

Министерство образования и науки
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

«Схемотехника и системотехника электронных средств» (СиСЭС)

Пояснительная записка

Студент гр. 1909

_____ Ш. Холмс

Руководитель

доцент каф. КИПР, к.т.н.

_____ Н. Н. Кривин

Томск 2018

Реферат

Курсовой проект, 59 с., 31 рис., 6 таблиц, 15 источников литературы, 6 приложений.

ТРАНЗИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, РАБОЧАЯ ТОЧКА, ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ЧАСТОТНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ, НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ.

Целью курсового проекта является изучение методов проектирования и разработка электронного усилительного устройства в соответствии с данными технического задания. Расчет статистических и динамических параметров электронного усилительного устройства. Закрепление практических навыков схемотехнического моделирования электронных усилительных устройств с помощью соответствующих программных пакетов.

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

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Курсовой проект

УТВЕРЖДАЮ

зав. каф. КИПР

В.М.Карабан

«__» _____ 2149 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на выполнение курсового проекта по курсу СиСЭС

1. Наименование работы: ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ

Таблица 1. Исходные данные к проекту (вариант № 18):

№	Параметр	Значения	Наименование параметра
1	n-p-n(p-n-p)	p-n-p, p-канал	Тип проводимости транзистора
2	$U_{вхм}$, мВ	320	Амплитудное значение входного напряжения
3	R_r , Ом	40	Внутреннее сопротивление источника $U_{вх}$
4	P_n , Вт	0.03	Мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку сопротивлением R_n
5	R_n , Ом	371	Сопротивление нагрузки
6	I_n , мА	9	Ток, отдаваемый усилителем в нагрузку сопротивлением R_n
7	t°_{max} , °C	+ 60	Максимальная рабочая температура
8	f_n , Гц и f_v , Гц	35 – 70000	Нижняя и верхняя частота усиливаемого сигнала в полосе Δf
9	$M_{очн}(\omega_n)$, $M_{осв}(\omega_v)$	0.74 – 0.74	Коэффициенты частотных искажений амплитудно-частотной характеристики усилителя, задаваемые при значениях нижней $\omega_n=2\pi f_n$, и верхней $\omega_v=2\pi f_v$

2. Оформить работу в соответствии с требованиями ОСТ ТУСУР 2013.01.

3. Отчёт должен содержать:

3.1. Титульный лист.

3.2. Реферат.

3.3. Задание на работу.

3.4. Содержание.

3.5. Введение. Приводятся краткие сведения о работе, виде продукции или решаемых задачах.

3.6. Основная часть отчета.

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. Изъюрова Г.И., Королев Г.В. и др. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Р24 Учебное пособие для вузов. – Москва «Высшая школа», 1987. – 335 с.

8. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника: Москва Горячая линия-Телеком, 2000. – 464 с.

9. 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:

_____ Н.Н. Кривин

«2» октября 2017 г.

Задание принял к исполнению:

_____ Ш.Холмс

«2» октября 2017 г.

Оглавление

1. Введение.....	8
2. Теоретическая часть.....	9
2.1. Биполярный транзистор	9
2.2. Полевой транзистор	10
2.3. Усилитель	11
3. Расчет схемы электрической принципиальной	14
3.1. Расчет оконечного каскада	14
3.1.1. Предварительный выбор рабочей точки	14
3.1.2. Выбор транзистора	15
3.1.3. Нанесение рассчитанной рабочей точки, линий статической и динамической нагрузки на выходные ВАХ выбранного транзистора	16
3.1.4. Выбор оптимальной рабочей точки.....	19
3.1.5. Определение коэффициента усиления по току	20
3.1.6. Определение входного сопротивления транзистора.....	21
3.1.7. Расчет элементов фиксации рабочей точки	22
3.1.8. Предварительный расчёт коэффициента усиления.....	22
3.1.9. Временной анализ рассчитанного оконечного каскада	24
3.1.10. Частотный анализ оконечного каскада	25
3.1.11. Оценка нелинейных искажений оконечного каскада	27
3.2. Расчет входного каскада на полевом транзисторе.....	28
3.2.1. Выбор полевого транзистора.....	29
3.2.2. Выбор рабочей точки на выходной ВАХ транзистора.	29
3.2.3. Расчет элементов фиксации рабочей точки	30
3.2.4. Расчет крутизны полевого транзистора	31
3.2.5. Расчет требуемого сопротивления нагрузки.....	32
3.2.6. Расчет эмиттерного повторителя	33
3.2.7. Расчет делителя напряжения	34
3.2.8. Расчет сопротивлений каскадов	35
3.2.9. Временной анализ выходного каскада	36
3.3. Согласование каскадов и моделирование усилителя	37
3.3.1. Расчет цепи обратной связи.....	37
3.3.2. Расчет емкостных элементов.....	38
3.3.3. Временной анализ трехкаскадного усилителя.....	39
3.3.4. Частотный анализ трехкаскадного усилителя	40
3.3.5. Оценка КНИ трехкаскадного усилителя	41
3.3.6. Моделирование усилителя с элементами из ряда E24.....	42
4. Заключение	44

Список используемой литературы	45
Приложение А (обязательное)	46
Приложение Б (обязательное).....	48
Приложение В (обязательное)	50
Приложение Г (обязательное).....	52
Приложение Д (обязательное)	53
Приложение Е (обязательное)	54

1. Введение

Для повышения качества продукции и услуг на предприятиях активно внедряются электронные средства специального назначения. При решении многих инженерных задач, например, при измерении электрических и неэлектрических величин, контроле и автоматизации технологических процессов, построении радиотехнических устройств и медицинских приборов, возникает необходимость в усилении электрических сигналов

В качестве объектов проектирования предлагаются различные структуры многокаскадных усилительных устройств переменного тока с обратными связями. Для этой цели служат электронные усилители – устройства, позволяющие увеличить амплитуду электрического сигнала без изменения его формы и частотного спектра. Увеличение амплитуды сигнала происходит за счет энергии источника питания.

Как видно из определения, суть процесса усиления электрических сигналов состоит в преобразовании энергии источника питания усилителя в энергию выходного сигнала по закону, определяемому входным управляющим воздействием. Этот процесс осуществляется при помощи управляемого нелинейного элемента.

Рисунок 2.2 – Принцип работы биполярного транзистора

Различают четыре режима работы биполярного транзистора:

- 1 – активный режим;
- 2 – режим отсечки;
- 3 – режим насыщения;
- 4 – инверсный режим.

Активный режим: Данный режим является основным режимом работы транзистора и применяется для усиления сигнала по мощности. В этом режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном.

Режим отсечки: Биполярный транзистор в этом режиме закрыт, через р-п-переходы протекают небольшие обратные токи. Эмиттерный и коллекторный переходы смещены в обратном направлении.

Режим насыщения: Биполярный транзистор в данном режиме полностью открыт, ток в цепи коллектора максимален и практически не регулируется током входной цепи.

Инверсный режим: Данный режим не соответствует нормальным условиям эксплуатации транзистора. В этом режиме эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный – в прямом[1].

Так же разливают три возможные схемы включения биполярных транзисторов:

- с общей базой (ОБ);
- с общим эмиттером (ОЭ);
- с общим коллектором (ОК).

2.2. Полевой транзистор

Полевой транзистор (ПТ) – это полупроводниковый прибор, в котором ток создаётся основными носителями заряда полупроводника под действием продольного электрического поля, а управление величиной тока осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым напряжением, проложенным к управляющему р-п-переходу.

Все полевые транзисторы по своим конструкторским особенностям можно разделить на две группы:

- ПТ с управляющим р-п-переходом – ПТУП (канальные транзисторы);
- ПТ с изолированным затвором, или МОП-транзисторы (структура: металл-окисел-полупроводник) или МДП-транзисторы (структура: металл-диэлектрик-полупроводник).

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.

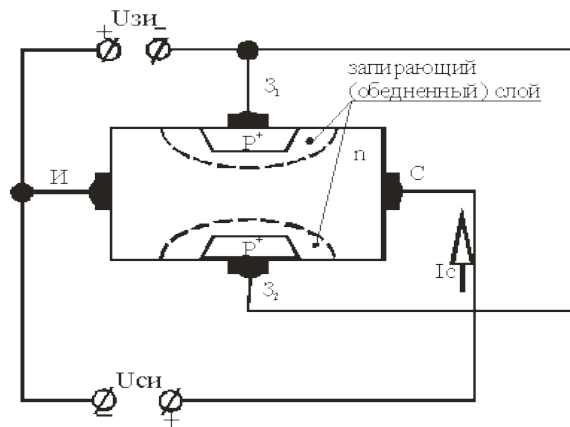


Рисунок 2.3 – Устройство полевого транзистора с управляющим р-п-переходом (каналом п- типа)

- Усилитель напряжения – выходное сопротивление много меньше сопротивления нагрузки;

- Усилитель тока – выходное сопротивление много больше сопротивления нагрузки

- Усилитель мощности – выходное сопротивление согласовано с сопротивлением нагрузки. При этом мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку, будет максимальна.

3. По типу цепей связи:

- С гальванической связью или связью по постоянному току (усилителя постоянного тока, балансные усилители, дифференциальные усилители, операционные усилители);

- С емкостной связью, т.е. связью с помощью RC-цепей;

- С трансформаторной связью;

4. По виду усиливаемых сигналов:

- Усилители непрерывных сигналов;

- Усилители видеосигналов или импульсных сигналов;

5. По назначению и месту в многокаскадных усилителях:

- Предварительные;

- Промежуточные или буферные;

- Оконечные или выходные.

Основные параметры и характеристики усилителей.

Существуют показатели, по которым оценивается работа всего усилителя (или функционально законченных отдельных каскадов) в целом. Данные параметры зависят не только от свойств, применяемых в усилителе транзисторов, но и от качества самой принципиальной схемы и точности ее настройки.

К числу основных электрических показателей, характеризующих работу усилителя, относятся:

коэффициент передачи – это функция, определяемая как отношение выходного сигнала усилителя к его входному сигналу. При рассмотрении схем, которые не вносят с усиливаемый сигнал амплитудных искажений и фазовых сдвигов, различают несколько коэффициентов усиления (усиление по напряжению, току и мощности).

частотные характеристики усилителя:

амплитудно-частотная характеристика – это зависимость модуля коэффициенты усиления от частоты усиливаемого сигнала;

фазочастотная характеристика – это зависимость фазы комплексного коэффициента передачи от частоты зависимости разности фаз выходного и входного сигналов от частоты;

нелинейные искажения усилителя – это отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала;

динамический диапазон сигнала – отношение наибольшего допустимого значения амплитуды входного напряжения к ее наименьшему допустимому значению [1].

3. Расчет схемы электрической принципиальной

3.1. Расчет оконечного каскада

Расчет действующего напряжения на нагрузке производится по формуле (3.1)

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

где U_H – напряжение на нагрузке

R_H – сопротивление нагрузки

I_H – ток на нагрузке

$$U_H = I_H \cdot R_H = 0.009 \cdot 371 = 3.3 \text{ В}$$

Амплитудные значения на нагрузке вычисляются по действующим значениям:

$$U_{Hm} = \sqrt{2} \cdot U_H, \quad (3.2)$$

$$I_{Hm} = \sqrt{2} \cdot I_H \quad (3.3)$$

По формулам (3.2), (3.3):

$$U_{Hm} = \sqrt{2} \cdot U_H = \sqrt{2} \cdot 3.3 = 4.7 \text{ В}$$

$$I_{Hm} = \sqrt{2} \cdot I_H = \sqrt{2} \cdot 0.009 = 0.013 = 13 \text{ мА}$$

3.1.1. Предварительный выбор рабочей точки

Выбор рабочей точки (РТ) транзистора в режиме покоя сводится к выбору тока коллектора покоя и напряжения коллектор эмиттер покоя [1,2]

Для режима класса А координаты рабочей точки должны удовлетворять неравенствам:

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

$$I_{КА} \geq \frac{I_{Hm}}{k_3}, \quad (3.5)$$

где $U_{КЭА}$ – напряжение коллектор эмиттер рабочей точки

$U_{КЭ\min}$ – напряжение насыщения

$I_{КА}$ – ток коллектора рабочей точки

k_3 – коэффициент запаса ($0.7 \div 0.95$)

Для маломощных транзисторов $U_{KЭ\min}$ рекомендуется взять ($1 \div 2.5$), для мощных ($2.5 \div 4$). Напряжение питания определяется соотношением:

$$E_{II} \geq 2 \cdot U_{KЭA} \quad (3.6)$$

Координаты рабочей точки, рассчитанные по (3.4), (3.5) равны:

$$U_{KЭA} \geq |U_{Hm} + U_{KЭ\min}| = 4.7 + 1 = 5.7V$$

$$I_{KA} \geq \frac{I_{Hm}}{k_3} = \frac{0.013}{0.7} = 0.018 = 18mA$$

Напряжение питания, рассчитанное по формуле (3.6) округляется до большего напряжения, находящегося в стандартном ряду напряжений питания.

$$E_{II} \geq 2 \cdot U_{KЭA} = 2 \cdot 5.7 = 11.4 \Rightarrow 12.6V$$

3.1.2. Выбор транзистора

Для выбора транзистора необходимо предварительно оценить максимальную рассеиваемую мощность на коллекторе по формуле (3.7)

$$P_K = I_{KA} \cdot U_{KЭA} = 5.7 \cdot 0.018 = 0.1Вт \quad (3.7)$$

При выборе транзистора следует руководствоваться условиями, приведенными в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Условия выбора транзистора

Рассчитанные значения	Условие выбора	Предельно допустимые значения из справочника
Мощность на коллекторе транзистора	<	Максимальная мощность на коллекторе транзистора
Напряжение питания	<	Напряжение коллектор эмиттер максимальное
Максимальный ток коллектора $I_{K\max} = 2 \cdot I_{KA}$	<	Максимальный ток коллектора
$f_{\max} = 10 \cdot f_B$ Верхняя	<	Граничная частота
Тип проводимости		p-n-p/n-p-n

Был выбран транзистор BD140, аналог отечественного КТ814Г [3,4] сравнение его максимально допустимых параметров с расчетными приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры выбранного транзистора BD140

Параметр	Рассчитанный параметр	Максимально допустимый параметр из справочника
Мощность коллектора	0.1Вт	1.25Вт без радиатора 12Вт с радиатором
Ток коллектора	0.036А	1А
Напряжение коллектор эмиттер	12.6	80В
Граничная частота	700КГц	50МГц
Структура	p-n-p	

3.1.3. Нанесение рассчитанной рабочей точки, линий статической и динамической нагрузки на выходные ВАХ выбранного транзистора

В качестве программного пакета для моделирования была выбрана среда MicroCap[5,6]. Для построения выходных ВАХ транзистора был проведен анализ на постоянном токе. Электрическая схема для анализа приведена на рисунке 3.1.

