_{\text{нм}}$$

$$3,23 \text{ В} \geq 2,36 \text{ В} + 0,42 \text{ В}$$

Из расчётов видно, что сигнал полностью укладывается в диапазон допустимого напряжения.

3.2.5 Построение стоко-затворной характеристики

На рисунке 3.16 изображена схема включения для построения стоко-затворной характеристики транзистора.

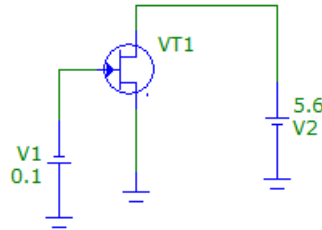


Рисунок 3.16 – Схема включения для снятия характеристики

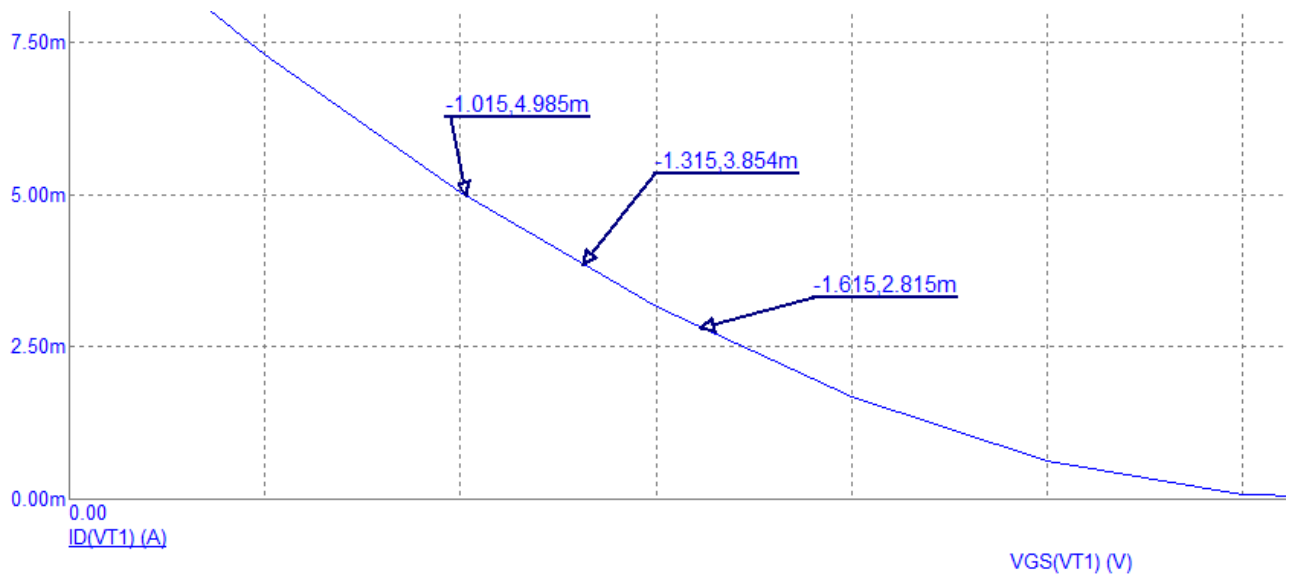


Рисунок 3.17 – Стоко-затворная характеристика

Для определения крутизны характеристики транзистора на графике отмечены соответствующие точки (крайние от рабочей точки).

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} \quad (3.31)$$

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} = \frac{(2,815 - 4,985) \cdot 10^{-3}}{-1,615 - (-1,015)} = 3,6 \text{ мА/В}$$

3.2.6 Расчёт коэффициента усиления для промежуточного каскада

Коэффициент усиления для промежуточного каскада на полевом транзисторе для схемы с общим истоком вычисляется по формуле (3.32):

$$K_U = \frac{S \cdot (R_C \parallel R_H)}{1 + \frac{(R_C \parallel R_H)}{R_{СИ}}} \quad (3.32)$$

Где, R_H – входное сопротивление последующего каскада;

$R_{си}$ – дифференциальное сопротивление транзистора, определяемое из стоковых ВАХ.

$$K_U = \frac{S \cdot (R_c \parallel R_H)}{1 + \frac{(R_c \parallel R_H)}{R_{си}}} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{600 \cdot 152,3}{600 + 152,3}}{1 + \frac{600 \cdot 152,3}{205}} = 0,23$$

3.2.7 Предварительный расчёт ёмкостей для промежуточного каскада

Конденсатор на входе каскада считается по формуле (3.33):

$$C_1 = \frac{1}{\omega_H \cdot R_3} \quad (3.33)$$

Поскольку в схему включён эмиттерный повторитель, то конденсатор C_2 теперь будет стоять на выходе эмиттерного повторителя. Считается он по (3.34):

$$C_2 = \frac{1}{\omega_H \cdot (R_3 + R_{вх})} \quad (3.34)$$

Конденсатор в цепи истока, выполняющий функцию термостабилизации каскада рассчитывается по формуле (3.35):

$$C_{и} = \frac{1}{(0,2 \dots 0,25) R_3' \cdot \omega_H} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{\omega_H \cdot R_3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^3} = 16 \text{ нФ} \\ C_2 &= \frac{1}{\omega_H \cdot (R_3' + R_{вх})} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (152,3 + 152,3)} = 522,3 \text{ мкФ} \\ C_{и} &= \frac{1}{(0,2 \dots 0,25) R_3' \cdot \omega_H} = \frac{1}{0,2 \cdot 100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 152,3} = 52,3 \text{ мкФ} \end{aligned}$$

3.2.8 Моделирование работы предварительного каскада

Совершив предварительные расчёты элементов схемы, перейдём к моделированию работы усилительного каскада. Порядок действий такой же, как в пункте 3.1.7.

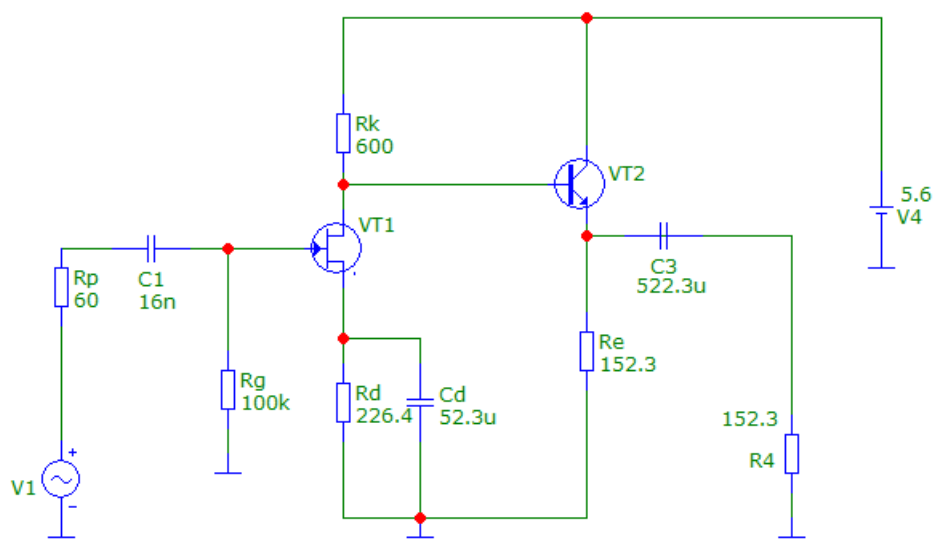


Рисунок 3.18 – Схема усилительного каскада с эмиттерным повторителем

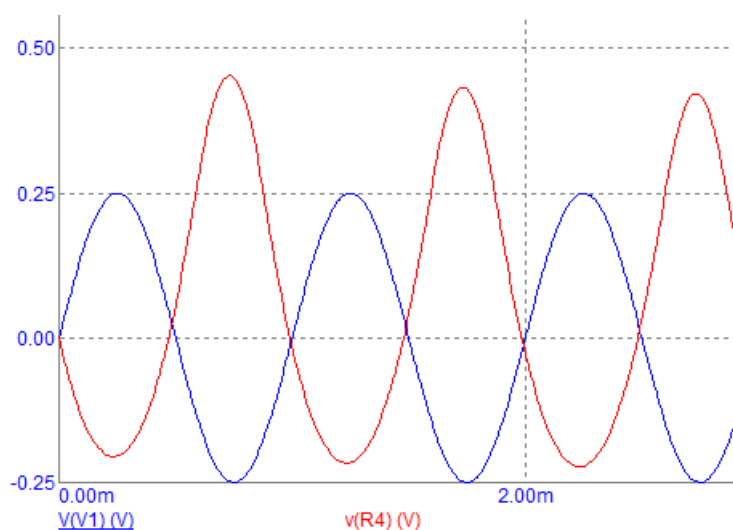


Рисунок 3.19 – Временной анализ схемы

Как видно из графика, коэффициент усиления намного больше теоретического.

$$K_{\text{получ}} = 1,5$$

$$K_{\text{т}} = 0,2$$

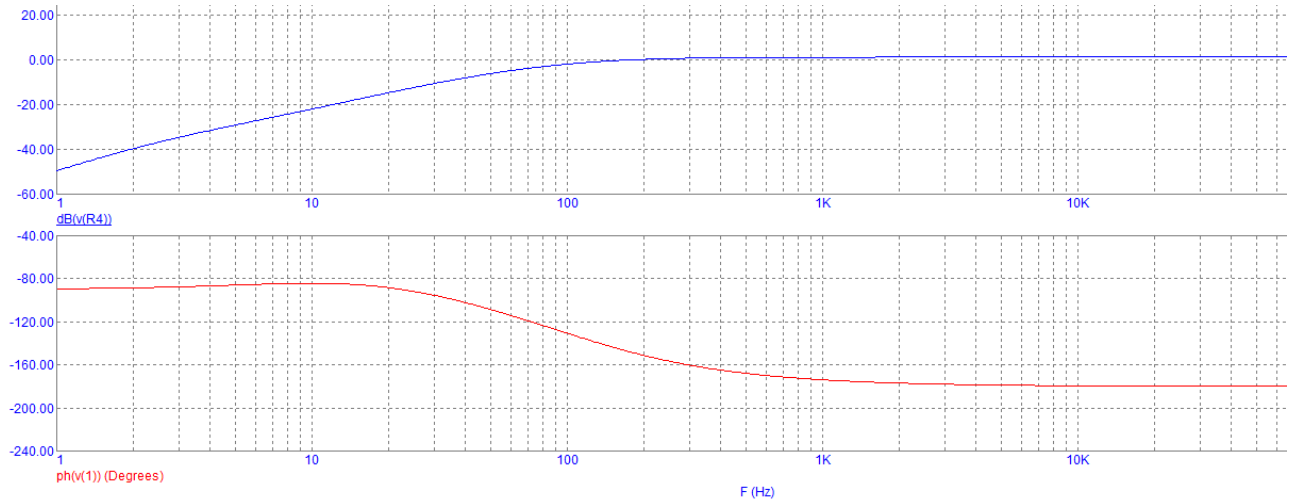


Рисунок 3.20 – АЧХ входного каскада

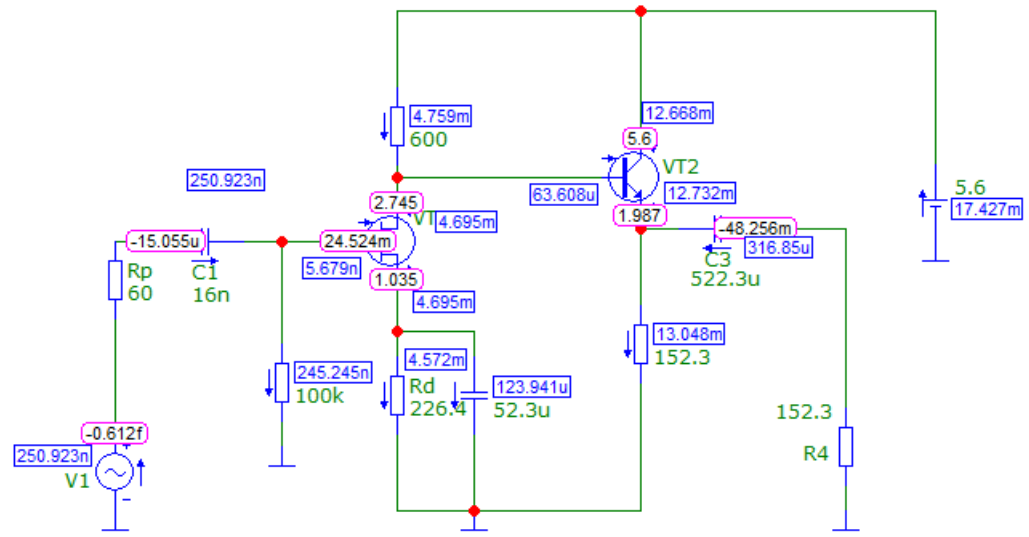


Рисунок 3.21 – Токи и узловые потенциалы в схеме

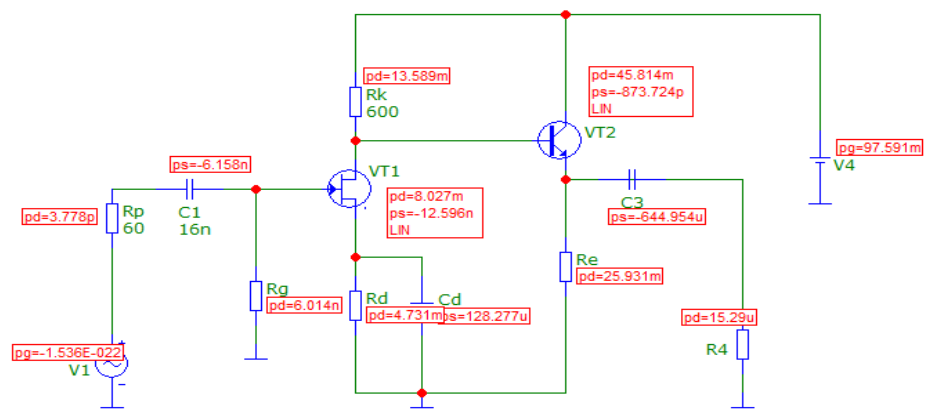


Рисунок 3.22 – Распределение мощностей и состояния транзисторов

3.3 Расчёт трёхкаскадного усилителя

3.3.1 Окончательный расчёт конденсаторов схемы

Следующим шагом будет окончательный расчёт конденсаторов в межкаскадных, разделительных и цепях термостабилизации каскадов. Требуется распределить все частотные искажения на ёмкостях, причём на конденсаторы в цепях истока и эмиттера приходится в 2 – 3 раза больше искажений.

Искажение, приходящееся на разделительный конденсатор:

$$M_H = 0,53 \text{ дБ}$$

На эмиттерный и истоковый конденсаторы:

$$M_{HЭИ} = 1,59 \text{ дБ}$$

В размах частотные искажения равны:

$$M_i = 1,06$$

$$M_{HИЭ} = 1,20$$

С учётом частотных искажений:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_H \cdot R_3 \sqrt{M_i^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1,06^2 - 1}} = 45 \text{ нФ}$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_H \cdot (R_{Э'} + R_{ВХ}) \sqrt{M_i^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot (152,3 + 152,3) \cdot \sqrt{1,06^2 - 1}} = 14,8 \text{ мкФ}$$

$$C_3 \geq \frac{1}{\omega_H (R_K + R_H) \sqrt{M_i^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot (81 + 100) \cdot \sqrt{1,06^2 - 1}} = 25 \text{ мкФ}$$

$$C_{И} = \frac{1}{(0,2 \dots 0,25) R_H \cdot \omega_H \sqrt{M_{HИЭ}^2 - 1}} = \frac{1}{0,2 \cdot 100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 226,4 \cdot \sqrt{1,2^2 - 1}} = 53 \text{ мкФ}$$

$$C_э = \frac{1}{\omega_H \cdot h_{11} \sqrt{M_{HИЭ}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 152,3 \cdot \sqrt{1,2^2 - 1}} = 15,7 \text{ мкФ}$$

3.3.2 Расчёт коэффициента усиления усилителя

На основе пунктов 3.1.7 и 3.2.8 можно оценить коэффициент усиления:

$$K = \prod_{i=1}^n K_i \quad (3.36)$$

$$K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} = 29,2 \cdot 0,2 = 5,84$$

Требуемый коэффициент усиления равен $K_{uoc} = 1,68$, поэтому переходим к расчёту цепи обратной связи.

3.3.3 Расчёт цепи обратной связи усилителя

Проектирование цепи обратной связи основывается на количестве каскадов усилителя. В данном случае число каскадов $n = 3$, поскольку эмиттерный повторитель тоже является каскадом. Обратная связь подключается с выхода усилителя на базу (в нашем случае затвор) полевого транзистора.

$$R_{oc} = \frac{R_r \cdot (1 - \beta)}{\beta} \quad (3.37)$$

Где, R_{oc} – сопротивление резистора в цепи обратной связи;

$$\beta = \frac{K - K_{uoc}}{K \cdot K_{uoc}}.$$

$$\beta = \frac{K - K_{uoc}}{K \cdot K_{uoc}} = \frac{5,84 - 1,68}{5,86 \cdot 1,68} = 0,42$$

$$R_{oc} = \frac{R_r \cdot (1 - \beta)}{\beta} = \frac{60 \cdot (1 - 0,42)}{0,42} = 82,9 \text{ Ом}$$

3.3.4 Моделирование работы усилителя

После расчёта всех элементов усилителя, требуется произвести моделирование в 2 этапа: первый этап – моделирование без отрицательной обратной связью, второй этап – с ООС. При моделировании без ООС, сопротивление источника и конденсатор C_1 не учитываются в схеме.

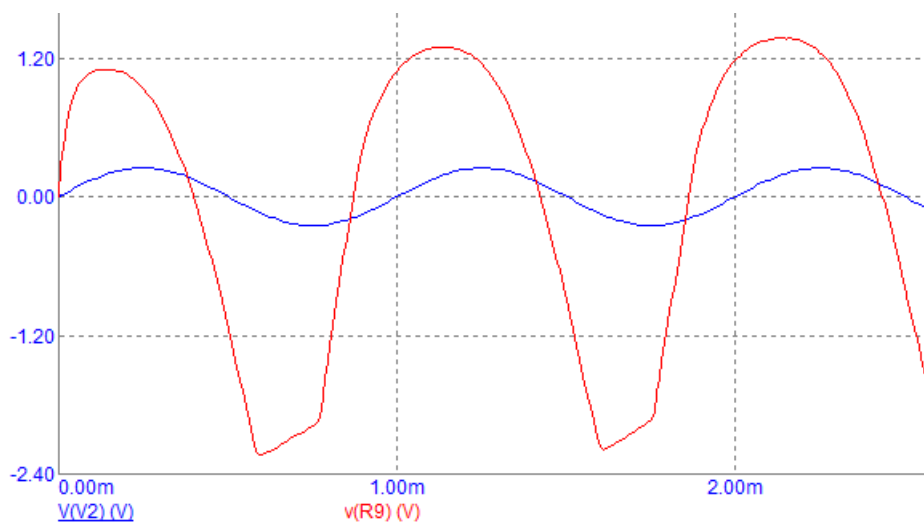


Рисунок 3.23 – Переходной процесс без ООС

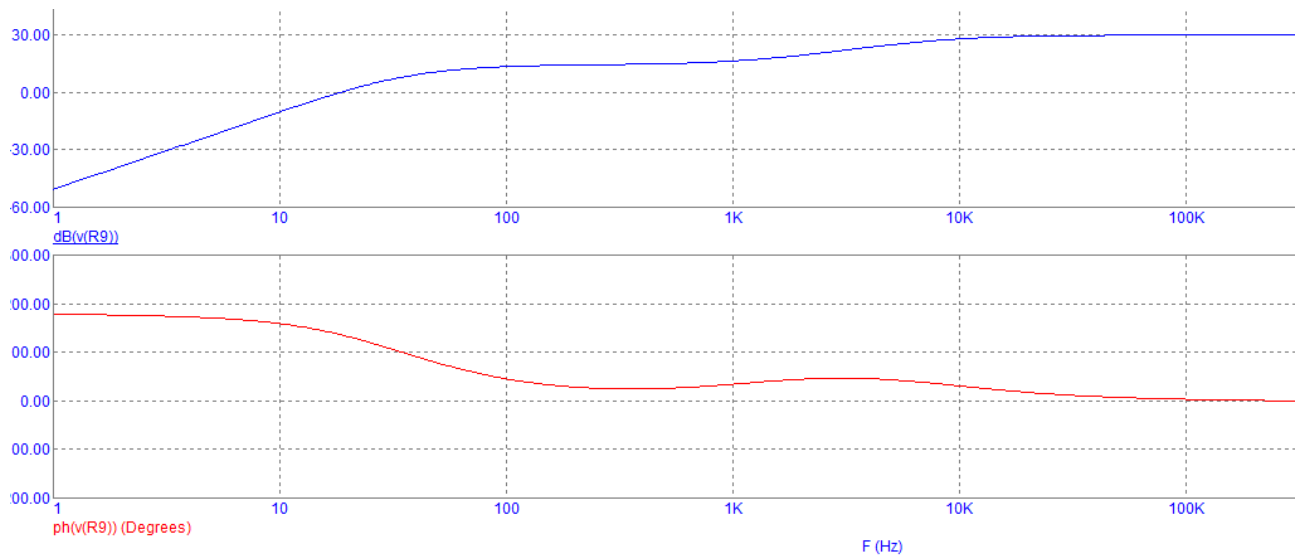


Рисунок 3.24 – Частотный анализ усилителя

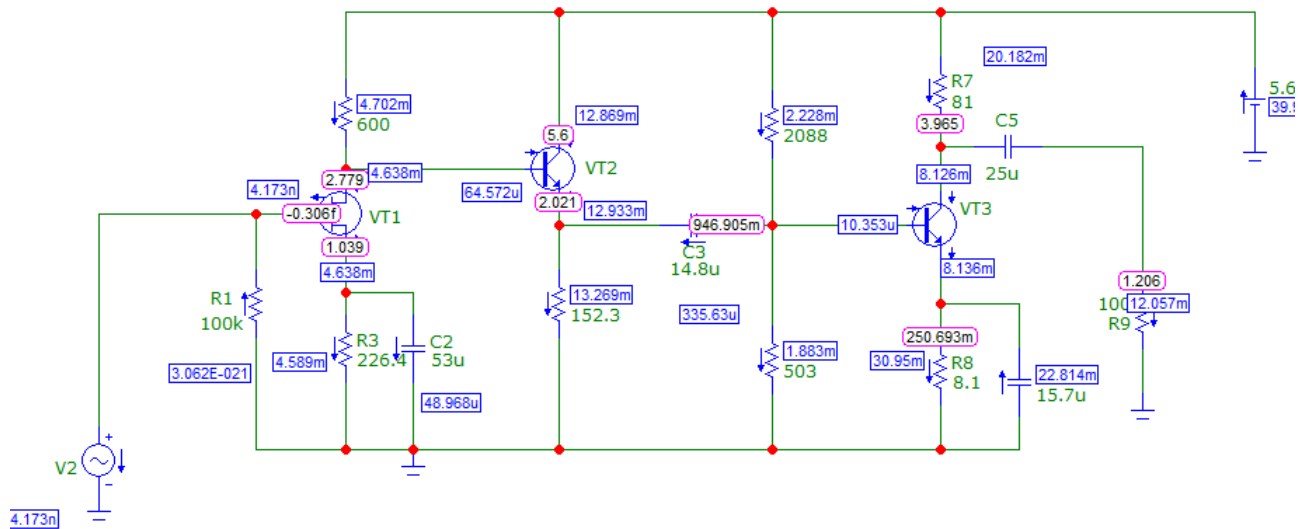


Рисунок 3.25 – Токи и узловые потенциалы

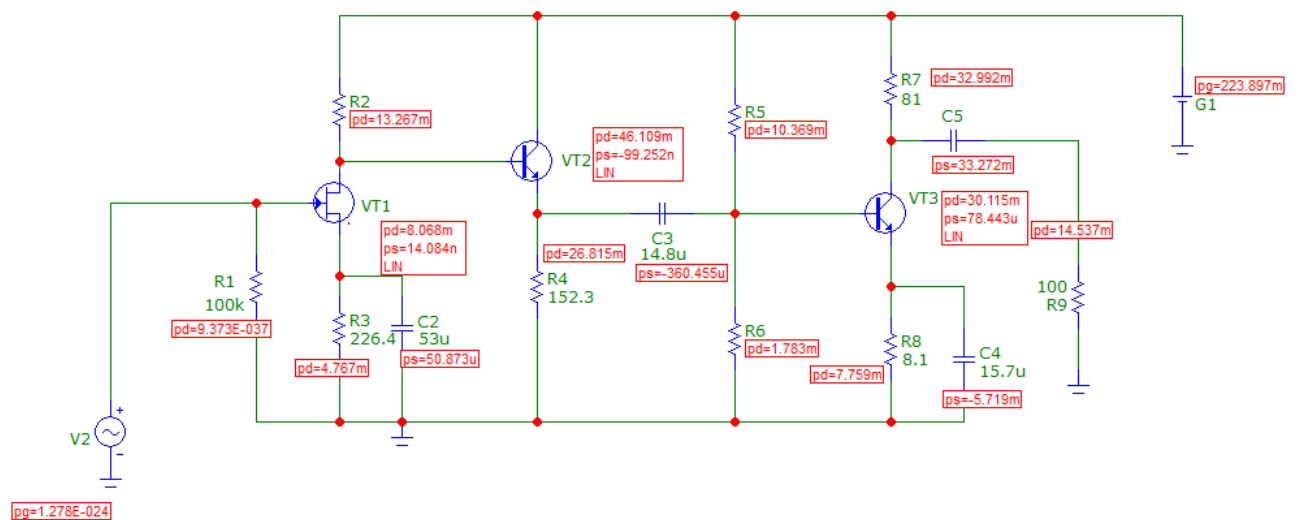


Рисунок 3.26 – Распределение мощностей в схеме

Теперь приступим к анализу с ООС. Конденсатор C_1 и входное сопротивление источника возвращаем в схему, добавляем резистор обратной связи.