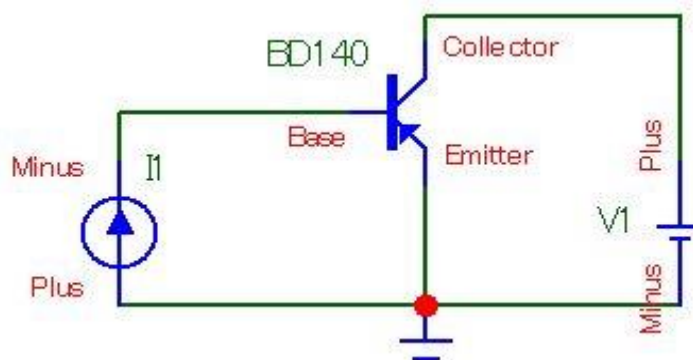


Рисунок 3.1 – Схема для построения выходных ВАХ

Для построения статической и динамической линии нагрузки $I_K = f(U_{КЭ})$ на выходные ВАХ наносятся две точки[7]. Для статической линии точка А наносится при $U_{КЭ} = 0$, режим короткого замыкания. Точка В при режиме холостого хода $I_K = 0$, $U_{КЭ} = E_{П}$. В динамическом режиме точка А рассчитывается аналогично статическому режиму, а точка В берется равной рассчитанной РТ. Для расчета тока коллектора в режиме короткого замыкания применяется формула (3.8):

$$I_K = \frac{E_{II}}{R_{Hобц}}, \quad (3.8)$$

где $R_{Hобц} = R_K + R_Э$ для статической линии

$R_{Hобц} = R_K \parallel R_H$ для динамической линии

$R_{Hобц}$ – общее сопротивление нагрузки

R_K – сопротивление коллекторной цепи

$R_Э$ – сопротивление эмиттерной цепи

R_H – сопротивление нагрузки

Расчет $R_K, R_Э$ производится по формулам (3.9), (3.10)

$$R_K = \frac{E_{II} - U_{КЭА}}{I_{КА}}, \quad (3.9)$$

$$R_Э = (0.1 \div 0.3) \cdot R_K \quad (3.10)$$

Для рассчитанной рабочей точки в разделе 3.1.1, $R_K, R_Э$ по формулам (3.9), (3.10) будут соответственно равны:

$$R_K = \frac{E_{II} - U_{КЭА}}{I_{КА}} = \frac{12.6 - 5.7}{0.018} = 383 \text{ Ом},$$

$$R_Э = 0.1 \cdot 383 = 38 \text{ Ом}$$

По формуле (3.8) ток коллектора в режиме короткого замыкания для статической и динамической линии нагрузки будет равен:

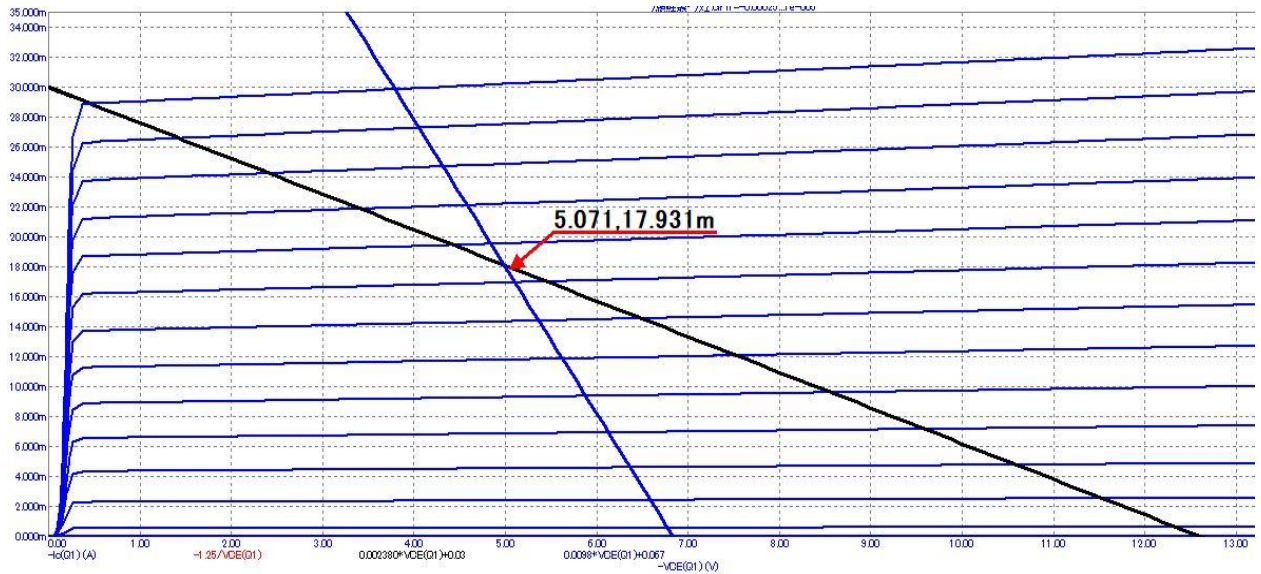
$$I_K = \frac{E_{II}}{R_{Hобц}} = \frac{12.6}{383 + 38} = 0.03 = 30 \text{ мА}$$

$$I_K = \frac{E_{II}}{R_{Hобц}} = \frac{12.6 \cdot (383 + 371)}{383 \cdot 371} = 0.067 = 67 \text{ мА}$$

Известно, что уравнение прямой проходящей через две точки есть [8]:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

Подставив координаты точек и сделав преобразования, получим уравнения линий нагрузки, которые заносятся в MicroCap для построения. На рисунке 3.2 приведена выходная ВАХ с отмеченной РТ и нанесенными линиями нагрузки.



синяя – динамическая линия нагрузки; черная – статическая линия нагрузки
Рисунок 3.2 – Выходные ВАХ с линиями нагрузки и отмеченной РТ

На рисунке 3.2 при $I_K = I_{KA}$ уточнено положение РТ, $U_{KЭA} = 5В$.

Согласно режиму работы усилителя класса А должны соблюдаться неравенства [1] формулы (3.11), (3.12), рисунок 3.3:

$$U_{KЭmax} \geq U_{KЭA} + U_{Hm}, \quad (3.11)$$

$$U_{KЭmin} \leq U_{KЭA} - U_{Hm} \quad (3.12)$$

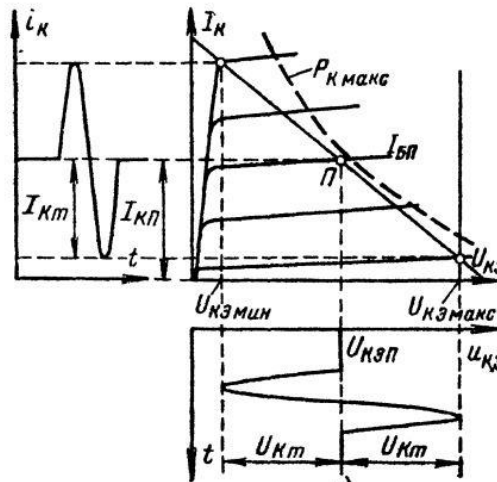


Рисунок 3.3 – Правильный выбор РТ

Для РТ рассчитанной в разделе 3.1.1 соответственно:

$$U_{KЭmax} \geq 5 + 4.7 \geq 9.7В, \quad (3.13)$$

$$U_{KЭmin} \leq 5 - 4.7 \leq 0.3В$$

Как видно на рисунке 3.2, $U_{KЭ\max} = 6.8 \text{ В}$, что не соответствует рассчитанному (3.13). Из этого следует необходимость переноса рабочей точки и выбор большего напряжения питания.

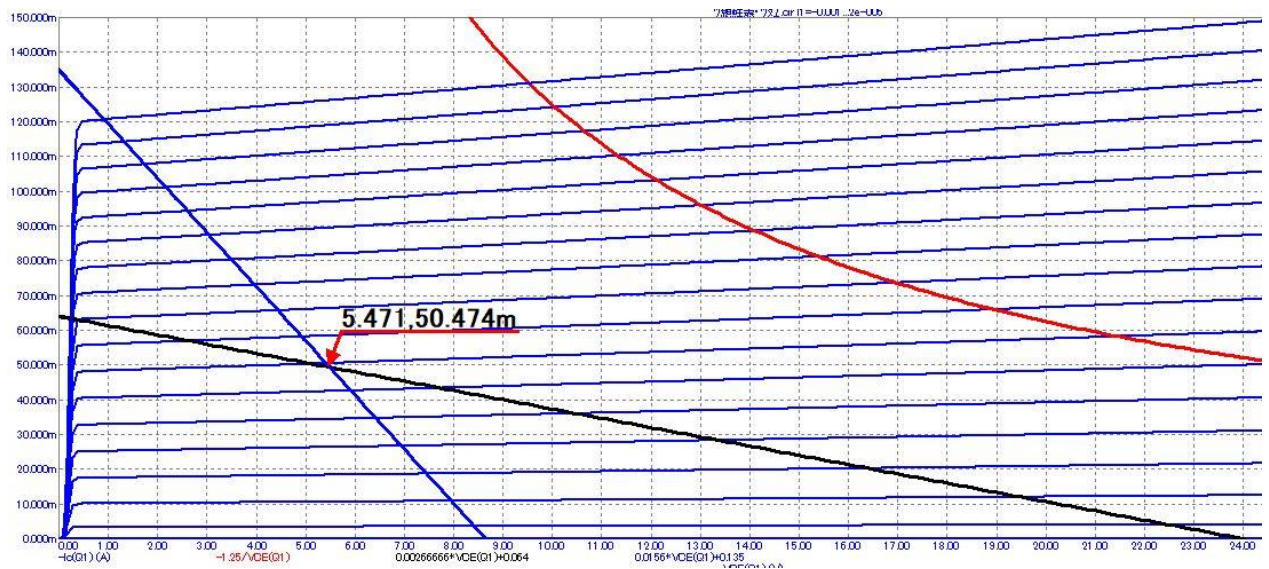
3.1.4. Выбор оптимальной рабочей точки

Для второй рабочей точки были определены следующие параметры:

$$U_{KЭА} = 7 \text{ В}, I_{КА} = 50 \text{ мА}$$

По формуле (3.6) $E_{II} = 24$, по формулам (3.9), (3.10) $R_K = 340, R_9 = 34$.

По формуле (3.8) токи коллектора будут равны 64 мА – для статической линии нагрузки, 135 мА – для динамической. На рисунке 3.4 приведена ВАХ с данной РТ.



синяя – динамическая линия нагрузки; черная – статическая линия нагрузки;
красная – линия максимально допустимой рассеиваемой мощности

Рисунок 3.4 – Выходная ВАХ со второй рабочей точкой

Для РТ отмеченной на рисунке 3.4 по формулам (3.11), (3.12):

$$U_{KЭ\max} \geq 5.4 + 4.7 \geq 10.01 \text{ В}, \quad (3.14)$$

$$U_{KЭ\min} \leq 5.4 - 4.7 \leq 0.7 \text{ В}$$

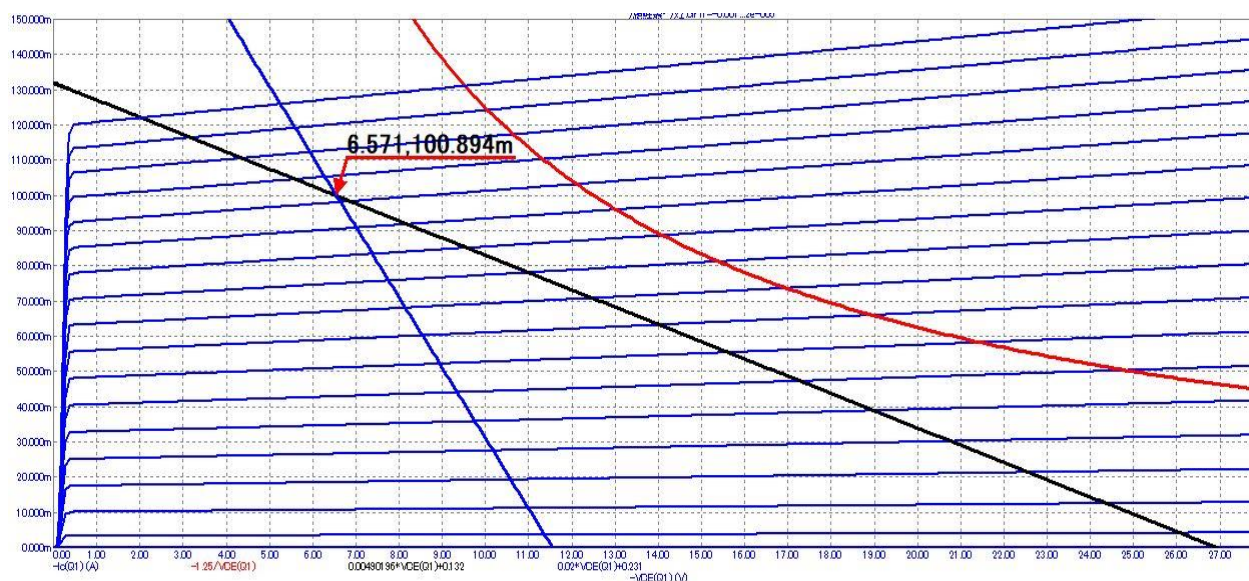
Как видно на рисунке 3.4, $U_{KЭ\max} = 8.6 \text{ В}$, что не соответствует расчётному (3.14). Из этого следует что требуется перенос рабочей точки и выбор большего напряжения питания.

Для следующей РТ были заданы и рассчитаны новые параметры:

$$U_{KЭА} = 10 \text{ В}, I_{КА} = 100 \text{ мА}$$

По формуле (3.6) $E_{II} = 27$, по формулам (3.9), (3.10) $R_K = 170, R_9 = 34$ соответственно.

По формуле (3.8) токи коллектора будут равны 132мА – для статической линии нагрузки, 231мА – для динамической. На рисунке 3.5 приведена ВАХ с данной РТ.



синяя – динамическая линия нагрузки; черная – статическая линия нагрузки;
красная – линия максимально допустимой рассеиваемой мощности

Рисунок 3.5 – ВАХ с окончательной РТ

Для РТ отмеченной на рисунке 3.5 по формулам (3.11), (3.12):

$$U_{KЭ\max} \geq 6.5 + 4.7 \geq 11.2\text{В}, \quad (3.15)$$

$$U_{KЭ\min} \leq 6.5 - 4.7 \leq 1.8\text{В}$$

Как видно на рисунке 3.4, $U_{KЭ\max} = 11.5\text{В}$, неравенство (3.15) соблюдается, данную РТ можно считать окончательной.

3.1.5. Определение коэффициента усиления по току

$\beta = h_{210Э}$ можно определить графически и рассчитать по формуле (3.16), рисунок 3.6.

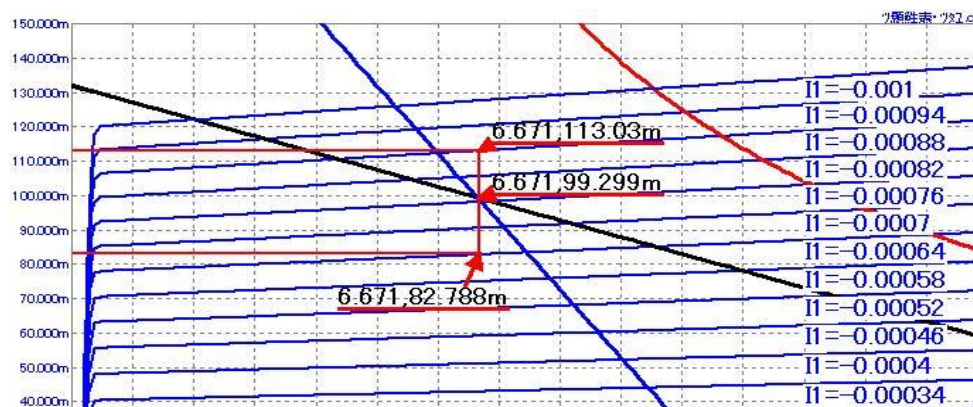


Рисунок 3.6 – Определение β

$$h_{2109} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}, \quad (3.16)$$

$$h_{2109} = \frac{0.113 - 0.083}{0.00088 - 0.00064} = 130 \quad (3.17)$$

3.1.6. Определение входного сопротивления транзистора

Для определения h_{109} требуется построить входные характеристики. Электрическая схема для анализа приведена на рисунке 3.7

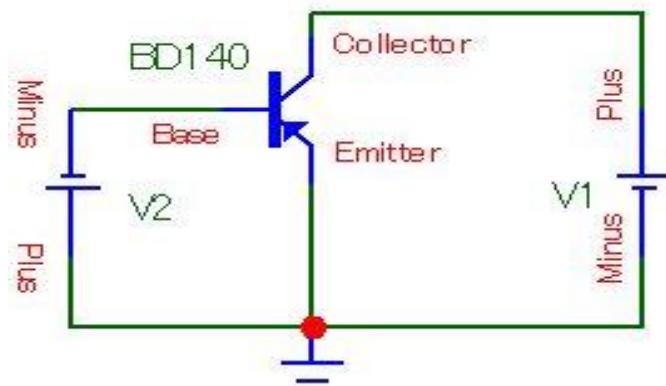


Рисунок 3.7 – Схема для снятия входных ВАХ

На входной характеристике выбирается максимально прямой участок вблизи тока базы РТ (рисунок 3.8) и находится разница напряжений база эмиттер, и соответствующая им разница токов базы. Ток базы рабочей точки можно определить по рисунку 3.6, он равен $I_{BA} = 760 \mu\text{A}$.

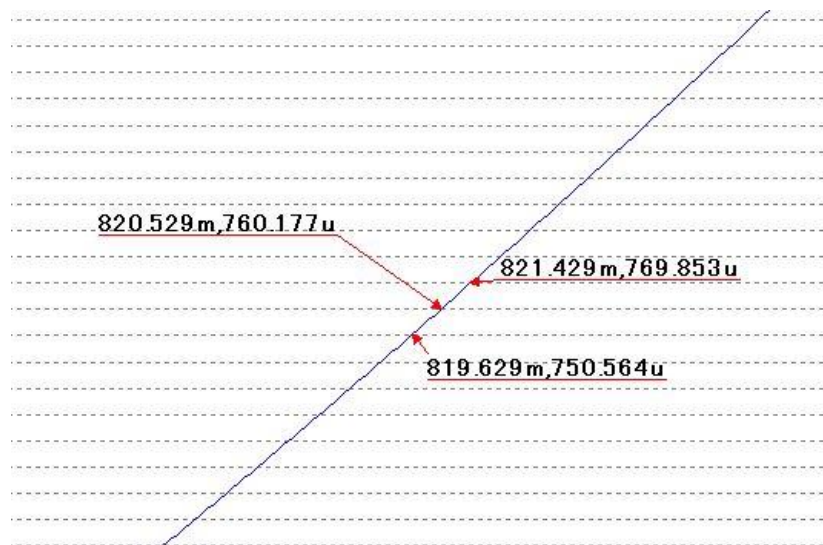


Рисунок 3.8 – Входная ВАХ с РТ

Входное сопротивление транзистора определяется по формуле (3.18):

$$h_{110Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б}, \quad (3.18)$$

где $\Delta U_{БЭ}$ – разность напряжений база эмиттер

$\Delta I_Б$ – разность токов базы

$$h_{110Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б} = \frac{0.821429 - 0.819629}{0.0007505 - 0.00076985} = 93.3 \text{ Ом}$$

$$U_{БЭА} = 820 \text{ мВ}$$

3.1.7. Расчет элементов фиксации рабочей точки

Фиксация рабочей точки производится базовым делителем состоящим из резисторов R_1, R_2 рассчитывающихся по формулам (3.19), (3.20) в соответствии с алгоритмом, взятым из [2]

$$R_2 = \frac{I_{ЭП} \cdot R_Э + |U_{БЭП}|}{I_Д}, \quad (3.19)$$

где $I_{ЭП}$ – ток эмиттера покоя $I_{ЭП} = I_{БП} + I_{КП}$

$I_Д$ – ток делителя $I_Д = (5 \div 10) \cdot I_{БП}$

$$R_1 = \frac{E_П - I_Д \cdot R_2}{I_Д + I_{БП}} \quad (3.20)$$

$$R_2 = \frac{I_{ЭП} \cdot R_Э + |U_{БЭП}|}{I_Д} = \frac{0.10076 \cdot 34 + 0.82}{0.00684} = 620 \text{ Ом}$$

$$R_1 = \frac{E_П - I_Д \cdot R_2}{I_Д + I_{БП}} = \frac{27 - 0.00684 \cdot 620}{0.00684 + 0.00076} = 2994 \text{ Ом}$$

3.1.8. Предварительный расчёт коэффициента усиления

Необходимый коэффициент усиления рассчитывается по формуле (3.21) с использованием данных, приведенных в ТЗ.

$$K_{УОС} = \frac{U_{Hm}}{U_{BXm}} \quad (3.21)$$

Окончательный коэффициент усиительного каскада без отрицательной обратной связи рассчитывается по формуле (3.22) из [1].

$$K_U = \left| -\beta \cdot \frac{R_K \parallel R_H}{\left(\frac{h_{11}}{R_E} + 1 \right) \cdot R_T + h_{11}} \right|, \quad (3.22)$$

где $R_E = R_1 \parallel R_2$

По формулам (3.21) и (3.22) коэффициенты усиления будут соответственно равны:

$$K_{UOC} = \frac{U_{Hm}}{U_{BXm}} = \frac{4.7}{0.32} = 14.7$$

$$K_U = \left| -\beta \cdot \frac{R_K \parallel R_H}{\left(\frac{h_{11}}{R_E} + 1 \right) \cdot R_T + h_{11}} \right| = \left| -130 \cdot \frac{116}{\left(\frac{93}{513} + 1 \right) \cdot 40 + 93} \right| = 107$$

Как видно из расчётов, коэффициент усиления конечного каскада во много раз превосходит необходимый. Для удаления избытка усиления необходимо ввести отрицательную, параллельную обратную связь по напряжению[9]. Резистор в цепи обратной связи рассчитывается по формуле (3.23), а β рассчитывается по формуле (3.22)

$$\beta = \frac{K_U - K_{UOC}}{K_U \cdot K_{UOC}}, \quad (3.23)$$

$$R_{OC} = \frac{R_T \cdot (1 - \beta)}{\beta} \quad (3.24)$$

Для коэффициентов усиления рассчитанных по формулам (3.21) и (3.22) β будет равна:

$$\beta = \frac{K_U - K_{UOC}}{K_U \cdot K_{UOC}} = \frac{107 - 14.7}{107 \cdot 14.7} = 0.05$$

Выполнив подстановку рассчитанной β в формулу (3.21) сопротивление резистора обратной связи будет равно:

$$R_{OC} = \frac{R_T \cdot (1 - \beta)}{\beta} = \frac{40 \cdot (1 - 0.05)}{0.05} = 760 \text{ Ом}$$