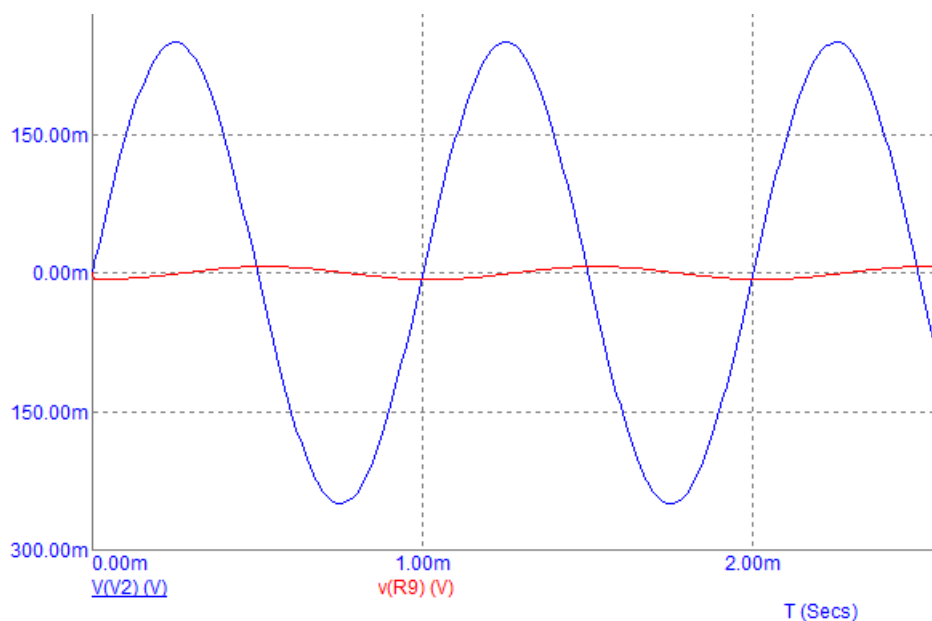


Рисунок 3.27 – Переходной процесс с ООС

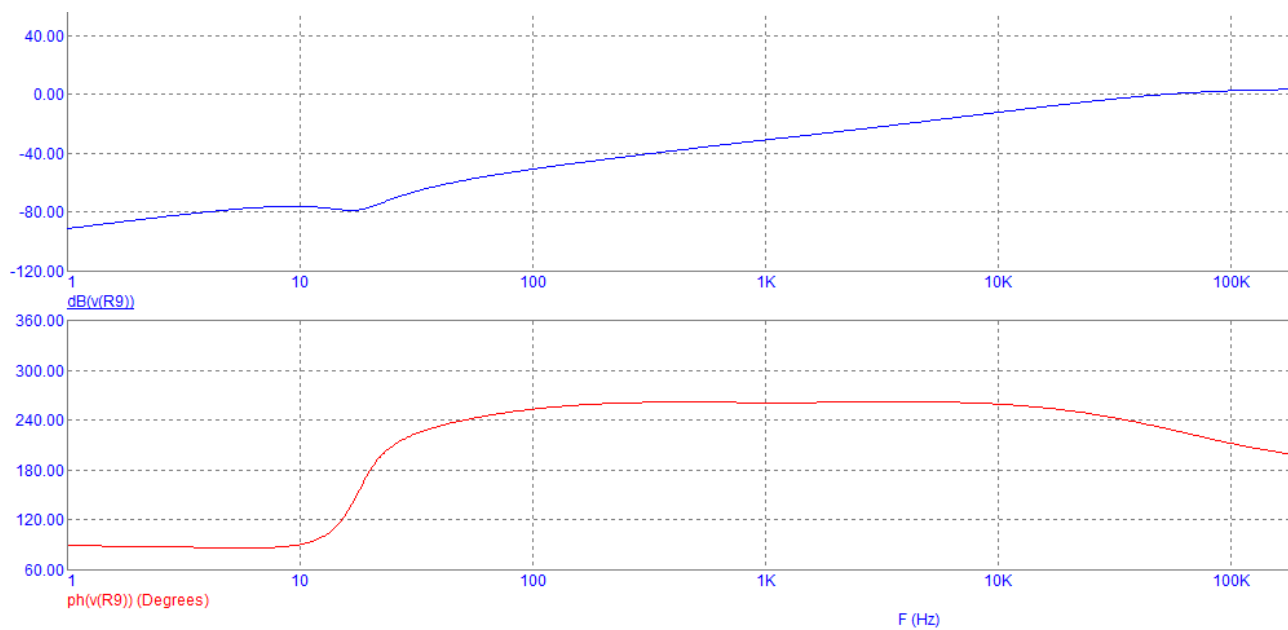


Рисунок 3.28 – Частотный анализ с ООС

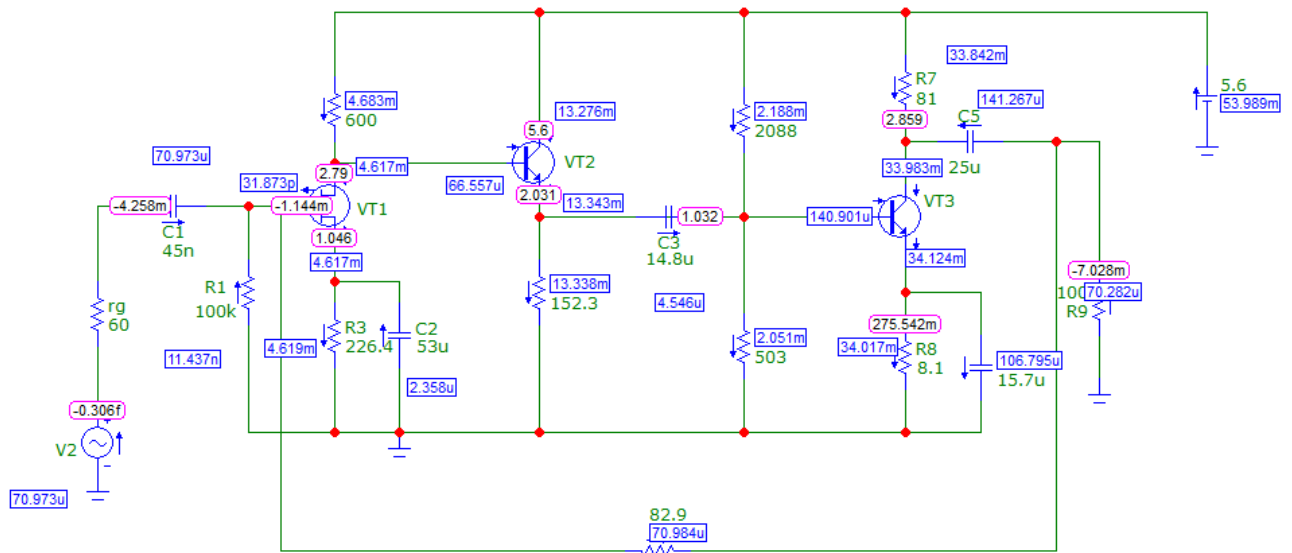


Рисунок 3.29 – Токи и узловые потенциалы для замкнутой ООС

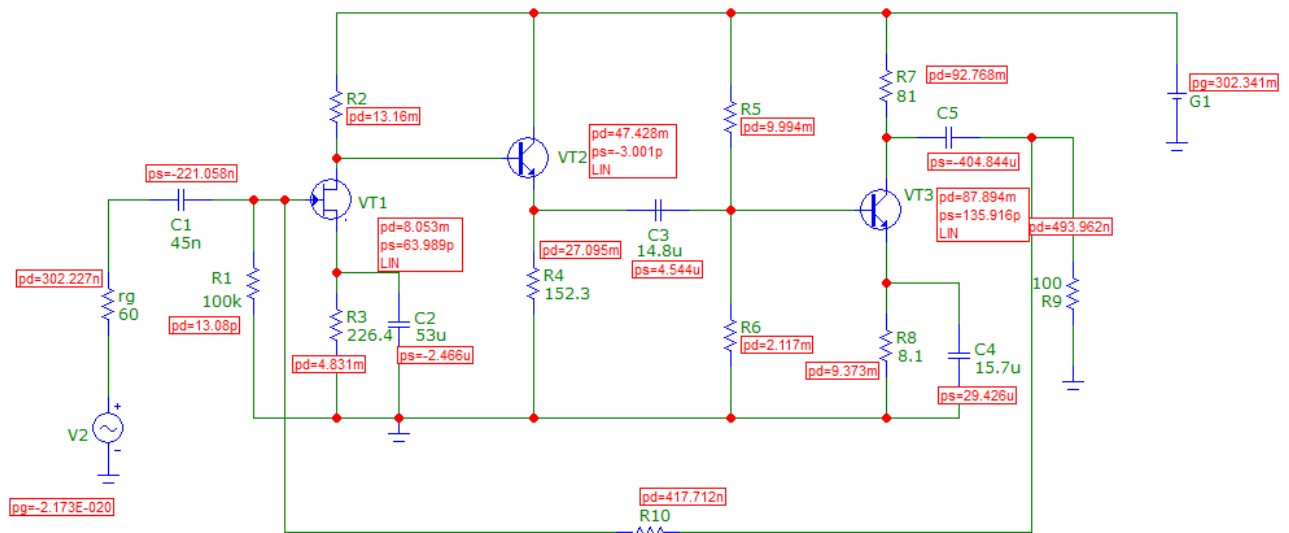


Рисунок 3.30 – Распределение мощностей для замкнутой ООС

Из графиков на рисунках 3.27 и 3.28 видно, что ни одно условие ТЗ не выполняются. Приступим к регулировке номиналов элементов.

3.3.5 Оптимизация схемы усилителя

Первоначально надо выровнять коэффициент усиления согласно ТЗ. Требуемый $K_U = 1,68$. Регулировка будет производиться резистором обратной связи. Переводя в децибелы, требуется добиться коэффициента усиления в 4,5 дБ.

При достижении резистора ООС номинала в 1100 Ом, возникла ситуация, когда в выходном стали проявляться высокочастотные гармоники, т.е. усилитель перешёл в режим самовозбуждения.

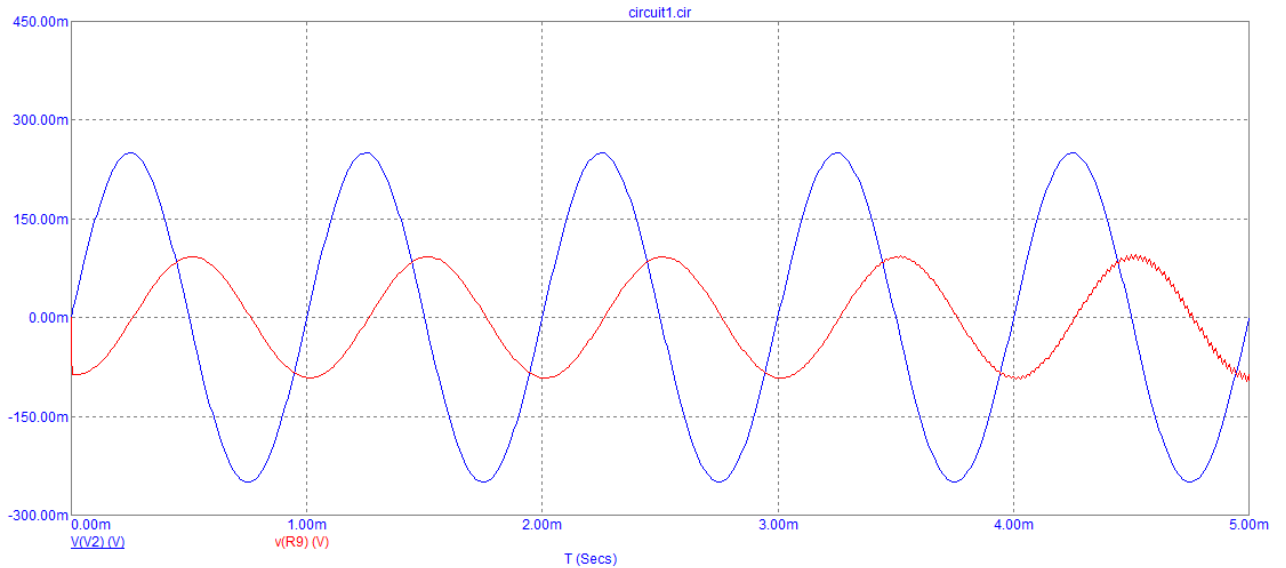


Рисунок 3.31 – Временной анализ при регулировке резистора ООС

Для компенсации такого недостатка в истоковую цепь добавляется резистор дополнительный обратной связи, а резистор, охватывающий обратной связью все каскады, одним концом соединяется с истоковой цепью.

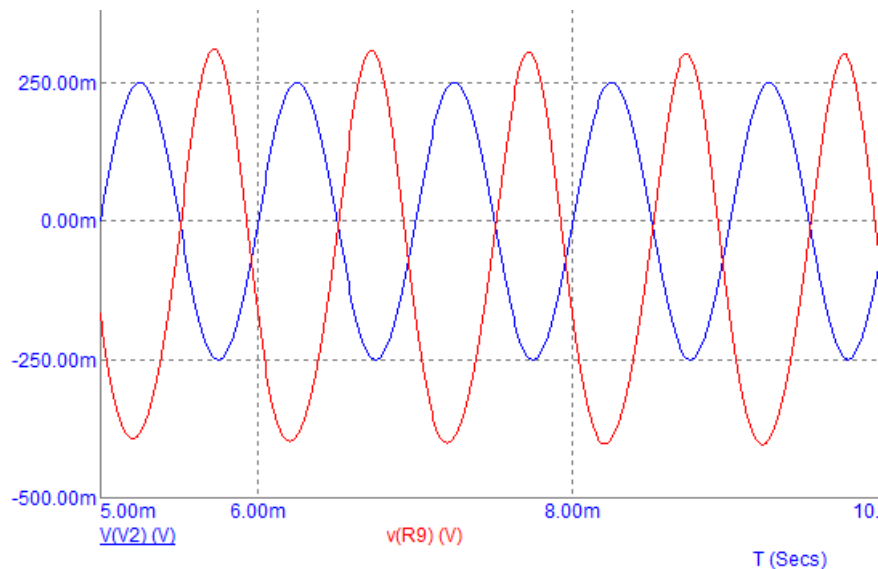


Рисунок 3.32 – Выходной сигнал после коррекции обратной связи

Теперь приступим к коррекции АЧХ. Требуемый коэффициент усиления равен 4,5 дБ. Ослабление сигнала на граничных частотах должно быть на 0.54 дБ. Для изменения нижней границы изменяются значения разделительных конденсаторов, а также конденсатора в цепи эмиттера.