3.1.9. Временной анализ рассчитанного оконечного каскада

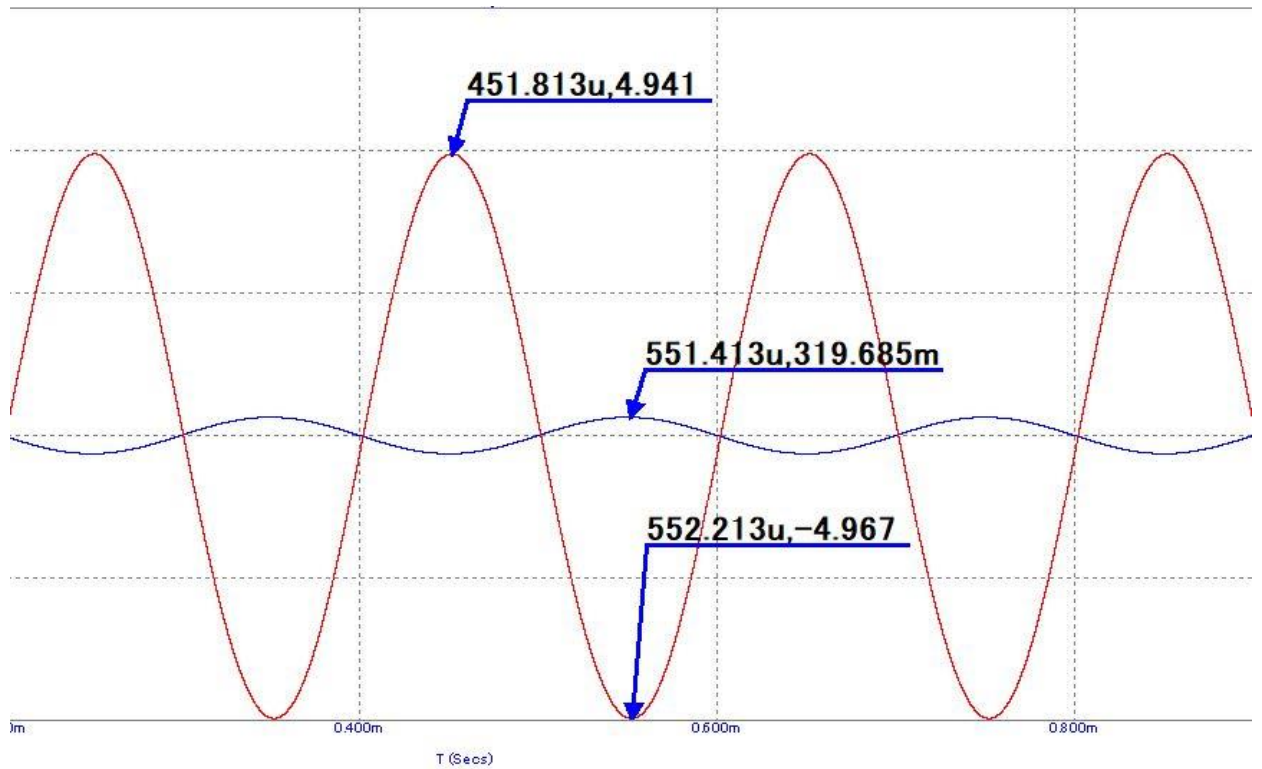


Рисунок 3.9 – Входная и выходная амплитуда сигнала рассчитанного каскада

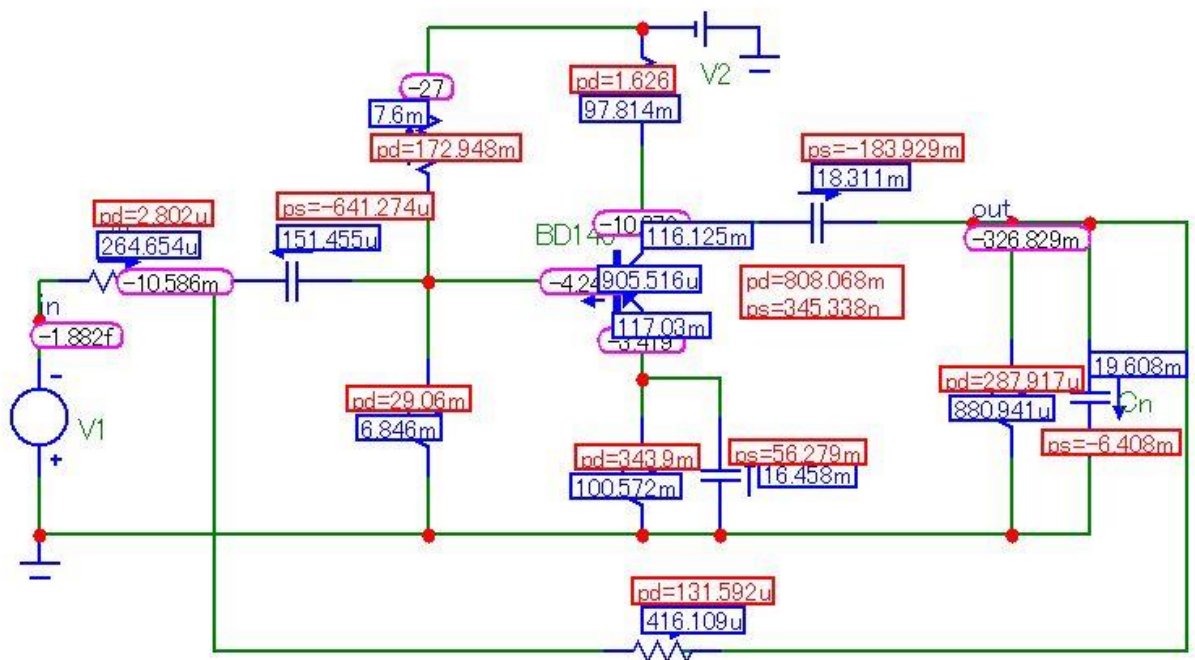


Рисунок 3.10 – Токи, напряжения и мощности во временном анализе

Как видно на рисунке 3.9, амплитуда напряжения на нагрузке приблизительно равна заданному по ТЗ, из чего можно сделать вывод, что для выполнения технического задания достаточно одного каскада на биполярном транзисторе с коэффициентом усиления по напряжению равным 14,7.

3.1.10. Частотный анализ оконечного каскада

Для проведения частотного анализа требуется произвести расчет разделительных емкостей, а также конденсатора, шунтирующего резистор эмиттера на переменном токе. Данные расчеты будут проводиться по формулам (3.25), (3.26), (3.27) взятым из источника[10]

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_{\Gamma} + R_{BX}) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}}, \quad (3.25)$$

где C_1 – разделительная емкость на входе каскада

f_n – нижний предел частоты, заданный по ТЗ

R_{Γ} – сопротивление источника сигнала

R_{BX} – входное сопротивление каскада

M_{Hi} – коэффициент частотных искажений, приходящийся на данную емкость

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_K + R_H) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}}, \quad (3.26)$$

$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot h_{11} \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}}, \quad (3.27)$$

Частотные искажения всего усилителя определяются уравнением:

$$M_H = \prod_{i=1}^N M_{Hi}$$

Соответственно, необходимо распределить частотные искажения на все емкости, причем так, чтобы на эмиттерные приходилось в 3 раза больше чем на разделительные. Для удобства расчета частотные искажения считаются в дБ.

$$M_H = 2 \cdot M_{Hi} + 3 \cdot M_{Hi}$$

Подставив заданное значение частотных искажений, переведенное в дБ в формулу (3.25), путем несложных преобразований вычисляются частотные искажения, приходящиеся на один разделительный конденсатор.

$$M_{Hi} = 0.52 \text{ дБ}$$

Для эмиттерного конденсатора данное значение в три раза больше и равно:

$$M_{H\Theta} = 1.56 \text{ дБ}$$

В разгах частотные искажения равны:

$$M_{Hi} = 1.061, \quad (3.28)$$

$$M_{H\Theta} = 1.19 \quad (3.29)$$

Емкости вычисляем по формулам (3.25), (3.26), (3.27) учитывая рассчитанные частотные искажения (3.28), (3.29):

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_\Gamma + R_{BX}) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot (40 + 93) \cdot \sqrt{1.061^2 - 1}} = 96 \cdot 10^{-6} = 96 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_\Gamma + R_{BX}) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot (169 + 371) \cdot \sqrt{1.061^2 - 1}} = 23 \cdot 10^{-6} = 23 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot h_{11} \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot 93 \cdot \sqrt{1.19^2 - 1}} = 75 \cdot 10^{-6} = 75 \text{ мкФ}$$

Для заданного по ТЗ коэффициенту частотных искажений произведем расчет ослабления сигнала во всем диапазоне частот в дБ:

$$\begin{aligned} K(\omega_B) &= K(\omega_H) = K_U - 20 \cdot \log_{10} M_H = \\ &= 20 \cdot \log_{10} 14.7 - 20 \cdot \log_{10} 1.35 = 23.3 - 2.6 = 20.7 \text{ дБ} \end{aligned}$$

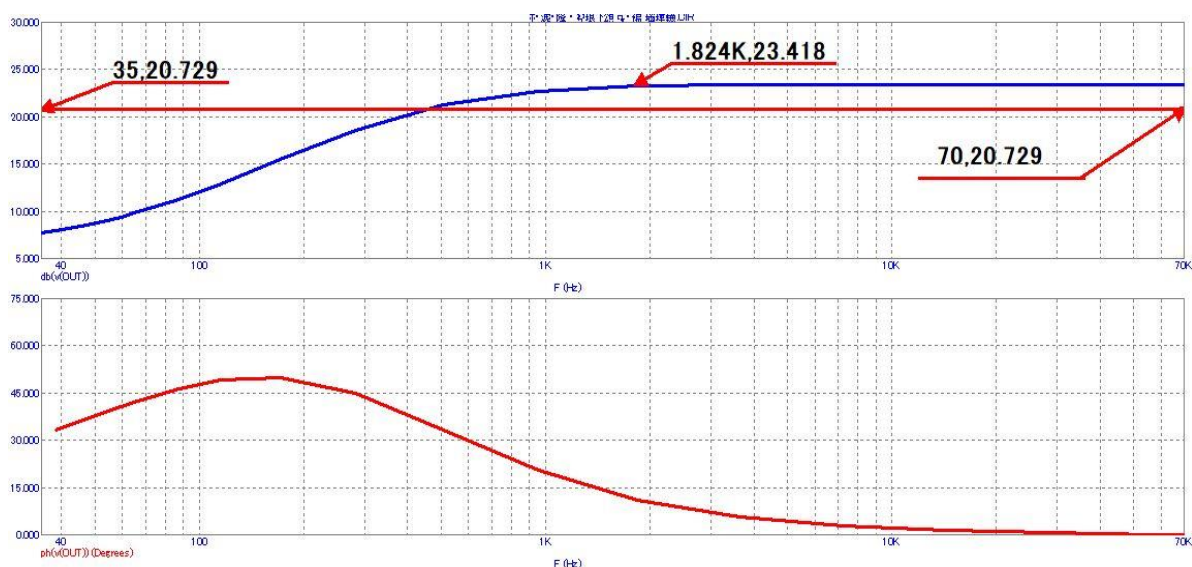


Рисунок 3.11 – АЧХ и ФЧХ оконечного каскада без оптимизации

Как видно на рисунке 3.11, на нижней частоте, заданной в ТЗ и равной 35Гц происходит значительное уменьшение коэффициента усиления по напряжению. Для того чтобы АЧХ удовлетворяло требованиям ТЗ была произведена оптимизация емкости,

шунтирующей резистор эмиттера. А также для ослабления на верхних частотах были введены емкости, шунтирующие нагрузку и резистор обратной связи. На рисунке 3.12 приведена АЧХ и ФЧХ после оптимизации.

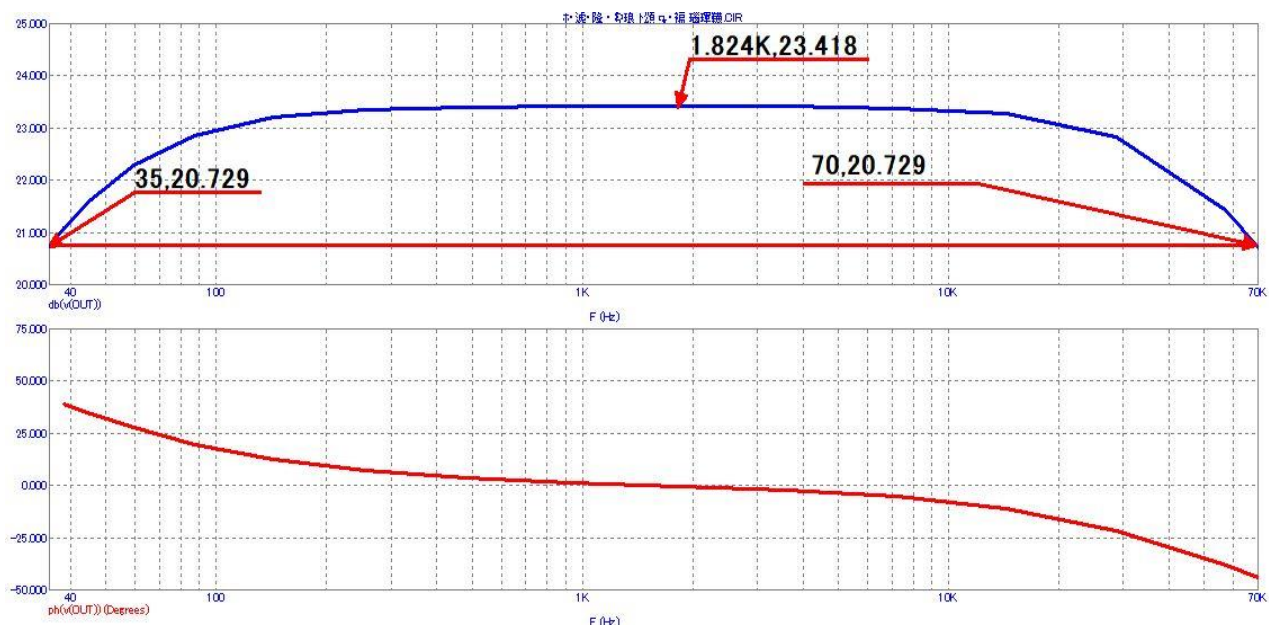


Рисунок 3.12 – АЧХ и ФЧХ после оптимизации

После оптимизации, на нижней и верхней частоте достигнуто допустимое по ТЗ ослабление сигнала в 2.6дБ. Эмиттерный конденсатор равен 928мкФ. Для ослабления сигнала на верхней частоте были добавлены шунты нагрузки и резистора обратной связи, равные 503мкФ и 280пФ соответственно.

3.1.11. Оценка нелинейных искажений окончного каскада

Коэффициент нелинейных искажений рассчитывается по формуле (3.30)[11] и данным взятым из рисунка 3.13.

$$KНИ = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} A_i^2}}{A_1}, \quad (3.30)$$

где A – амплитуда гармоники

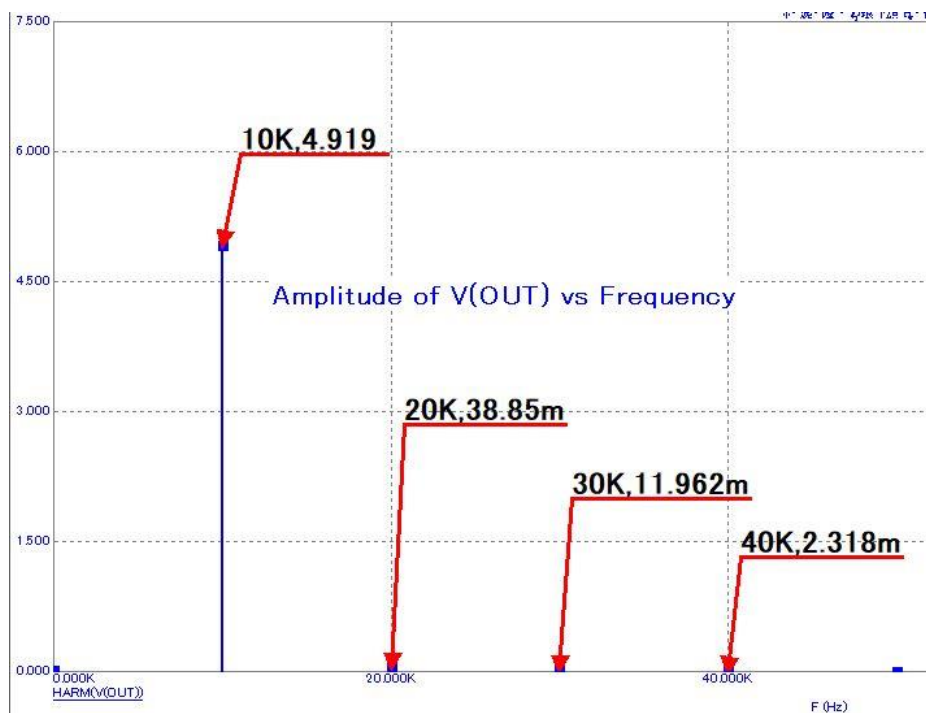


Рисунок 3.13 – График для анализа КНИ оконечного каскада

Коэффициент нелинейных искажений для оконечного каскада будет равен:

$$КНИ = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} A_i^2}}{A_1} = 100 \cdot \frac{\sqrt{0.039^2 + 0.012^2 + 0.0023^2}}{4.9} \approx 0.17\%$$

В соответствие с [12] для группы сложности 2, общие гармонические искажения в нормальных рабочих условиях должны быть не более 0.5%, из чего можно сделать вывод, что расчетный КНИ соответствует требованию данного класса.