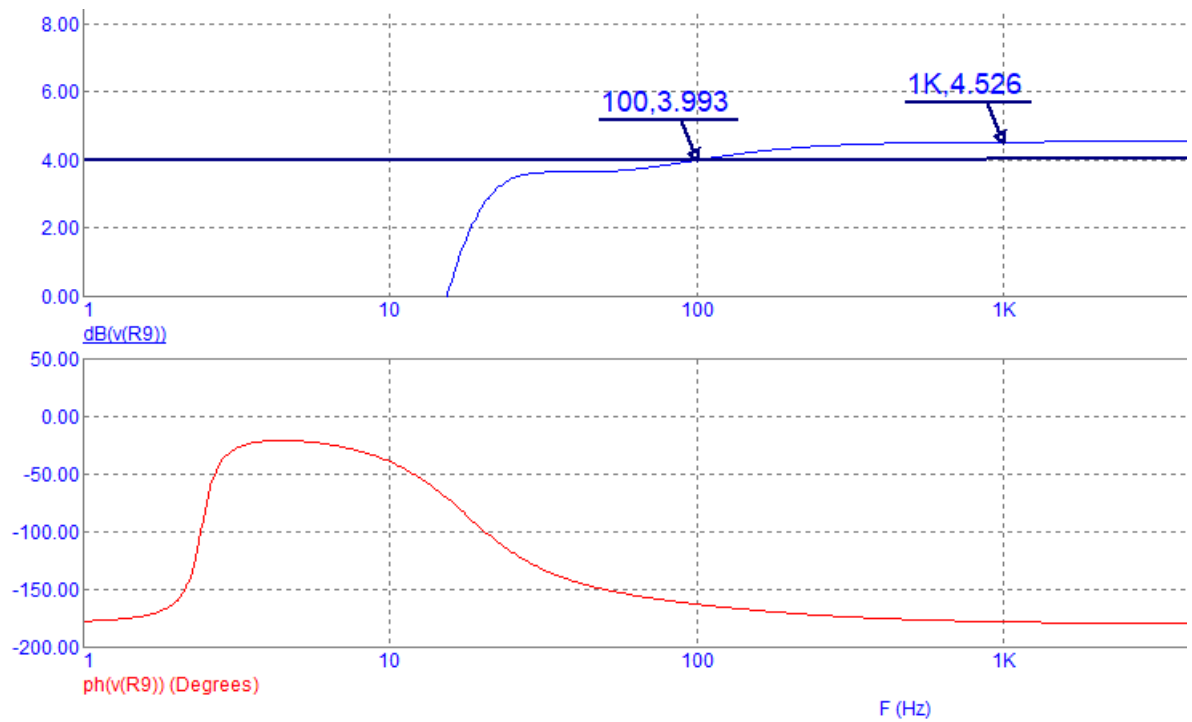


Рисунок 3.33 – Коррекция нижней границы АЧХ

Аналогичные действия осуществляем уже для верхней границы, с учётом того, что для завала верхней частоты требуется производить изменение резистора в цепи коллектора, поскольку именно он и влияет на верхнюю границу.

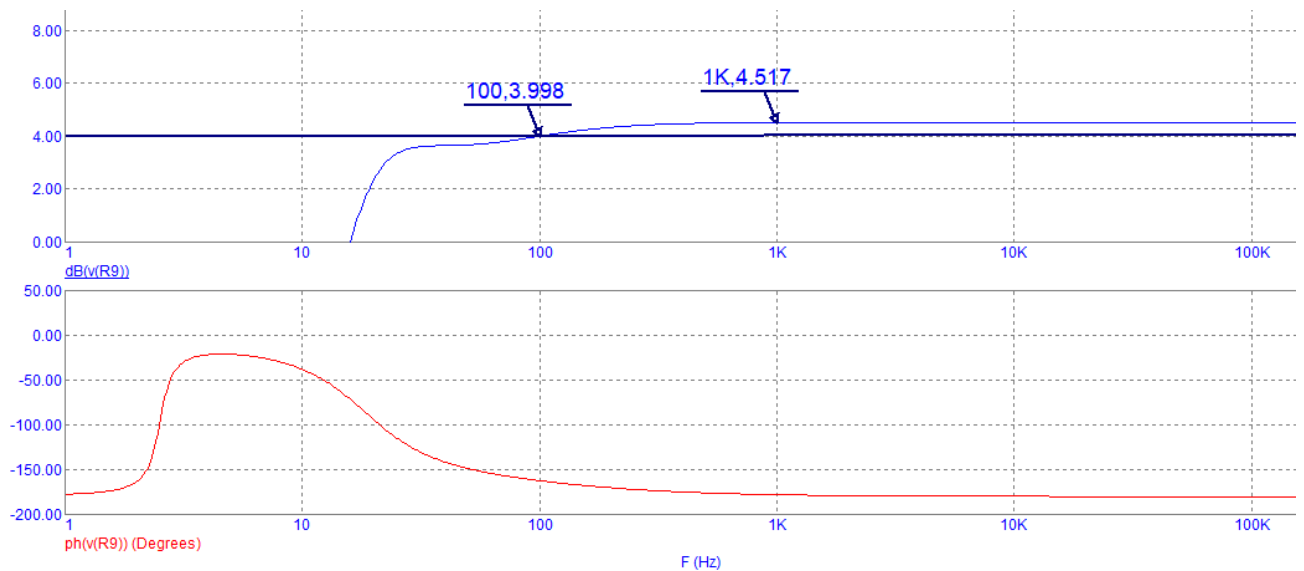


Рисунок 3.34 – Результаты регулировки резистора в цепи коллектора

Исходя из рисунка 3.34, не удалось изменить верхнюю границу, поэтому потребуется прибегнуть к методам коррекции в области высоких частот. В использованном источнике[6] предлагается установить конденсатор параллельно нагрузке. Номинал подбирается исходя из частотного анализа.

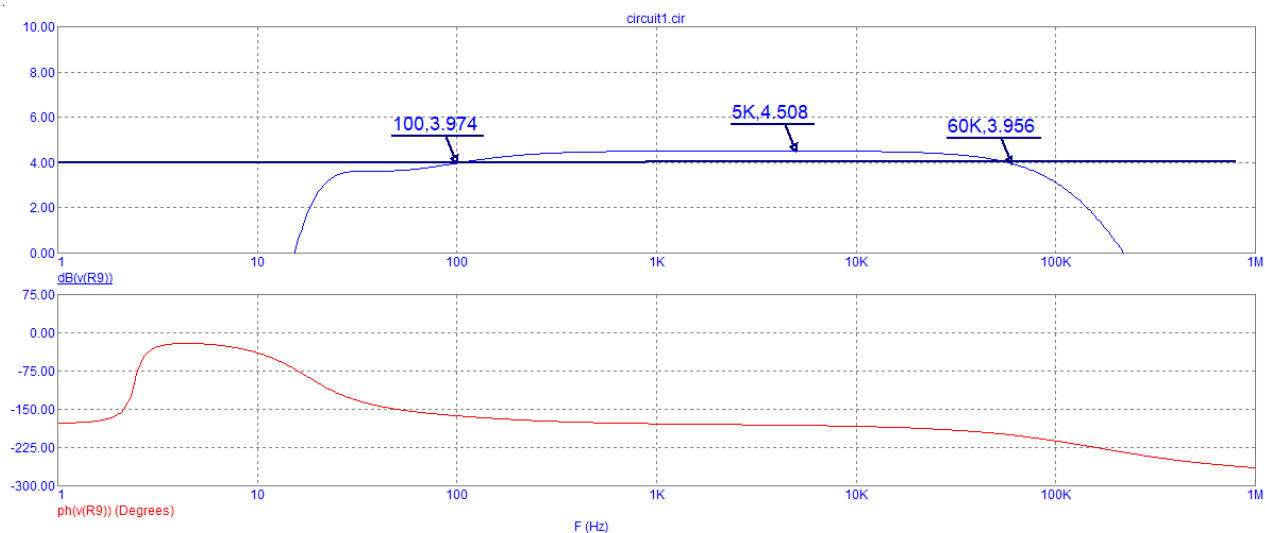


Рисунок 3.35 – АЧХ отрегулированного усилителя

Теперь проведём заключительный анализ перед подбором элементной базы для усилителя.

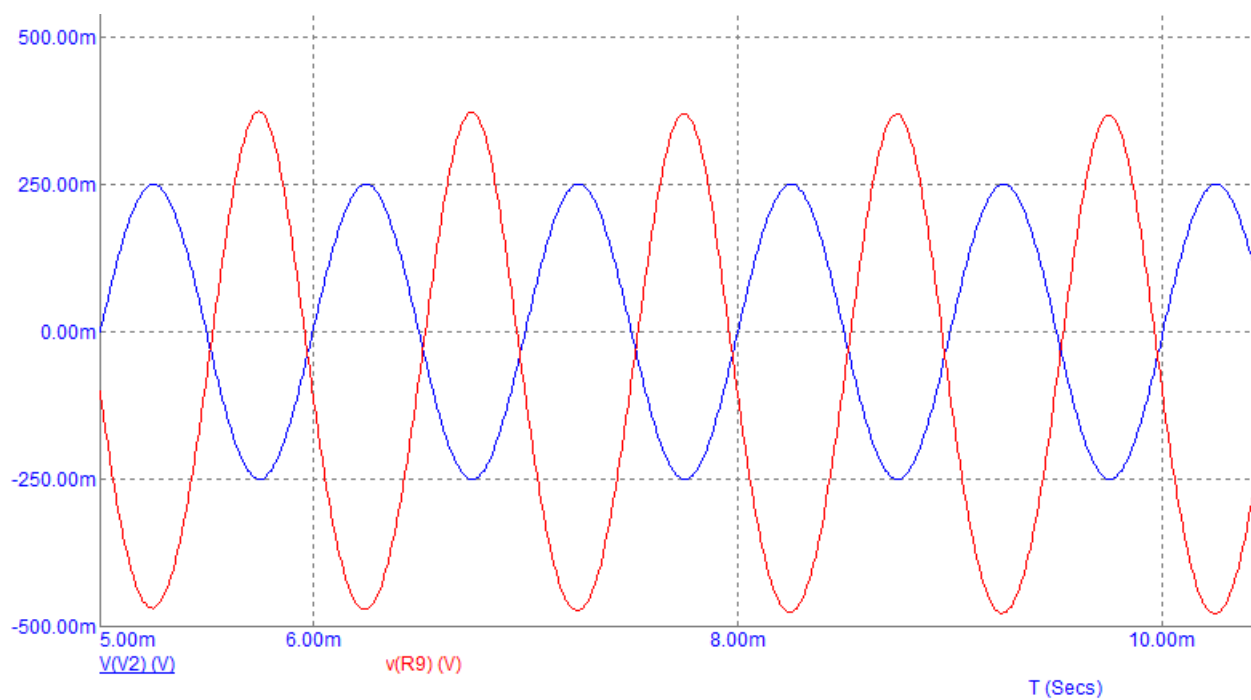


Рисунок 3.36 - Временной анализ усилителя

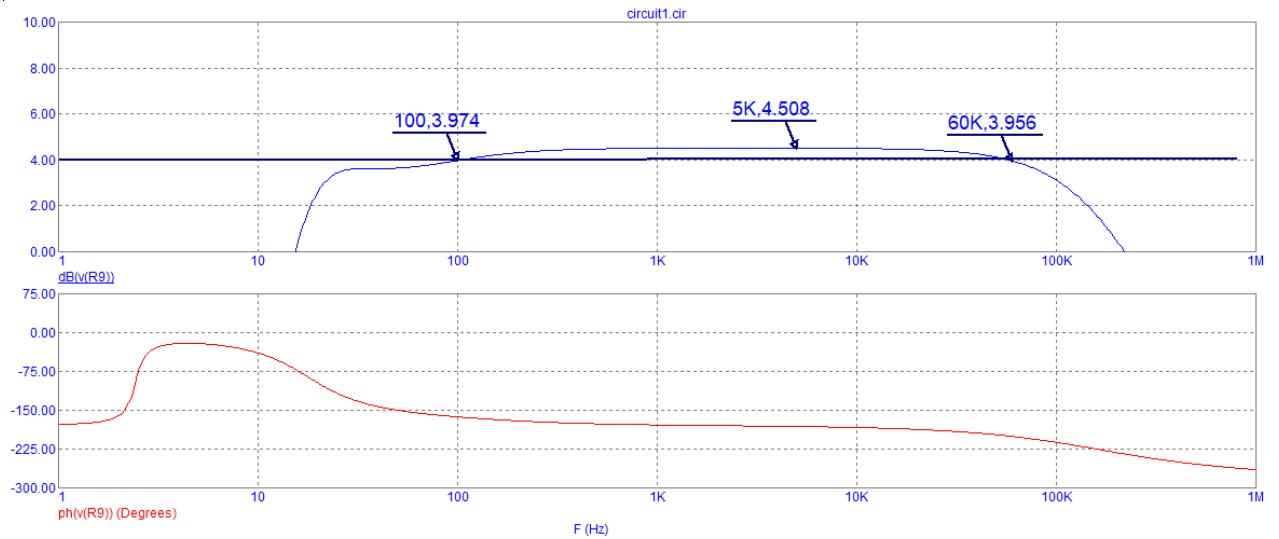


Рисунок 3.37 – Частотный анализ усилителя

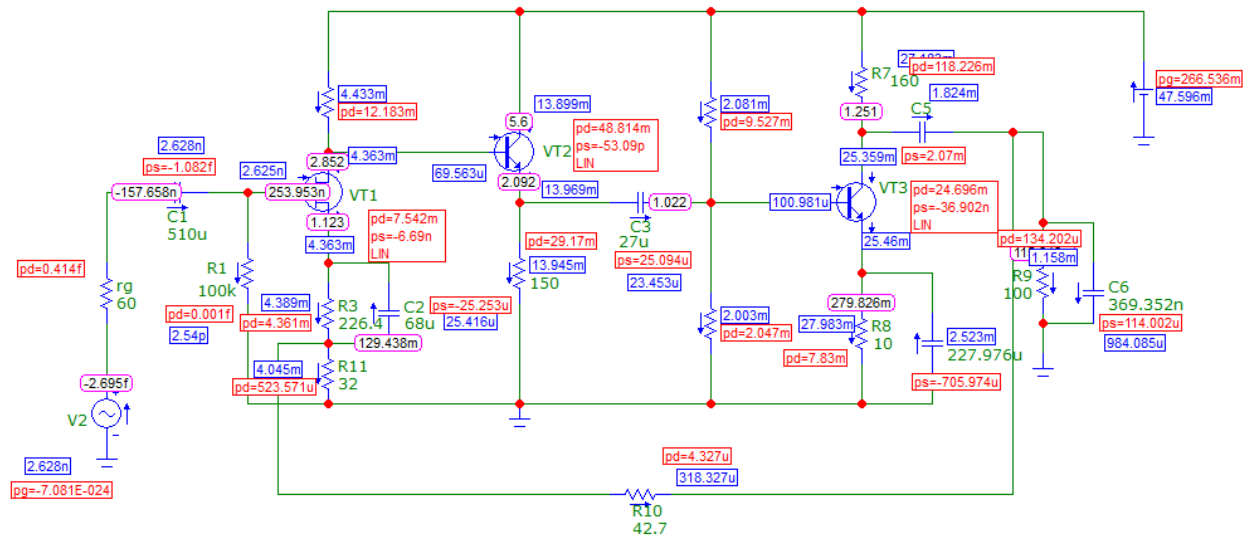


Рисунок 3.38 – Распределение токов, напряжений и мощностей в усилителе

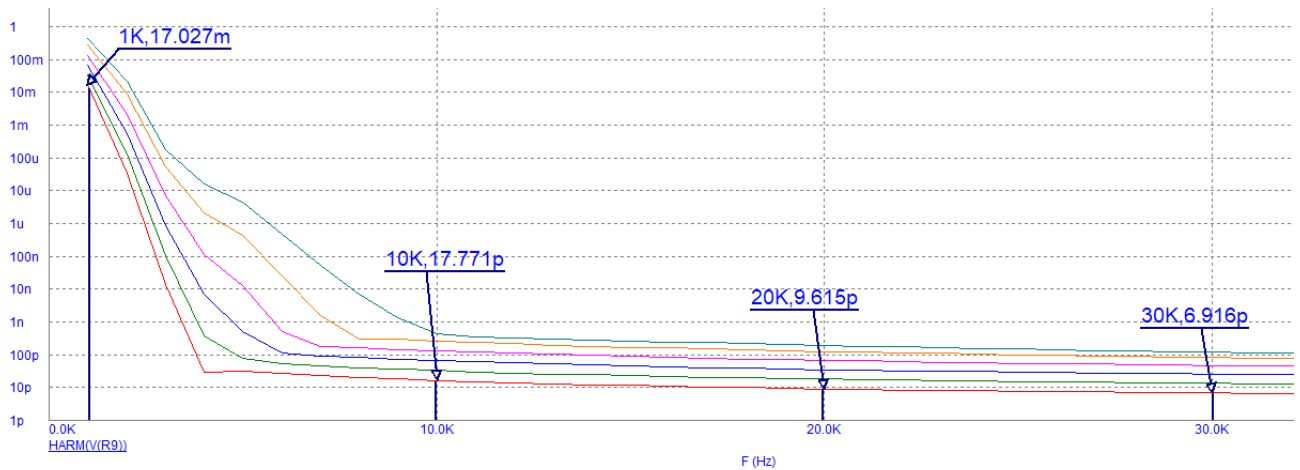


Рисунок 3.39 – Нелинейные искажения в усилителе

Численно оценим коэффициент нелинейных искажений:

$$\text{КНИ} = 100\% \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=2} A_i^2}}{A_1} = 100\% \cdot \frac{\sqrt{(17 \cdot 10^{-9})^2 + (9,6 \cdot 10^{-9})^2 + (6,9 \cdot 10^{-9})^2}}{17 \cdot 10^{-3}} = 0,00012\%$$

Для усилителей класса А КНИ должен быть не более 0,05%, таким образом можно заявить о том, что КНИ соответствует требованиям.

3.3.6 Подбор элементов для усилителя

Поскольку в реальных условиях расчётные номиналы радиоэлементов недостижимы, воспользуемся рядами Е для поиска более подходящих номиналов и проведём анализ на соблюдение требований ТЗ. Для подбора использовался ряд Е24 и Е96.

Таблица 3.8 Номиналы радиодеталей

Позиционное обозначение элемента схемы	Расчётный номинал	Номинал по ряду (ряд указан в скобках)	Единицы измерения
R1	100	100(E24)	кОм
R2	600	620(E24)	Ом
R3	226,4	220(E24)	Ом
R4	152,3	150(E24)	Ом
R5	2088	2200(E24)	Ом
R6	503	510(E24)	Ом
R7	158,2	160(E24)	Ом
R8	10	10(E24)	Ом
R10	42,7	43(E24)	Ом
R11	32	33(E24)	Ом
C1	500	510(E24)	мкФ
C2	68,4	68(E24)	мкФ
C3	28,3	27(E24)	мкФ
C4	227	220(E24)	мкФ
C5	24	24(E24)	мкФ
C6	369	360(E24)	нФ