3.2. Расчет входного каскада на полевом транзисторе

Так как усилитель возможно реализовать на одном каскаде (раздел 3.1.9), а задание на курсовой проект предусматривает проектирование каскада как на биполярном, так и на полевом транзистор, произведем расчет входного каскада усилителя на полевом транзисторе обладающим некоторым положительным коэффициентом усиления.

Так как коэффициент усиления по напряжению прямо пропорционален крутизне транзистора (формула (3.31)), для наибольшего усиления, рабочую точку следует взять при наибольшем токе стока.

$$K_U = S \cdot R_H, \quad (3.31)$$

где S – крутизна

R_H – сопротивление нагрузки

3.2.1. Выбор полевого транзистора

Так как для данного каскада требуется небольшое положительное усиление, транзистор можно взять с любой максимальной крутизной. В таблице 3.3 приведены параметры выбранного транзистора 2N3820

Таблица 3.3 – Параметры полевого транзистора 2N3820

Параметр	Максимально допустимый параметр из справочника
Максимально рассеиваемая мощность	0.35Вт
Предельно допустимое напряжение сток-исток	20В
Предельно допустимое напряжение затвор-исток	20В
Максимально допустимый постоянный ток стока	15мА
Структура	JFET – P канал

3.2.2. Выбор рабочей точки на выходной ВАХ транзистора.

Рабочая точка была выбрана на максимально возможном токе стока с соблюдением неравенств (формула (3.32), (3.33)).

$$0 \leq U_{ЗИА} - U_{ВХм}, \quad (3.32)$$

где $U_{ЗИА}$ – напряжение затвор исток рабочей точки

$U_{ВХм}$ – амплитудное напряжение на входе

$$U_{зиА} + U_{ВХм} \geq U_{зиДОП}, \quad (3.33)$$

где $U_{зиДОП}$ – максимально допустимое напряжение затвор исток

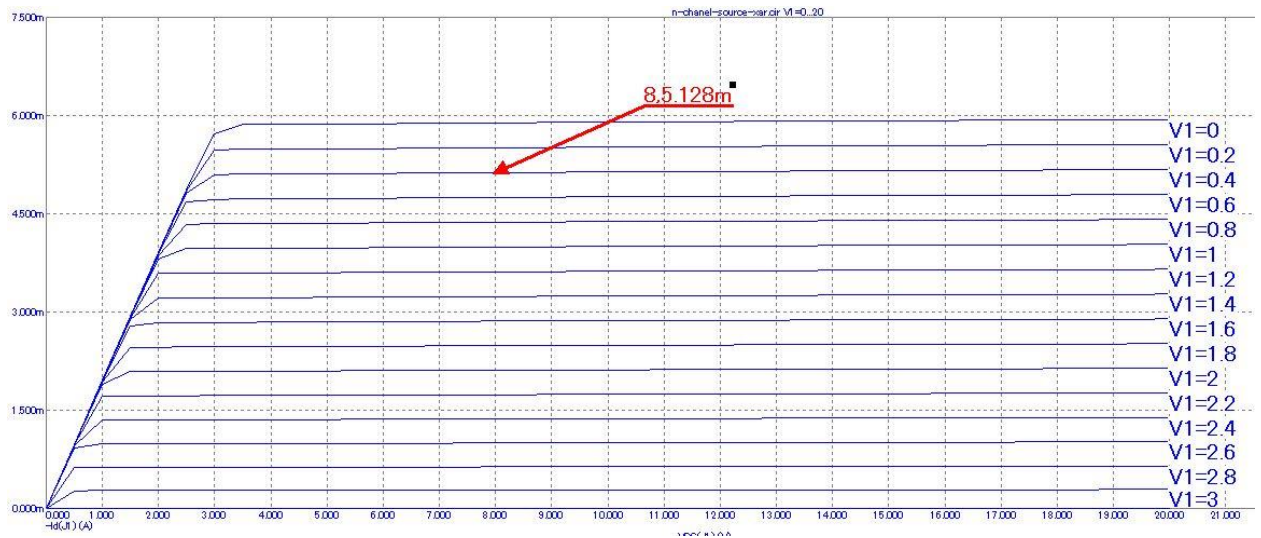


Рисунок 3.14 – Выходная ВАХ транзистора с нанесенной рабочей точкой

Рабочая точка выбрана при: $U_{зи} = 0.4 \text{ В}$, $U_{си} = 8 \text{ В}$, $I_C = 5.1 \text{ мА}$, $E_{II} = 16 \text{ В}$

3.2.3. Расчет элементов фиксации рабочей точки

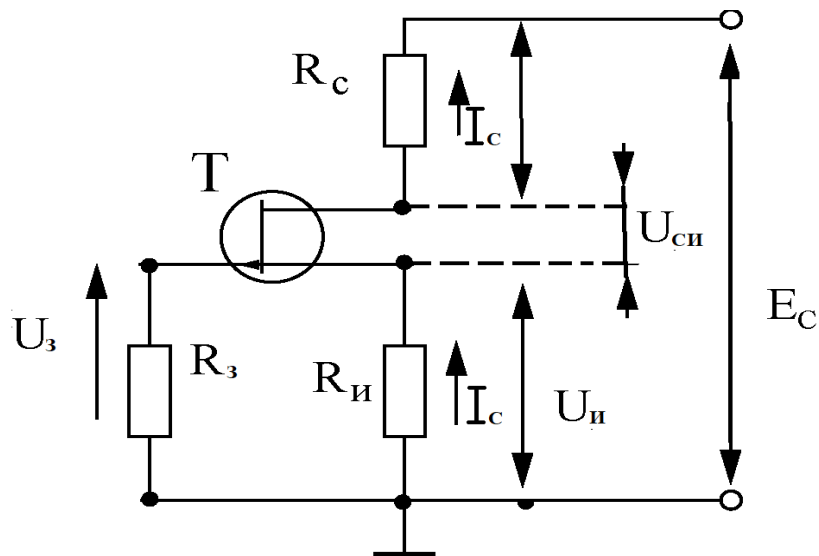


Рисунок 3.15 – Напряжения и токи в схеме с общим истоком

На рисунке 3.15 изображен каскад усилителя на полевом транзисторе с общим истоком, так же на нем, для наглядности, нанесены токи и напряжения. Применив второй закон Кирхгофа к каскаду, изображенному на рисунке 3.15 можно вывести формулы:

$$E_C = U_C + U_{II} + U_{СИ}, \quad (3.34)$$

где U_C – напряжение на стоковом резисторе

U_{II} – напряжение на истоковом резисторе

$U_{СИ}$ – напряжение сток-исток

$$U_{II} = -U_3 \quad (3.35)$$

По закону Ома сопротивления будут равны:

$$R_C = \frac{U_C}{I_C}, \quad (3.36)$$

$$R_{II} = \frac{U_{II}}{I_C} \quad (3.37)$$

Резистор в цепи затвора выбирается равным $R_3 = 250...1000 \text{ кОм}$. По формулам (3.34), (3.35), (3.36), (3.37) резисторы будут равны:

$$R_{II} = \frac{U_{II}}{I_C} = \frac{|-0.4|}{0.0051} = 78 \text{ Ом}$$

$$R_C = \frac{E_C - U_{СИ} - U_{II}}{I_C} = \frac{16 - 8 - 0.4}{0.0051} = 1490 \text{ Ом}$$

3.2.4. Расчет крутизны полевого транзистора

Для расчёта крутизны транзистора на проходной ВАХ (рисунок 3.16), относительно напряжения затвор исток рабочей точки, откладывается амплитуда входного напряжения. Проецируя найденные точки на ось u находим соответствующие значения тока стока.

По формуле (3.38) рассчитывается крутизна полевого транзистора.

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}}, \quad (3.38)$$

где S – крутизна

ΔI_C – разница тока стока

$\Delta U_{ЗИ}$ – разница напряжения затвор исток

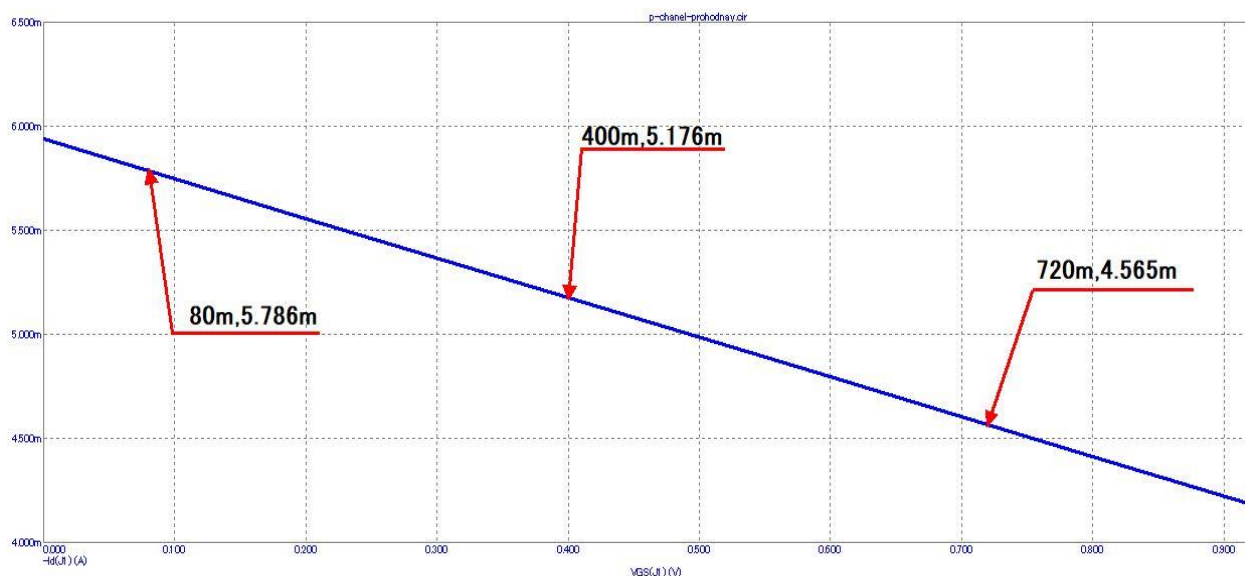


Рисунок 3.16 – Проходная ВАХ выбранного полевого транзистора

Крутизна рабочего участка ВАХ для выбранной рабочей точки будет равна:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3И}} = \frac{0.00578 - 0.004565}{0.72 - 0.08} = 0.0019$$

3.2.5. Расчет требуемого сопротивления нагрузки

Так как, коэффициент усиления по напряжению полевого транзистора прямо пропорционален сопротивлению на нагрузки, а задание предполагает коэффициент усиления больше единицы, найдем минимальное необходимое сопротивление на нагрузке преобразовав формулу (3.31) и подставив в нее значение S рассчитанное в разделе 3.2.4.

$$R_H = \frac{K_U}{S} = \frac{1.5}{0.0019} = 790 \text{ Ом} \quad (3.39)$$

Из расчета (3.39) можно сделать вывод, что требуемое минимальное сопротивление на нагрузке для входного каскада во много раз больше входного сопротивления оконечного каскада, которое приблизительно равно коэффициенту h_{11} рассчитанного в разделе 3.1.6. Следовательно, для согласования входного и выходного каскада необходимо рассчитать эмиттерный повторитель обладающий большим входным сопротивлением и коэффициентом усиления по напряжению приблизительно равным единице.

3.2.6. Расчет эмиттерного повторителя

Необходимые данные для расчета эмиттерного повторителя приведены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Данные для расчета эмиттерного повторителя

Параметр	Значение
Амплитуда входного напряжения	700 мВ
Сопротивление генератора	1490 Ом
Сопротивление нагрузки	80 Ом
Напряжение питания	27 В

Так как входное сопротивление каскада с общим коллектором во многом зависит от коэффициента усиления по току, транзистор выбирается с наибольшим значением β . Для данного эмиттерного повторителя был выбран транзистор 2N2946A, предельно допустимые параметры транзистора приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры выбранного транзистора 2N2946A

Параметр	Максимально допустимый параметр из справочника
Мощность коллектора	0.4Вт
Ток коллектора	1мА
Напряжение коллектор эмиттер	35В
Граничная частота	5МГц
β максимальное	990
Структура	p-n-p

Выбор рабочей точки, а также расчет элементов ее фиксации производиться по алгоритму из [2]

По формуле (3.4) напряжение рабочей точки будет равно:

$$U_{KЭА} \geq |U_{Hm} + U_{KЭ\min}| = 0.7 + 1 = 1.7В$$

Целесообразно принять $U_{KЭА} = 2В$

Определяем амплитуду тока эмиттера:

$$I_{Эm} = \frac{U_{Hm}}{R_H} = \frac{0.7}{80} = 8.7 \cdot 10^{-3} = 8.7мА$$

Аналогично по формуле (3.5) определяем постоянную составляющую тока эмиттера:

$$I_{ЭА} = \frac{I_{Эm}}{k_s} = \frac{0.0087}{0.7} = 12.4 \cdot 10^{-3} = 12.4мА$$

Постоянную составляющую тока коллектора и базы находим по формулам (3.40) и (3.41).

$$I_{KA} = \frac{I_{\mathcal{A}} \cdot \beta}{\beta + 1}, \quad (3.40)$$

$$I_{BA} = I_{\mathcal{A}} - I_{KA} \quad (3.41)$$

$$I_{KA} = \frac{I_{\mathcal{A}} \cdot \beta}{\beta + 1} = \frac{0.0124 \cdot 990}{990 + 1} = 0.0123 = 12.3 \text{ мА}$$

$$I_{BA} = I_{\mathcal{A}} - I_{KA} = 0.0124 - 0.0123 = 0.0001 = 0.1 \text{ мА}$$

Расчет элементов, определяющих режим транзистора по постоянному току производится по формулам (3.42), (3.43).

$$R_{\mathcal{A}} = \frac{E_{\Pi} - U_{K\mathcal{A}}}{I_{\mathcal{A}}}, \quad (3.42)$$

$$R_B \approx \frac{U_{K\mathcal{A}}}{I_{BA}} \quad (3.43)$$

$$R_{\mathcal{A}} = \frac{E_{\Pi} - U_{K\mathcal{A}}}{I_{\mathcal{A}}} = \frac{27 - 2}{0.0124} = 2016 \text{ Ом}$$

$$R_B \approx \frac{U_{K\mathcal{A}}}{I_{BA}} = \frac{2}{0.0001} = 20000 = 20 \text{ кОм}$$

3.2.7. Расчет делителя напряжения

Так как напряжение питания для эмиттерного и выходного каскада равно 27В, а для входного каскада 16В, необходимо в цепь питания полевого транзистора установить делитель напряжения (рисунок 3.17)[13].