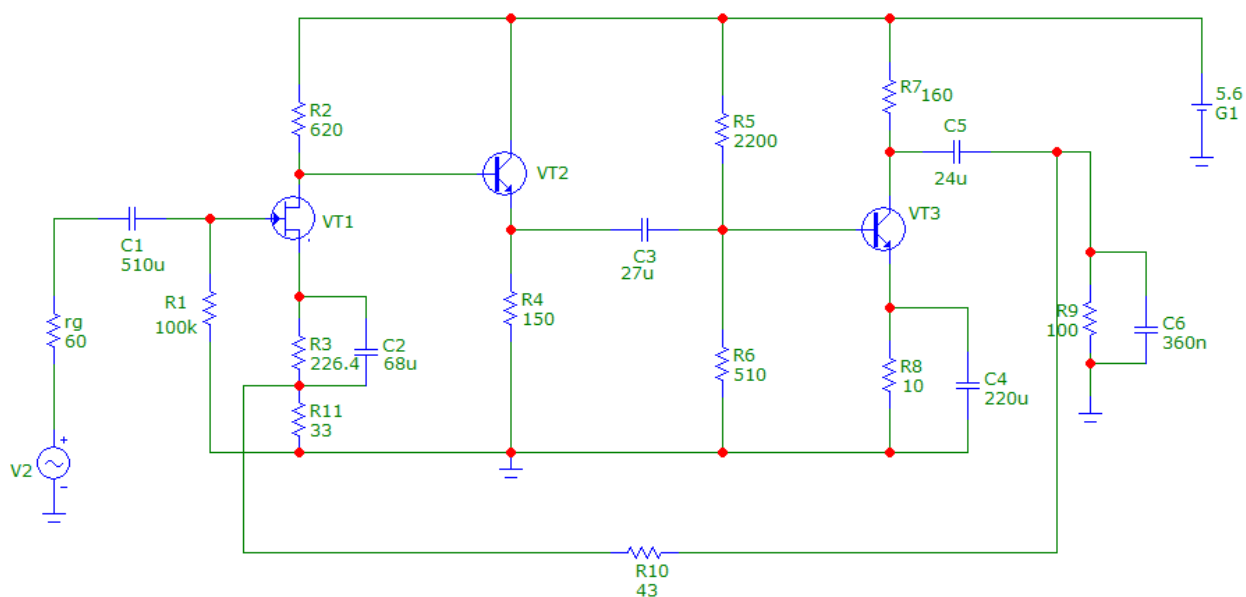


Рисунок 3.40 – Схема усилительного каскада

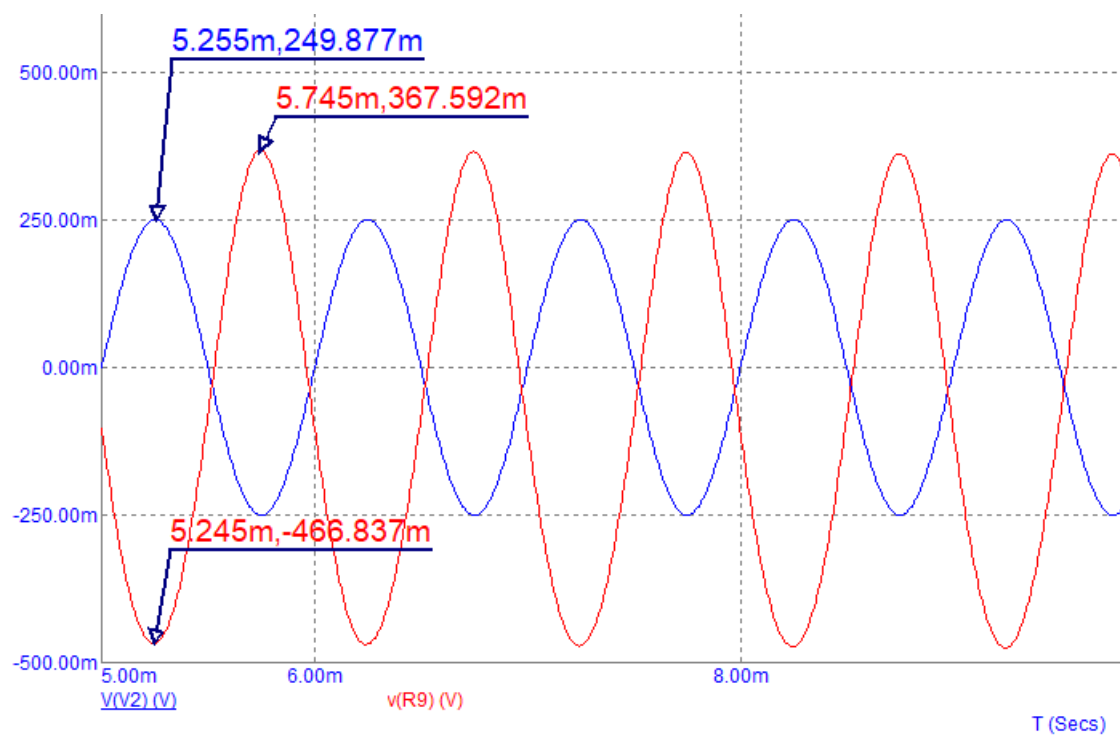


Рисунок 3.41 – Временной анализ

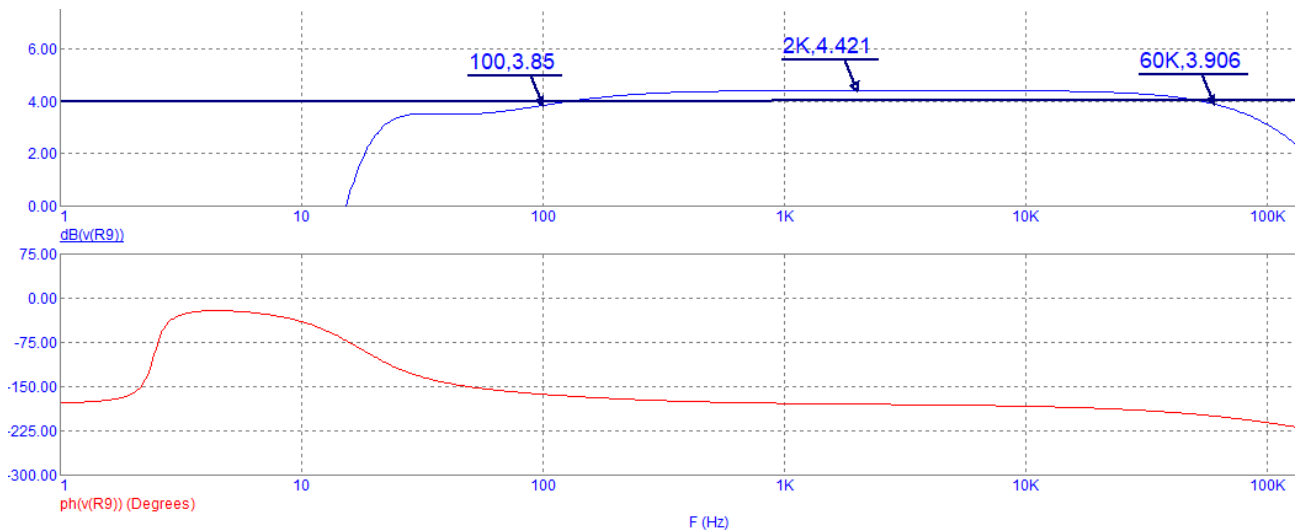


Рисунок 3.42 – Частотный анализ

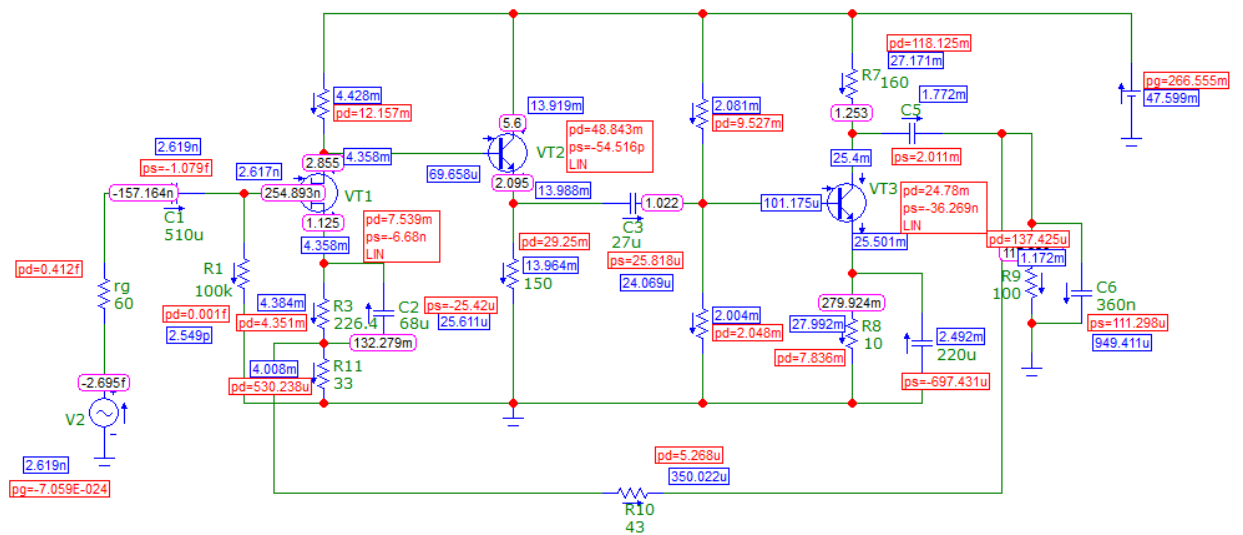


Рисунок 3.43 – Распределение токов, напряжений и мощностей в усилителе

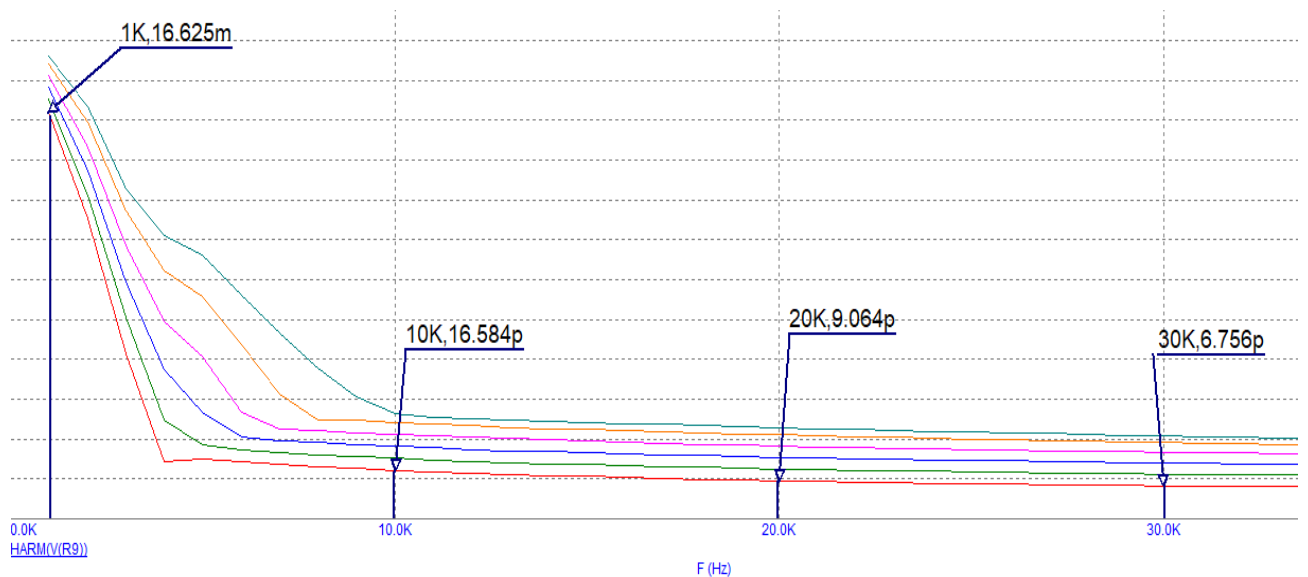


Рисунок 3.44 – Нелинейные искажения в усилителе

Заключение

В результате выполнения курсового проекта были изучены основные методики расчёта усилителей низкой частоты, приобретены навыки анализа и оценки параметров схемы, а также освоены методы моделирования процессов в усилителе.

На этапе построения многокаскадного усилителя пришлось столкнуться с некоторыми проблемами, такими как самовозбуждение усилителя и согласование каскадов .

Согласно техническому заданию были выполнены все требования технического задания. Коэффициент усиления усилителя с учётом погрешности равен 4,5 дБ, ослабление на граничных частотах на 0,54 дБ, что соответствует коэффициенту частотных искажений. Анализ на нелинейные искажения также показал низкий коэффициент нелинейных искажений, что также соответствует усилителю класса А.

Список используемой литературы

1. ОС ТУСУР 01-2013 (СТО 02069326.1.01-2013). Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. (2013. – 57 с). - Томск: ТУСУР.
2. Перепелкин Д. А. Схемотехника усилительных устройств. Учебное пособие для вузов. – 2-е издание. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 238 с.
- 3.ГОСТ 29322-2014 Межгосударственный стандарт напряжения стандартный [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200115397> (Дата обращения: 17.09.2020)
4. Айсберг Е.Д. Транзистор? Это очень просто! 4-е издание,1977. – 147 с.
5. Простейшие способы установки рабочей точки в схеме с общим истоком [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.club155.ru/transistors-workpoint-cs> (Дата обращения: 21.11.2020]
6. Д.П. Линде, Справочник по радиоэлектронным устройствам, 1978. – 440 с.

Приложение А (обязательное)

Входные и выходные вольт–амперные характеристики

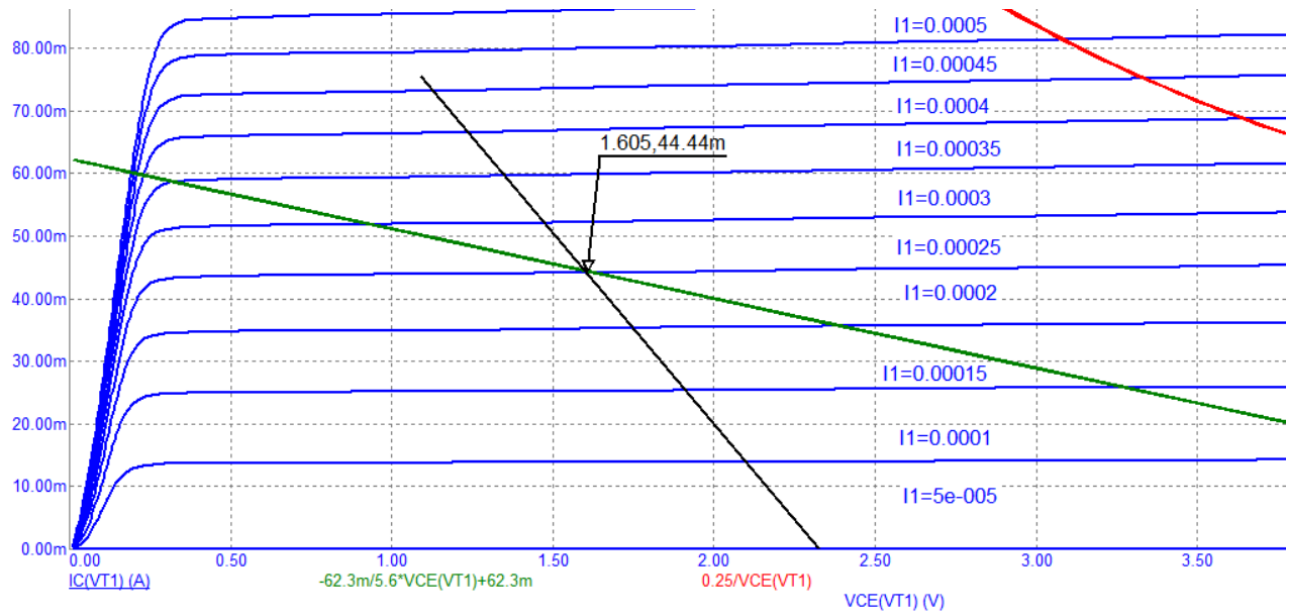


Рисунок А.1 – Выходная ВАХ транзистора BC846 с нанесённой рабочей точкой

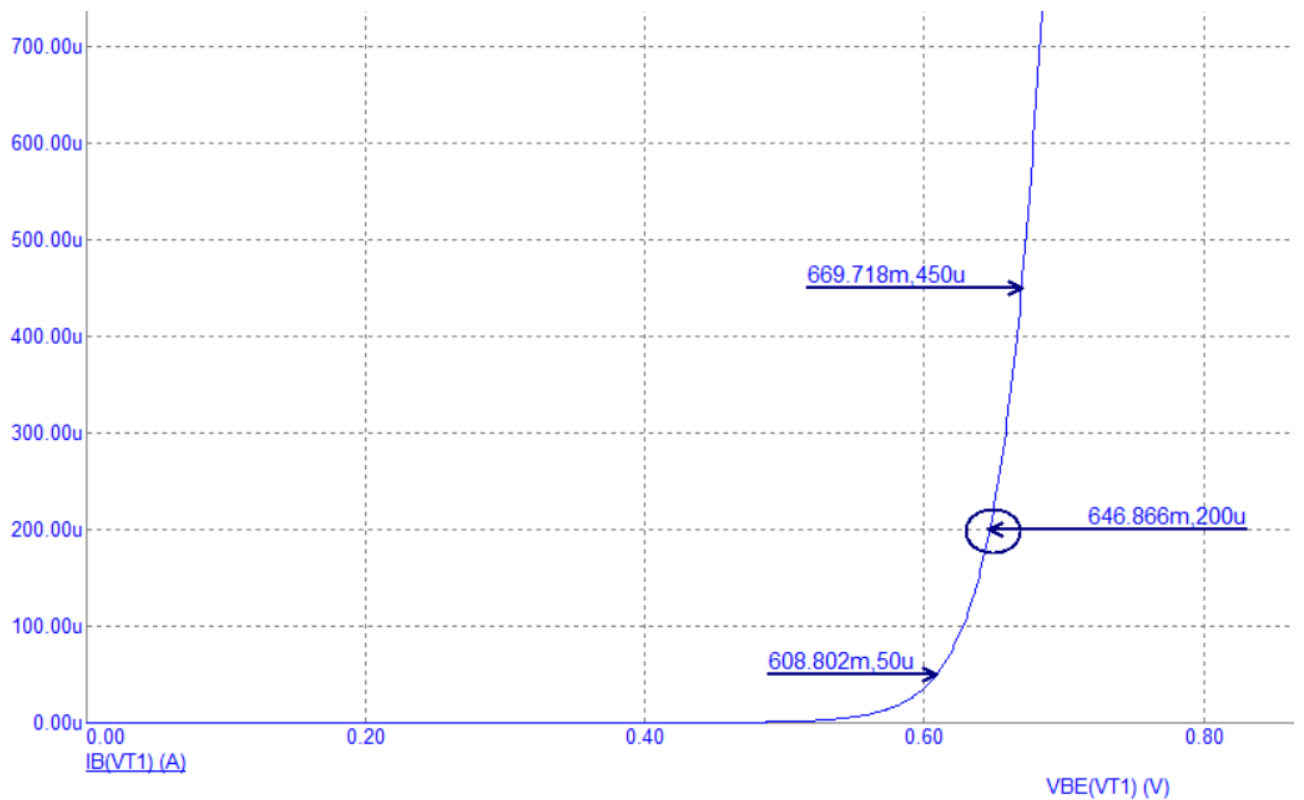


Рисунок А.2 – Входная ВАХ транзистора BC846

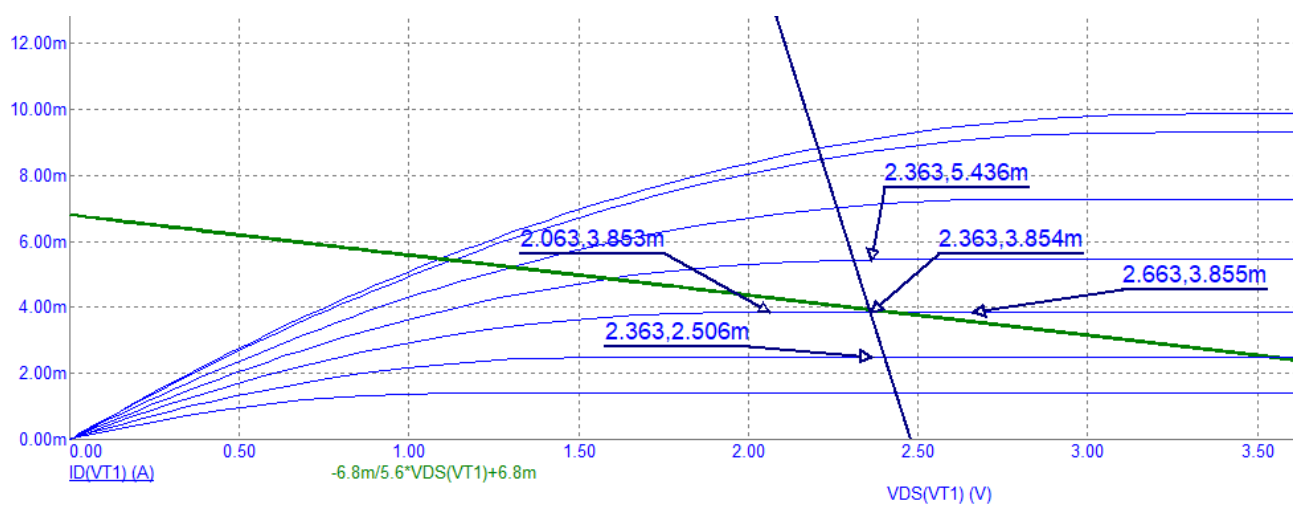


Рисунок А.3 – Стоковые ВАХ полевого транзистора SST4416 с нанесённой рабочей точкой

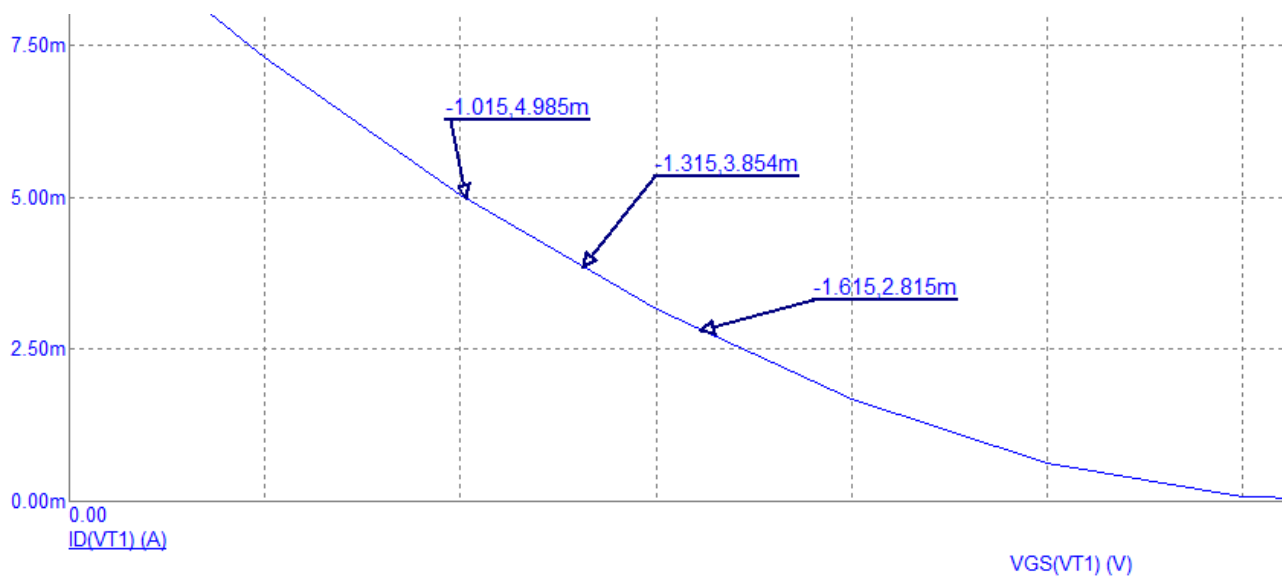


Рисунок А.4 – Стоко-затворная ВАХ транзистора SST4416

Приложение Б (Обязательное) Анализы переходных процессов

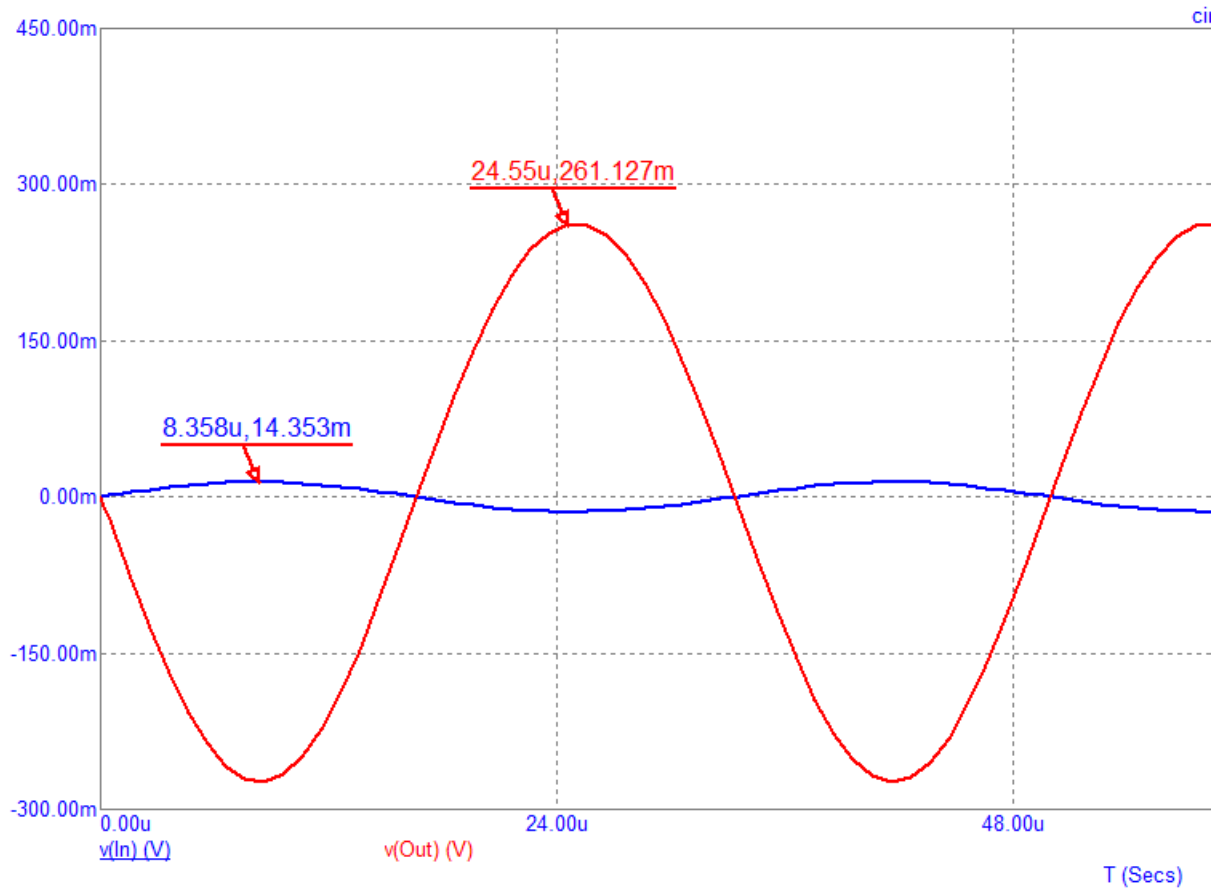


Рисунок Б.1 – Амплитуда входного и выходного сигнала оконечного каскада

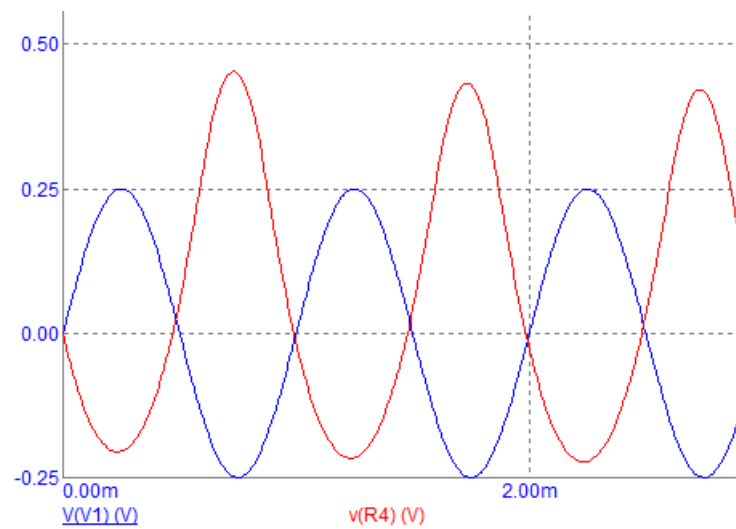


Рисунок Б.2 Амплитуда входного и выходного сигнала предварительного каскада с эмиттерным повторителем

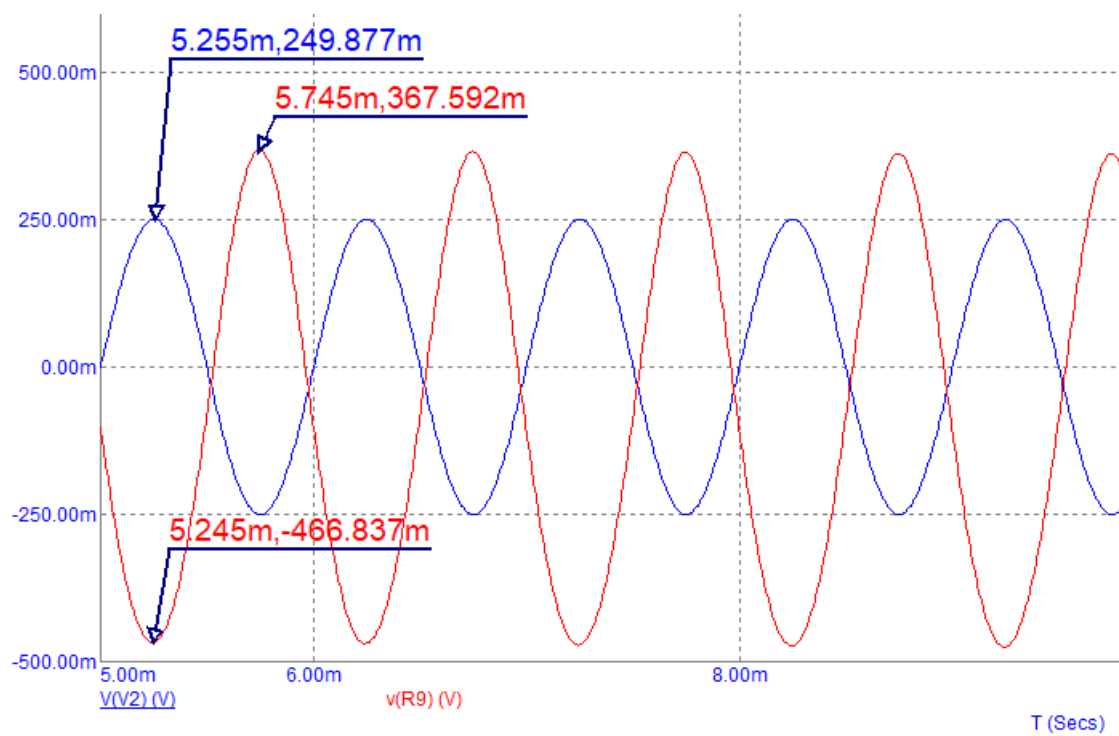


Рисунок Б.3 – Амплитуда входного и выходного сигнала усилителя

Приложение В (Обязательное)

Распределение токов, напряжений и мощностей в усилителе

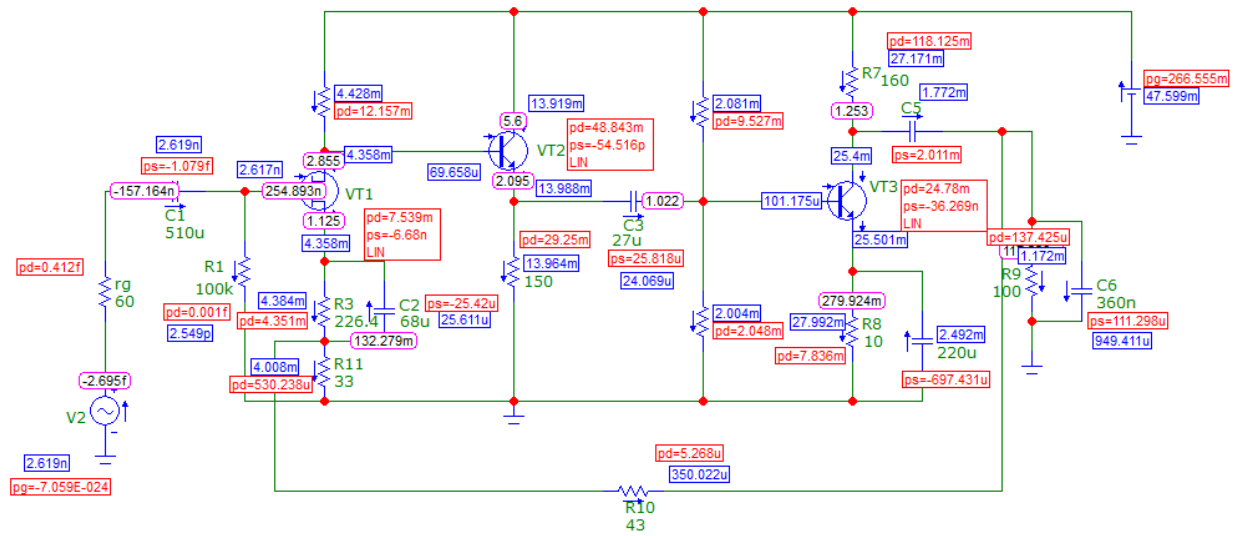
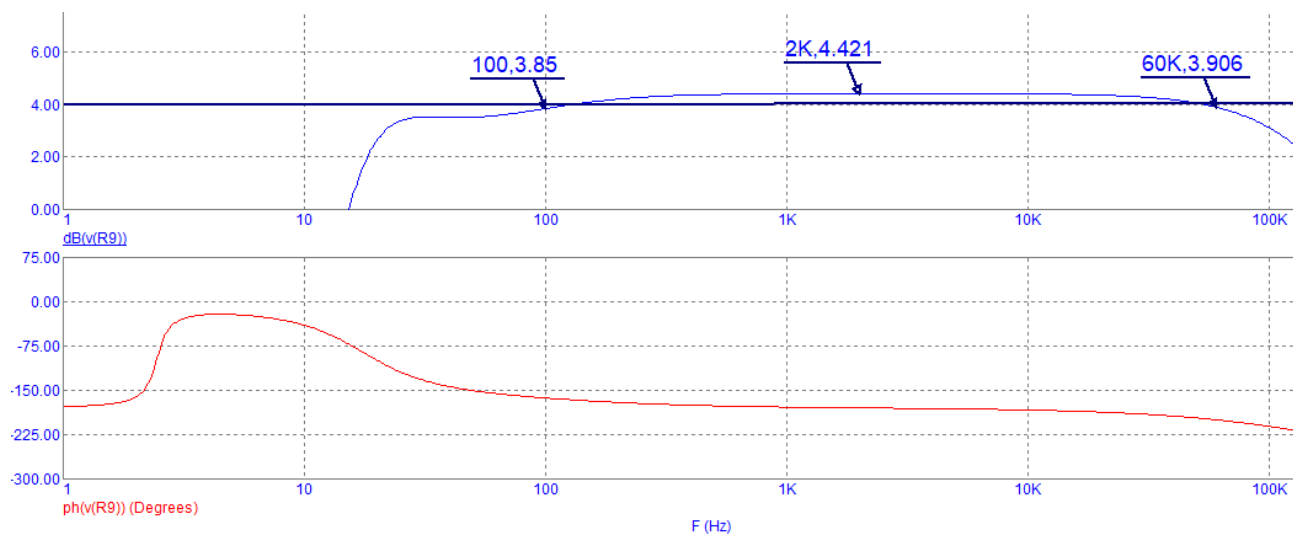