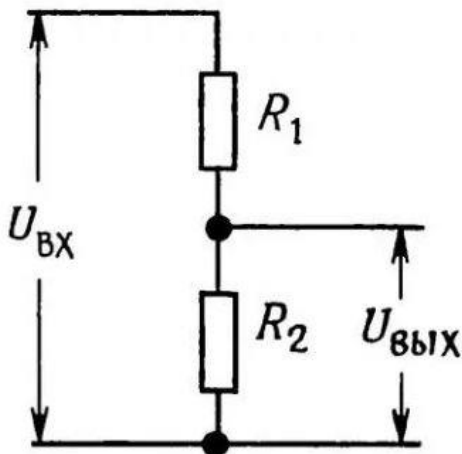


Рисунок 3.17 – Схема делителя напряжения

Следует обратить внимание, что сопротивление нагрузки делителя напряжения должно быть на много больше собственного сопротивления делителя, так, чтобы в расчетах этим сопротивлением, включенным параллельно, можно было пренебречь.

Напряжение на выходе находится по формуле (3.44)

$$U_{B\bar{L}X} = U_{BX} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.44)$$

Задав сопротивление резистора $R_2 = 50\text{Ом}$ и преобразовав формулу (3.44) можно найти сопротивление резистора R_1 .

$$R_1 = \frac{U_{BX} \cdot R_2 - U_{B\bar{L}X} \cdot R_2}{U_{B\bar{L}X}} = \frac{27 \cdot 50 - 16 \cdot 50}{16} = 34\text{Ом}$$

3.2.8. Расчет сопротивлений каскадов

Входное и выходное сопротивление эмиттерного повторителя находится по формулам (3.45) и (3.46)[2].

$$R_{B\bar{L}X} = h_{11} + R_H \cdot \beta, \quad (3.45)$$

$$R_{BX} = \frac{h_{11} + R_{\Gamma}}{\beta} \quad (3.46)$$

Коэффициент h_{11} рассчитывается аналогично как в разделе 3.1.6. На рисунке 3.18 изображена входная ВАХ транзистора 2N2946A.

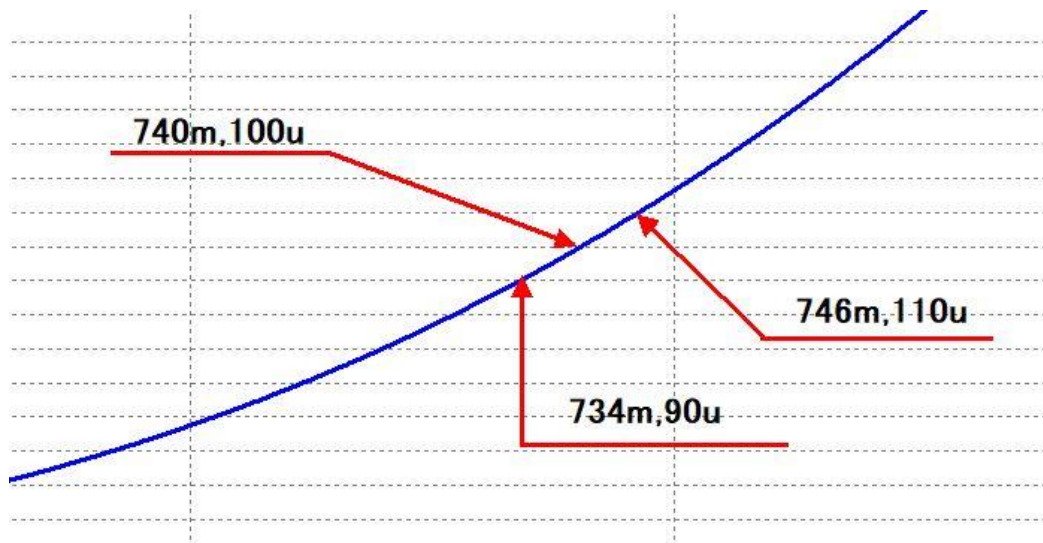


Рисунок 3.18 – Входная ВАХ транзистора 2N2946A

$$h_{1103} = \frac{\Delta U_{B\bar{Э}}}{\Delta I_{\bar{Б}}} = \frac{0.746 - 0.734}{0.00011 - 0.00009} = 600\text{Ом}$$

По формулам (3.45) и (3.46) при минимальной β равной 50 выходное и входное сопротивления будут равны:

$$R_{BbIX} = h_{11} + R_H \cdot \beta = 600 + 80 \cdot 450 = 4600 = 4.6 \text{ кОм}$$

$$R_{BX} = \frac{h_{11} + R_H}{\beta} = \frac{600 + 1490}{50} = 41 \text{ Ом}$$

3.2.9. Временной анализ выходного каскада

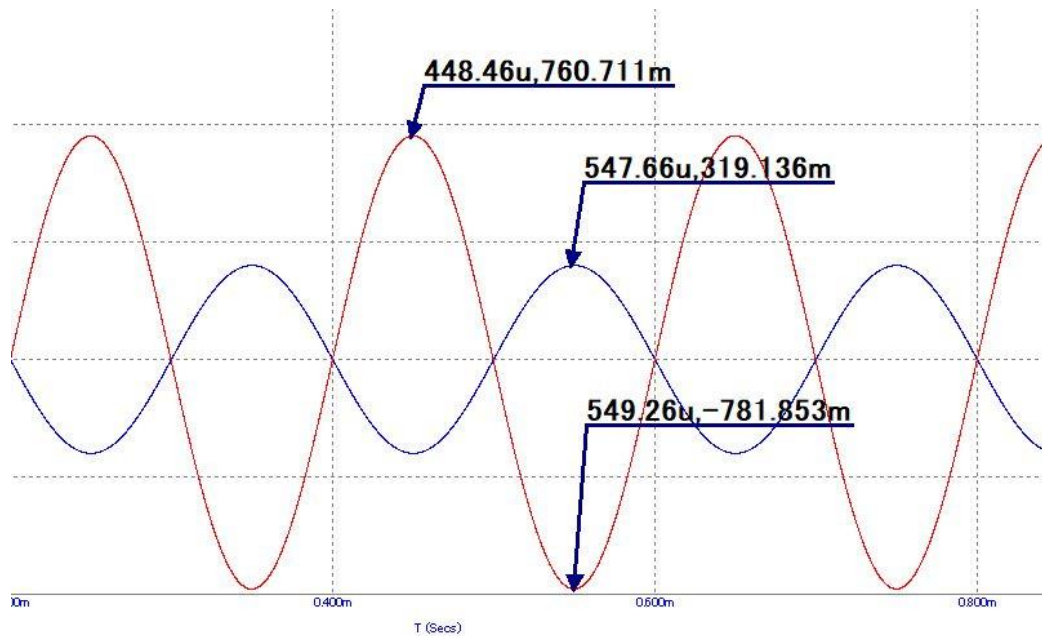


Рисунок 3.19 – Входная и выходная амплитуда сигнала входного каскада с эмиттерным повторителем в нагрузке каскада

Как видно на рисунке 3.19 амплитуда выходного сигнала больше амплитуды входного, что и требовалось по заданию. Коэффициент усиления равен:

$$K_U = \frac{U_{BbIXm}}{U_{BXm}} = \frac{0.77}{0.32} = 2.4$$

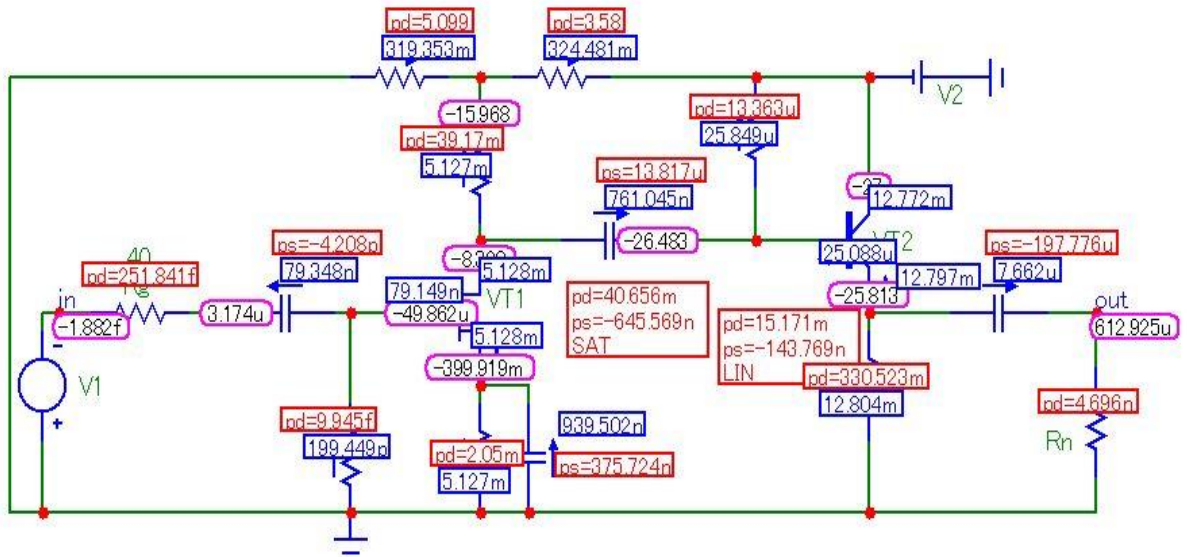


Рисунок 3.20 – Токи, напряжения и мощности во временном анализе

3.3. Согласование каскадов и моделирование усилителя

3.3.1. Расчет цепи обратной связи

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя определяется формулой (3.47). Расчётные коэффициенты усиления входного и выходного каскада соответственно равны: $K_{U1} = 2.4$, $K_{U2} = 107$, необходимый по ТЗ равен $K_U = 14.6$. Для удаления избытка усиления принято решение о введении общей отрицательной обратной связи по напряжению.

$$K_n = \prod_{i=1}^n K_i \quad (3.47)$$

По формуле (3.23) и (3.46) необходимая β будет равна:

$$\beta = \frac{K_U - K_{UOC}}{K_U \cdot K_{UOC}} = \frac{267.5 - 14.6}{267.5 \cdot 14.6} = 0.067$$

$$R_{OC} = \frac{R_f \cdot (1 - \beta)}{\beta} = \frac{40 \cdot (1 - 0.067)}{0.067} = 557 \text{ Ом}$$

3.3.2. Расчет емкостных элементов

Частотные искажения, распределённые по алгоритму, описанному в разделе 3.1.10 соответственно равны:

$$M_{Hi} = 1.03$$

$$M_{III,\varnothing} = 1.09$$

По формулам (3.25), (3.26), (3.27) конденсаторы равны:

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_{\Gamma} + R_{BX}) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot (40 + 250000) \cdot \sqrt{1.03^2 - 1}} = 73 \cdot 10^{-9} = 73 \text{ нФ}$$

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_C + R_{BX}) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot (1490 + 4600) \cdot \sqrt{1.03^2 - 1}} = 3 \cdot 10^{-6} = 3 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_{BBIX} + R_H) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot (41 + 80) \cdot \sqrt{1.03^2 - 1}} = 152 \cdot 10^{-6} = 152 \text{ мкФ}$$

$$C_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_K + R_H) \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot (170 + 371) \cdot \sqrt{1.03^2 - 1}} = 34 \cdot 10^{-6} = 34 \text{ мкФ}$$

$$C_{II} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R_{II} \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot 78 \cdot \sqrt{1.09^2 - 1}} = 134 \cdot 10^{-6} = 134 \text{ мкФ}$$

$$C_{\varnothing} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R_{II} \cdot \sqrt{M_{Hi}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot 93 \cdot \sqrt{1.09^2 - 1}} = 112 \cdot 10^{-6} = 112 \text{ мкФ}$$

3.3.3. Временной анализ трехкаскадного усилителя

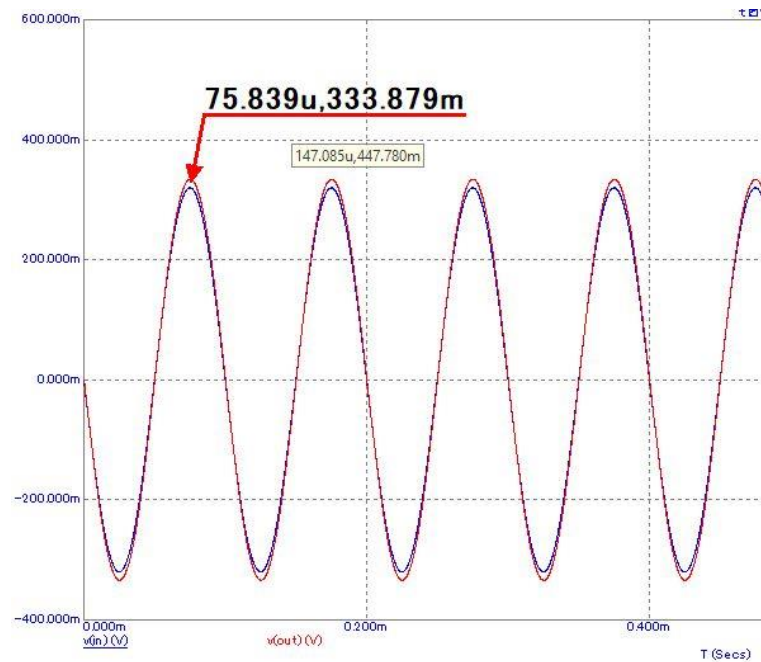


Рисунок 3.21 – Временной анализ усилителя

Как видно на рисунке 3.21 суммарный коэффициент усиления не оптимизированного усилителя примерно равен единице. Проведя оптимизацию резистора цепи обратной связи удалось добиться необходимого усиления входного сигнала в 14.6 раз (рисунок 3.22). Резистор обратной связи после оптимизации равен 8347Ом.