Рисунок В.1 – Распределение токов и узловых потенциалов и мощностей в усилителе

Приложение Г (Обязательное)

АЧХ и ФЧХ усилителя



Приложение Г.1 – АЧХ и ФЧХ усилителя

Приложение Д (Обязательное)
Анализ нелинейных искажений усилителя

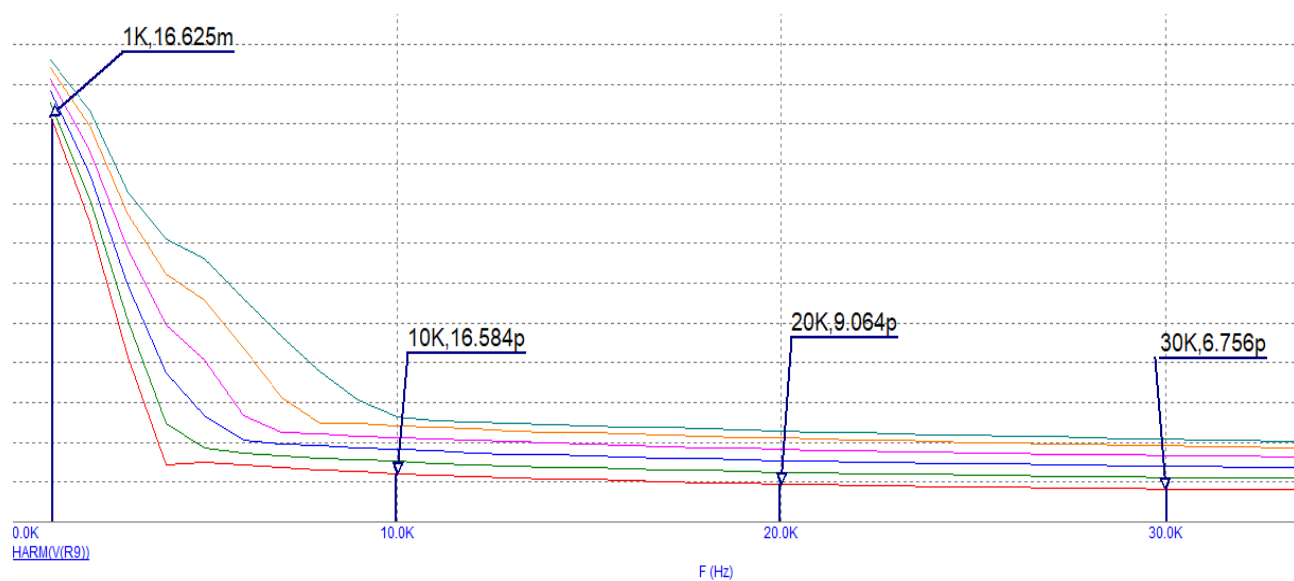


Рисунок Д.1 – Нелинейные искажения усилителя

Приложение Е (Обязательное)**Схема электрическая принципиальная (на отдельных листах)**

Лист 1 – Оконечный каскад усилителя;

Лист 2 – Предварительный каскад усиления с эмиттерным повторителем;

Лист 3 – Усилитель радиоэлектронный (полная схема);

Лист 4 – Перечень элементов.

Перв. проект		КНИР.468731.001 Э3	
Стр. №			

Цепь	Конт.
Вход 1	1
Вход 2	2

GB1

R1

R2

R3

R4

C1

C2

C3

VT1

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Копиробал
Разраб.	Миха Р.Б.				
Проб	Крибин Н.Н.				
Т.контр.					
Нач. отд.					
Н.контр.					
Утв.					

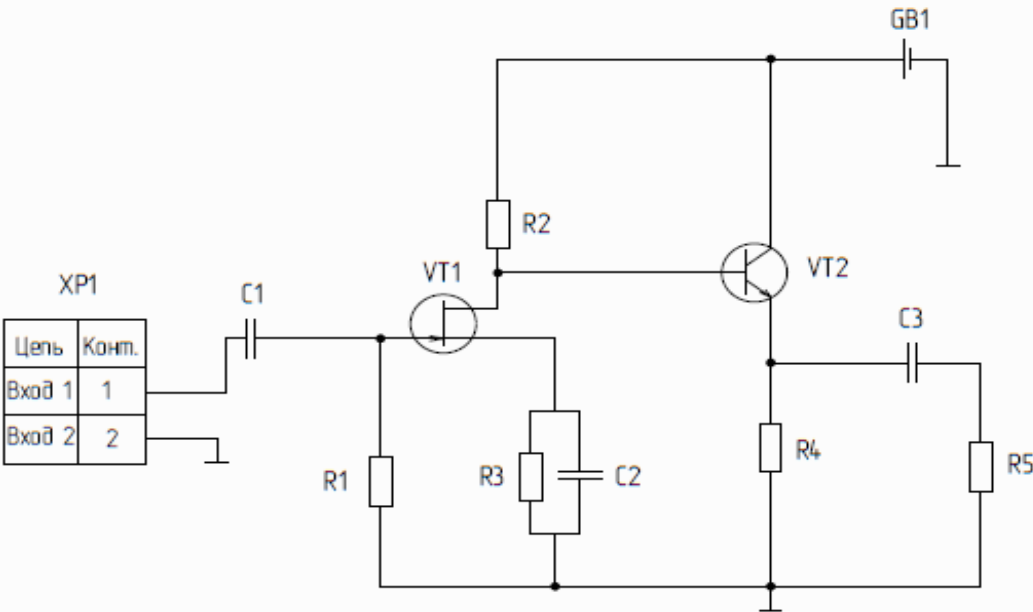
КНИР.468731.001 Э3		
Оконечный каскад усилителя		
Схема электрическая принципиальная		
Лист	Масштаб	Масштаб
Лист 1	Листов 3	
ТУСУР РКФ группа 238-1		

Формат А3

КИПР.468731.001 ЭЗ

Перв. примен.

Стор. №



ХР1	
Цепь	Конт.
Вход 1	1
Вход 2	2

Подп. и дата

Инд. № дубл.

Взам. инд. №

Подп. и дата

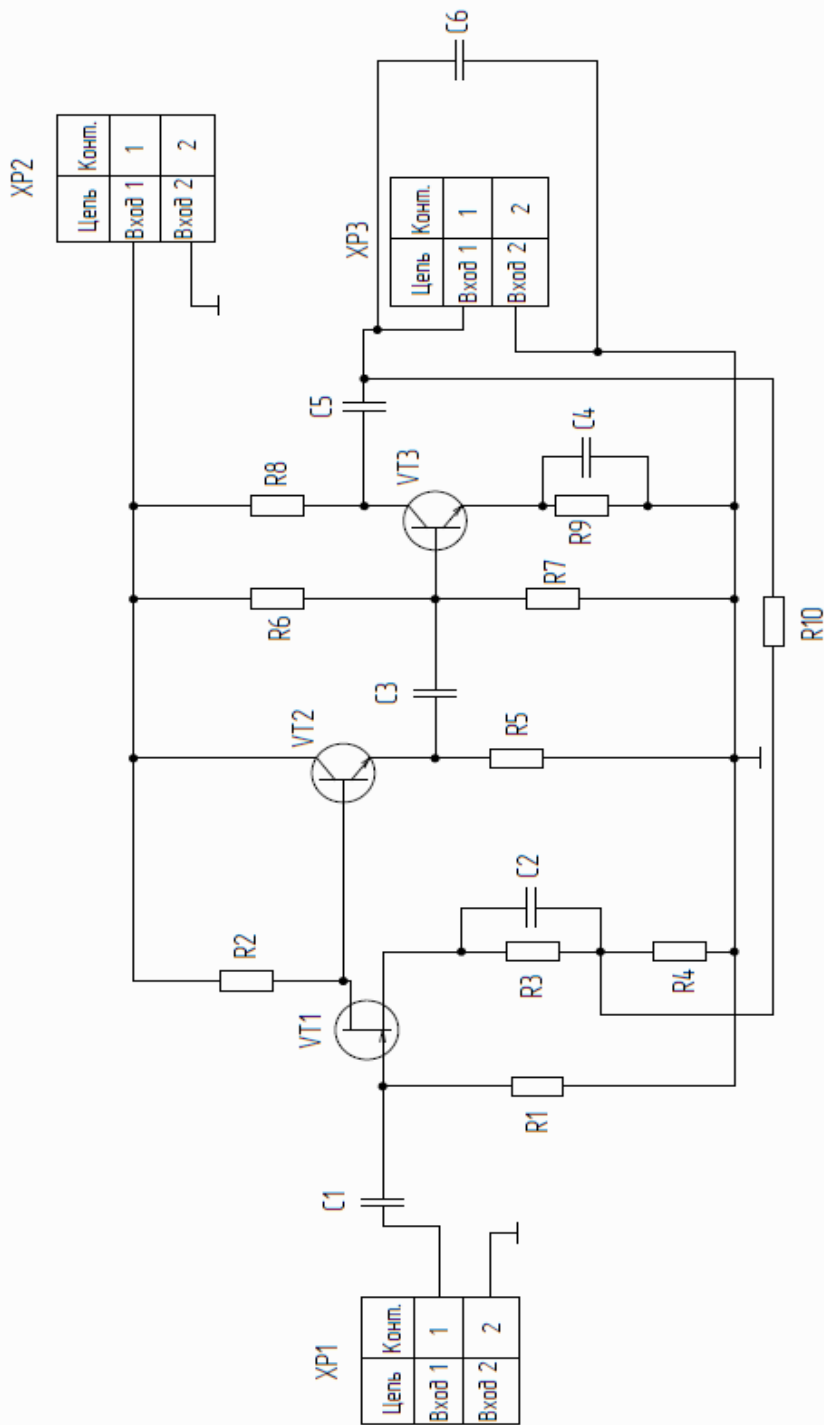
Инд. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Миха Р.Б.			
Проб.	Крибин Н.Н.			
Т.контр.				
Нач. отд.				
Н.контр.				
Утв.				

КИПР.468731.001 ЭЗ

Предварительный каскад
усилителя
Схема электрическая принципиальная

Лит.	Масса	Масштаб
Лист 2	Листов 3	
ТУСУР РКФ группа 238-1		



КИПР.468731.001 ЭЗ

Усилитель радиосигнала
Схема электрическая
принципиальная

ТУСУР РКФ
группа 238-1

Формат А3

[illegible]

Приложение Ж (Обязательное)

Результаты проверки системой АНТИПЛАГИАТ

Отчет о проверке на заимствования №1



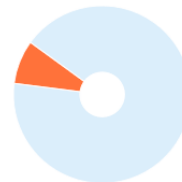
Автор: Black Mr. crawle96@gmail.com / ID: 8431358
 Проверяющий: Black Mr. crawle96@gmail.com / ID: 8431358
 Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://users.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 7
 Начало загрузки: 22.12.2020 16:58:08
 Длительность загрузки: 00:00:02
 Имя исходного файла: Курсовой_проект.PDF
 Название документа: Курсовой_проект
 Размер текста: 38 кБ
 Символов в тексте: 38601
 Слов в тексте: 4140
 Число предложений: 257

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
 Начало проверки: 22.12.2020 16:58:10
 Длительность проверки: 00:00:06
 Комментарий: не указано
 Модули поиска: Модуль поиска Интернет



ЗАИМСТВОВАНИЯ
7,52%

САМОЦИТИРОВАНИЯ
0%

ЦИТИРОВАНИЯ
0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
92,48%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
 Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.
 Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
 Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
 Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.
 Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которому шла проверка, по отношению к общему объему документа.
 Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
 Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	2,77%	1737.Выполнение выпускной квалифицированной работы в 8 семестре Методические указания по ...	http://docme.ru	07 Мая 2017	Модуль поиска Интернет
[02]	0,38%	не указано	https://edu.tusur.ru	07 Авг 2018	Модуль поиска Интернет
[03]	1,3%	2229.Выпускная квалификационная работа учебно-методическое. пособие по подготовке и защите...	http://docme.ru	06 Мая 2017	Модуль поиска Интернет

Еще источников: 17
 Еще заимствований: 3,06%

Рисунок Ж.1 – Результаты проверки курсового проекта