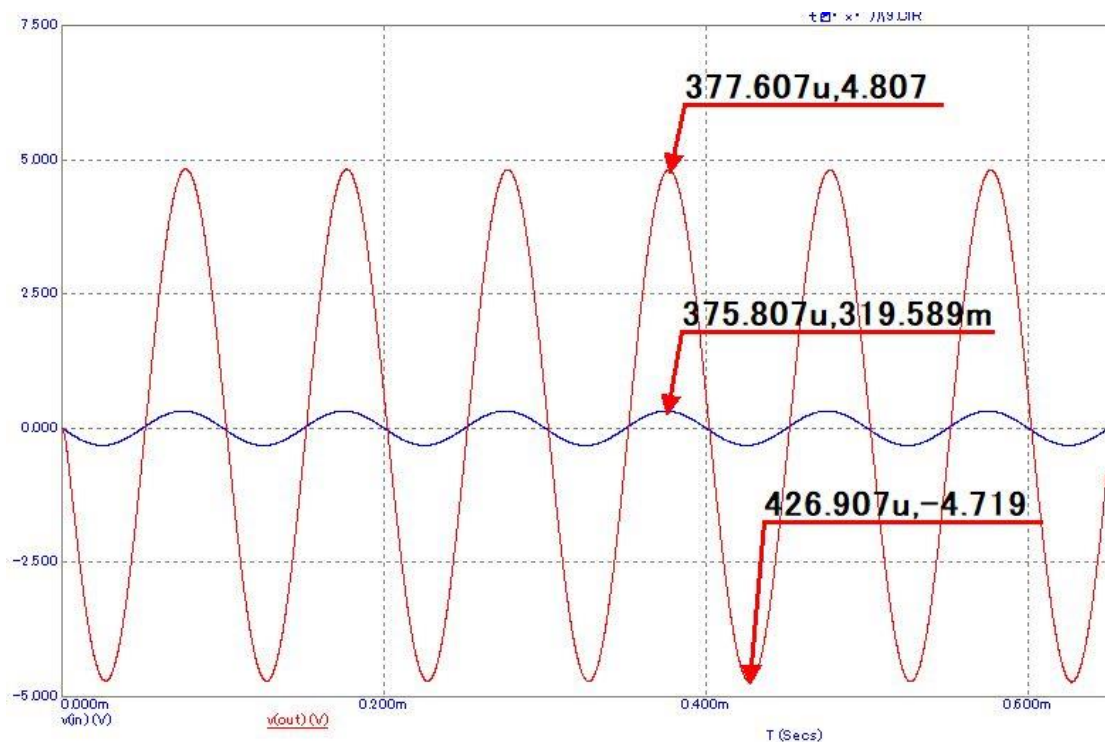


Рисунок 3.22 – Временной анализ усилителя после оптимизации

3.3.4. Частотный анализ трехкаскадного усилителя

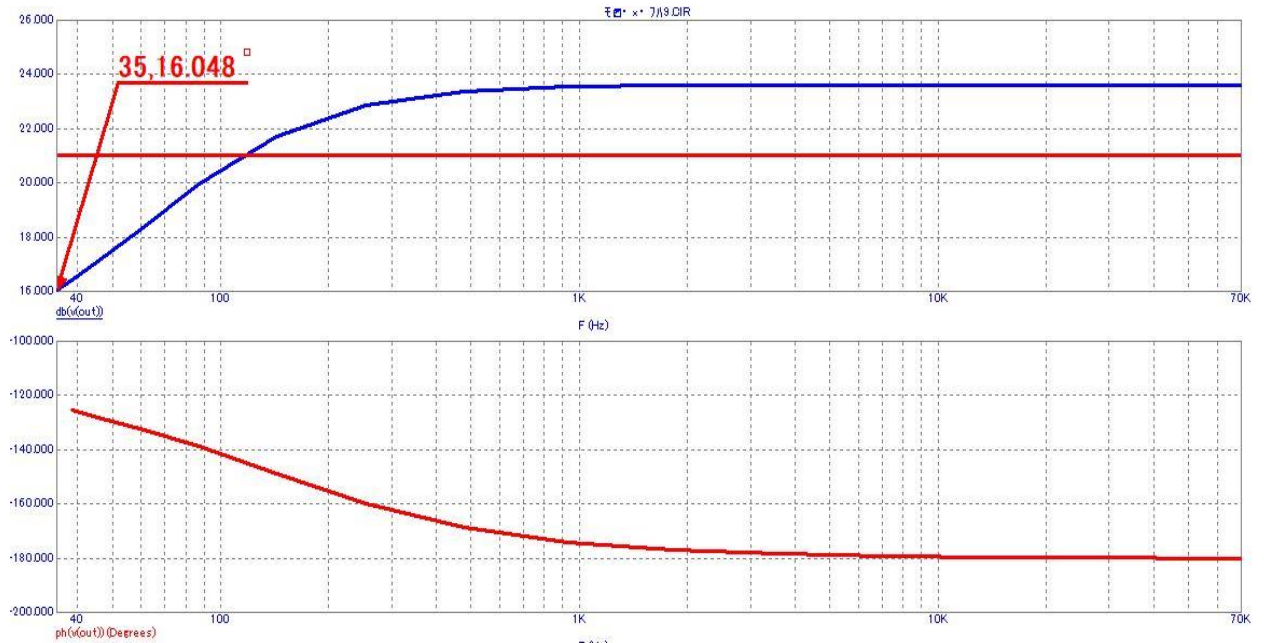


Рисунок 3.23 – АЧХ и ФЧХ не оптимизированного усилителя

Как видно на рисунке 3.23, на нижней частоте, заданной в ТЗ и равной 35Гц происходит значительное уменьшение коэффициента усиления по напряжению. Для того чтобы АЧХ удовлетворяло требованиям ТЗ была произведена оптимизация емкости, шунтирующий резистор эмиттера. А также для ослабления на верхних частотах были введены емкости, шунтирующие нагрузку и резистор обратной связи. На рисунке 3.24 приведена АЧХ и ФЧХ после оптимизации.



Рисунок 3.24 – АЧХ и ФЧХ усилителя после оптимизации

После оптимизации, на нижней и верхней частоте достигнуто допустимое по ТЗ ослабление сигнала в 2.6дБ. Эмиттерный конденсатор равен 325мкФ. Для ослабления сигнала, на верхней частоте были добавлены шунты нагрузки и резистора обратной связи, равные 125нФ и 188пФ соответственно.

3.3.5. Оценка КНИ трехкаскадного усилителя

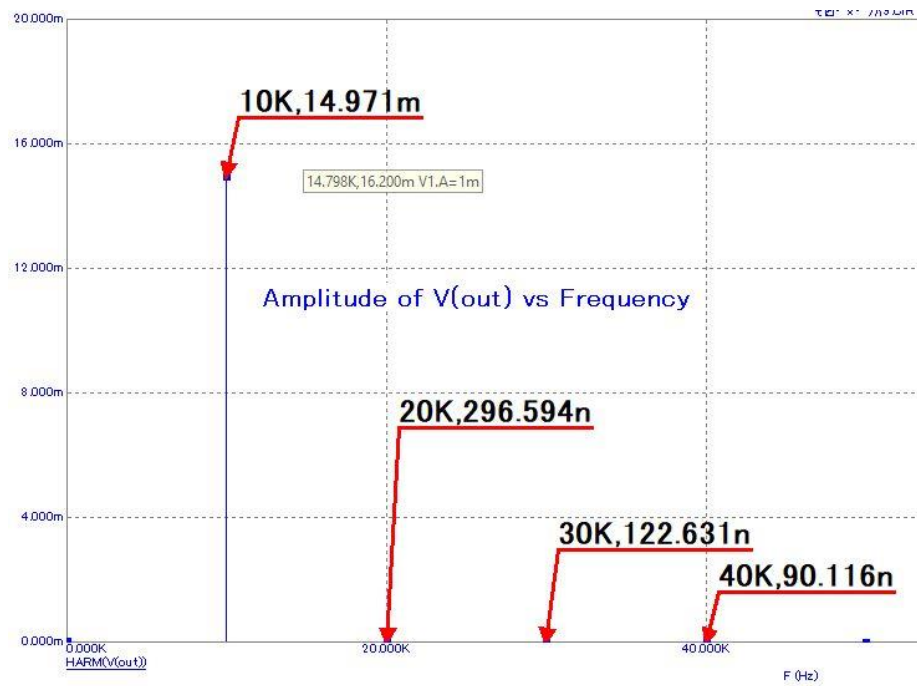


Рисунок 3.25 – График для анализа КНИ оконечного каскада

$$KНИ = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} A_i^2}}{A_1} = 100 \cdot \frac{\sqrt{(296 \cdot 10^{-9})^2 + (122 \cdot 10^{-9})^2 + (90 \cdot 10^{-9})^2}}{0.0149} \approx 0.002\%$$

В соответствие с [12] для группы сложности 0, общие гармонические искажения в нормальных рабочих условиях должны быть не более 0.005%, из чего можно сделать вывод, что расчетный КНИ соответствует требованию.

3.3.6. Моделирование усилителя с элементами из ряда E24

Был выполнен подбор всех элементов по ряду E24 [14], результаты занесены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Выбор элементов схемы по ряду E24

Позиционное обозначение элемента схемы	Расчётный номинал	Номинал по ряду E24	Единицы изменения
R1	250	240	кОм
R2	50	51	Ом
R3	78	75	Ом
R4	1.49	1.5	кОм
R5	33	33	Ом
R6	20	20	кОм
R7	2.016	2	кОм
R8	8.347	8.2	кОм
R9	2.994	3	кОм
R10	620	620	Ом
R11	170	180	Ом
R12	34	33	Ом
C1	73	75	нФ
C2	134	130	мкФ
C3	14	15	мкФ
C4	3	3	мкФ
C5	188	180	пФ
C6	152	150	мкФ
C7	325	330	мкФ
C8	34	33	мкФ
C9	125	130	нФ

На рисунках 3.26, 3.27, 3.28, приведены результаты анализа трехкаскадного усилителя после подстановки номиналов элементов из ряда E24, параметры схемы не изменились, расчёт усилителя можно считать завершённым. В приложение В приведена схема усилителя с нанесенными на ней токами, узловыми потенциалами и мощностями.

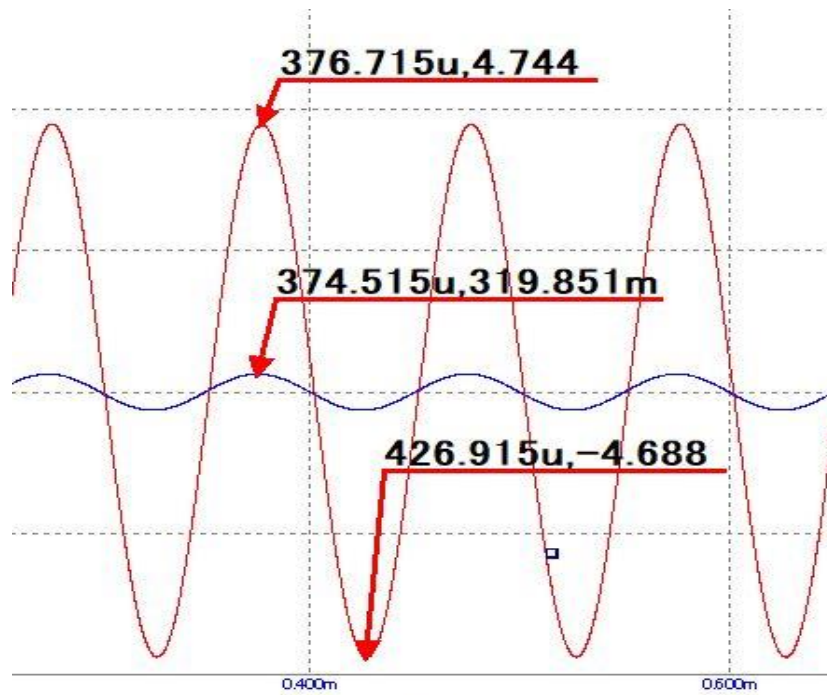


Рисунок 3.26 – Амплитуда напряжения на входе и на выходе усилителя

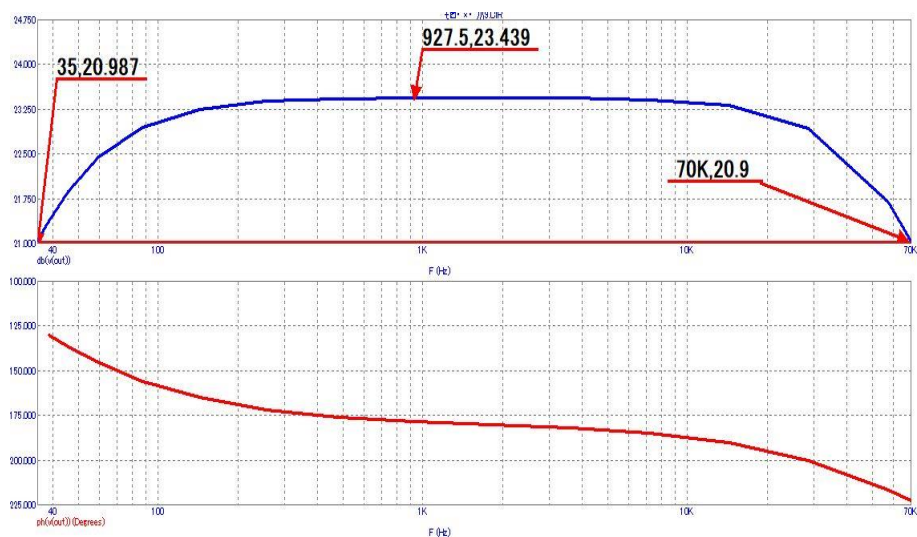


Рисунок 3.27 – АЧХ и ФЧХ усилителя

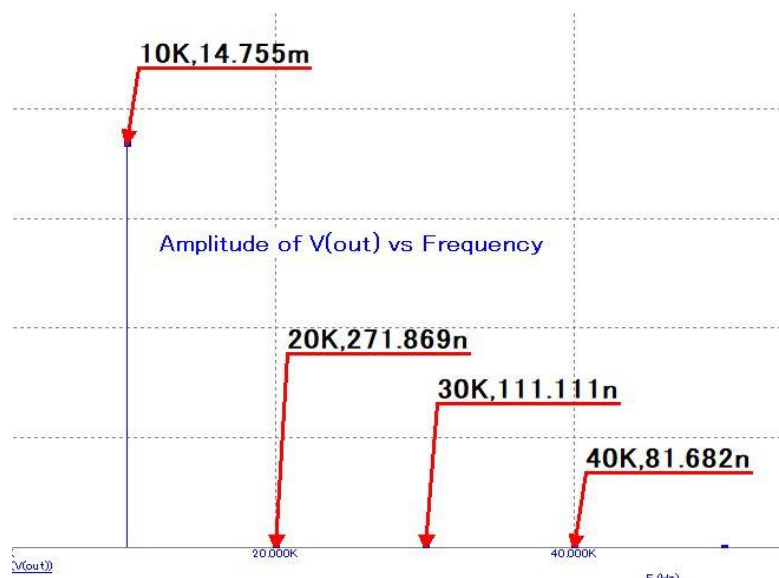


Рисунок 3.28 – Спектр выходного сигнала

4. Заключение

В ходе выполнения данного курсового проекта были изучены принципы функционирования транзисторных усилительных способы их разработки и проектирования, а также методы анализа и расчета их статических и динамических параметров.

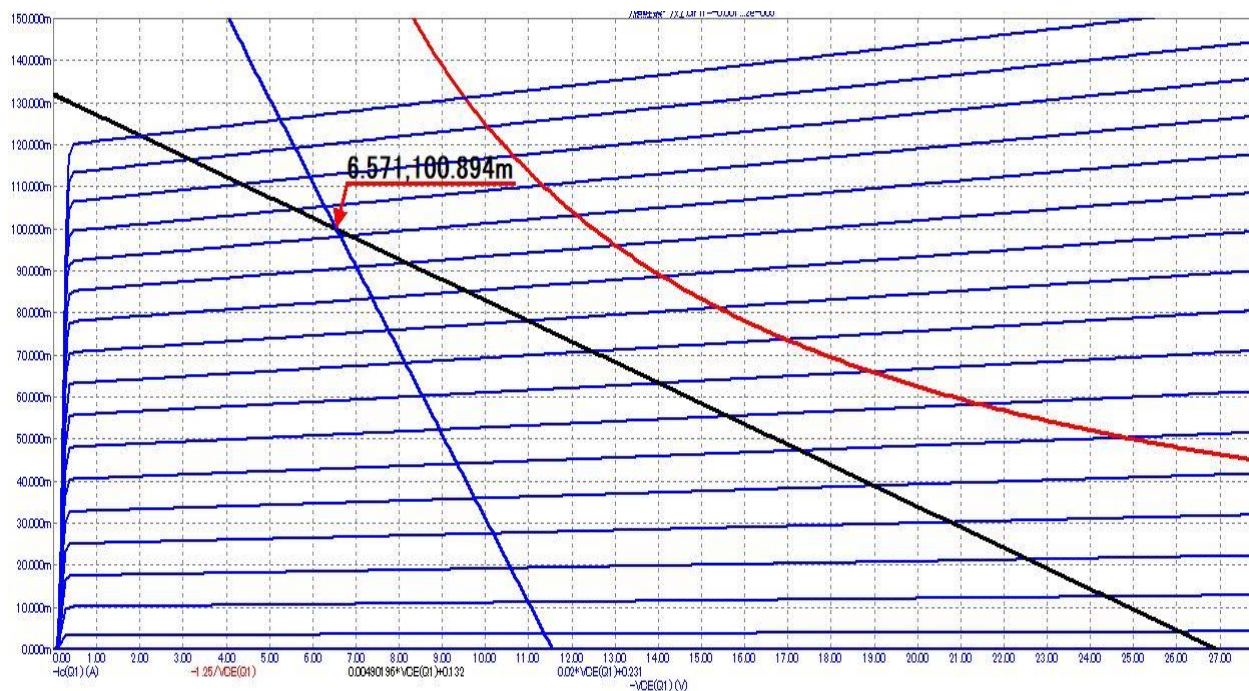
По итогу курсового проекта, был спроектирован трехкаскадный усилитель, обладающий коэффициентом усиления по напряжению 23дБ и коэффициентом частотных искажений не превышающий 2.6дБ на частотах 35Гц и 70кГц, КНИ усилителя менее 0.5%. Таким образом, все требования, установленные в техническом задании на курсовой проект, были выполнены.

Список используемой литературы

1. Перепелкин Д. А. Схемотехника усилительных устройств. Учебное пособие для вузов. – 2-е издание. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 238 с.
2. Л.Н. Бочаров, С.К. Жебряков, И.Ф. Колесников Расчет электронных устройств на транзисторах. Учебное пособие, 1978 – 206 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. В.А. Аронов, А.В. Баяков 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. В.Д. Разевиг Схемотехническое моделирование с помощью MicroCap7. – М.: Горячая линия–Телеком, 2003. - 368 с.
7. Нагрузочные линии усилителя и их построение [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://helpiks.org/5-25403.html> (дата обращения: 10.12.2017).
8. Озеркин Д.В. Общая электротехника и электроника. Часть 2 – Общая электроника. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.- 160 с.
9. Л.И. Шарыгина Элементы аналоговой схемотехники. Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2015. - 75 с.
10. Изъюрова Г.И., Королев Г.В. и др. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Р24 Учебное пособие для вузов. – Москва «Высшая школа», 1987. – 335 с.
11. Д.П. Линде, Справочник по радиоэлектронным устройствам, 1978. – 440 с.
12. ГОСТ 24388-88 (СТ СЭВ 1079-78) Усилители сигналов звуковой частоты бытовые.
13. П. Хоровиц, У Хил, Искусство схемотехники, – М.:Мир, 2003. –704 с.
14. Ряды номиналов радиодеталей [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ряды_номиналов_радиодеталей (дата обращения: 20.12.2017).
15. 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.

Приложение А (обязательное)

Входные и выходные вольт–амперные характеристики



синяя – динамическая линия нагрузки; черная – статическая линия нагрузки;
красная – линия максимально допустимой рассеиваемой мощности

Рисунок А.1 – Выходная ВАХ транзистора BD140 с РТ

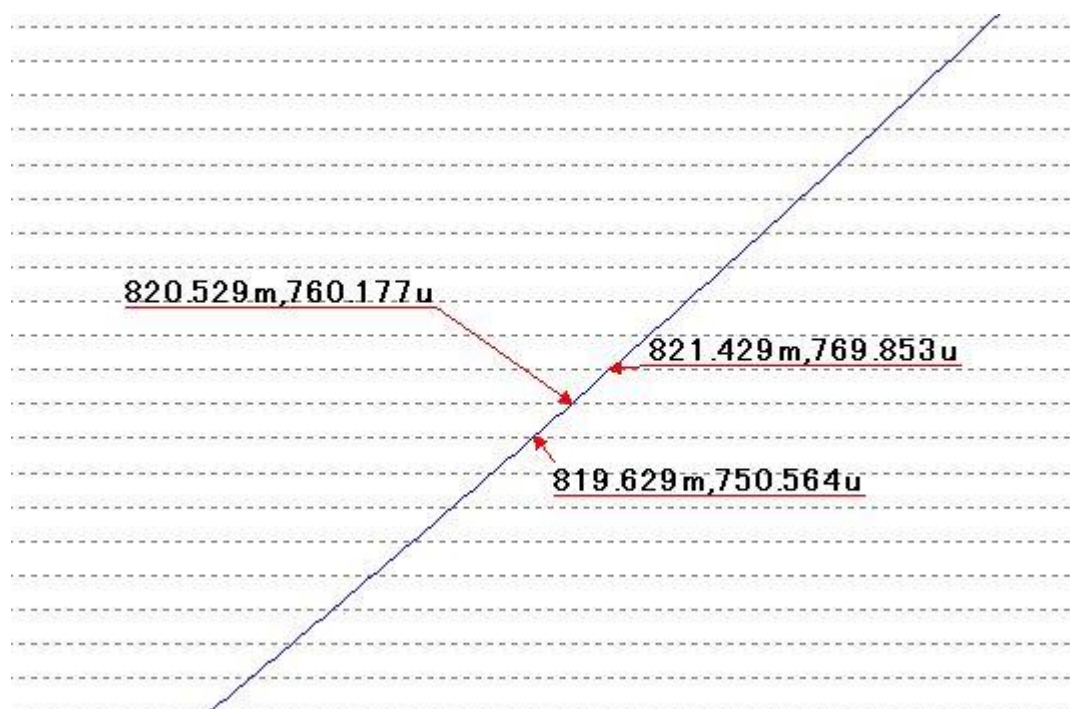


Рисунок А.2 – Входная ВАХ транзистора BD140 с нанесённой РТ

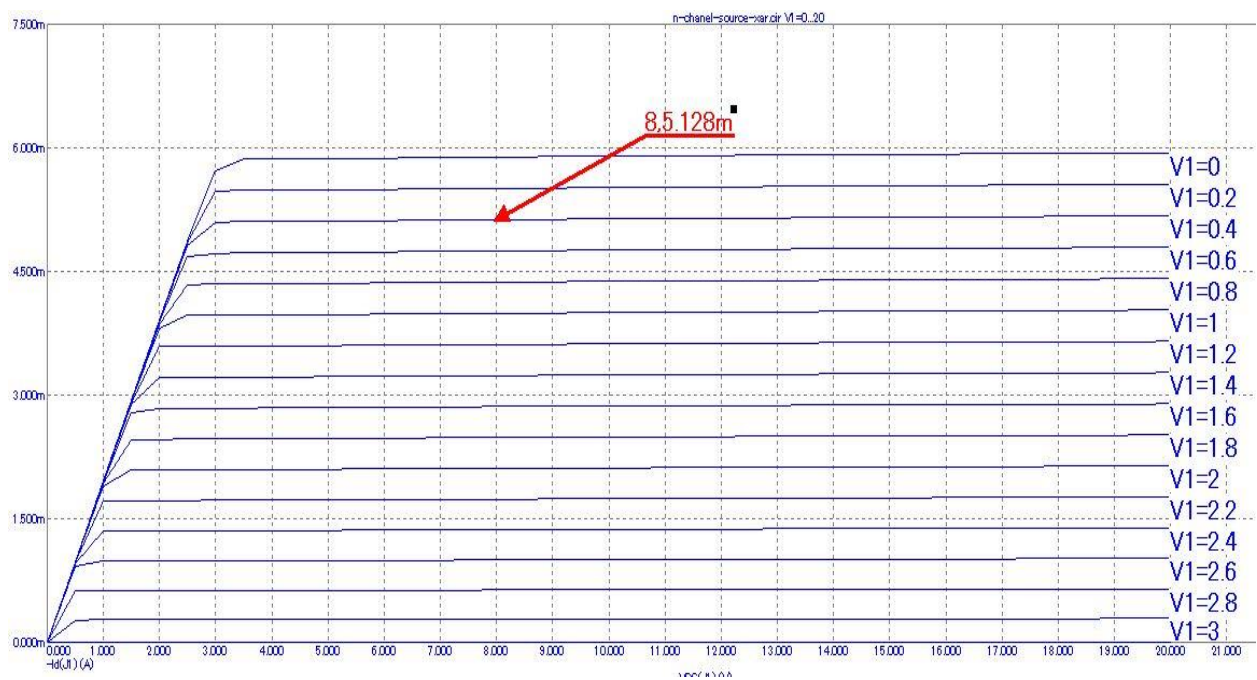


Рисунок А.3 – Выходная ВАХ полевого транзистора 2N3820 с нанесенной РТ

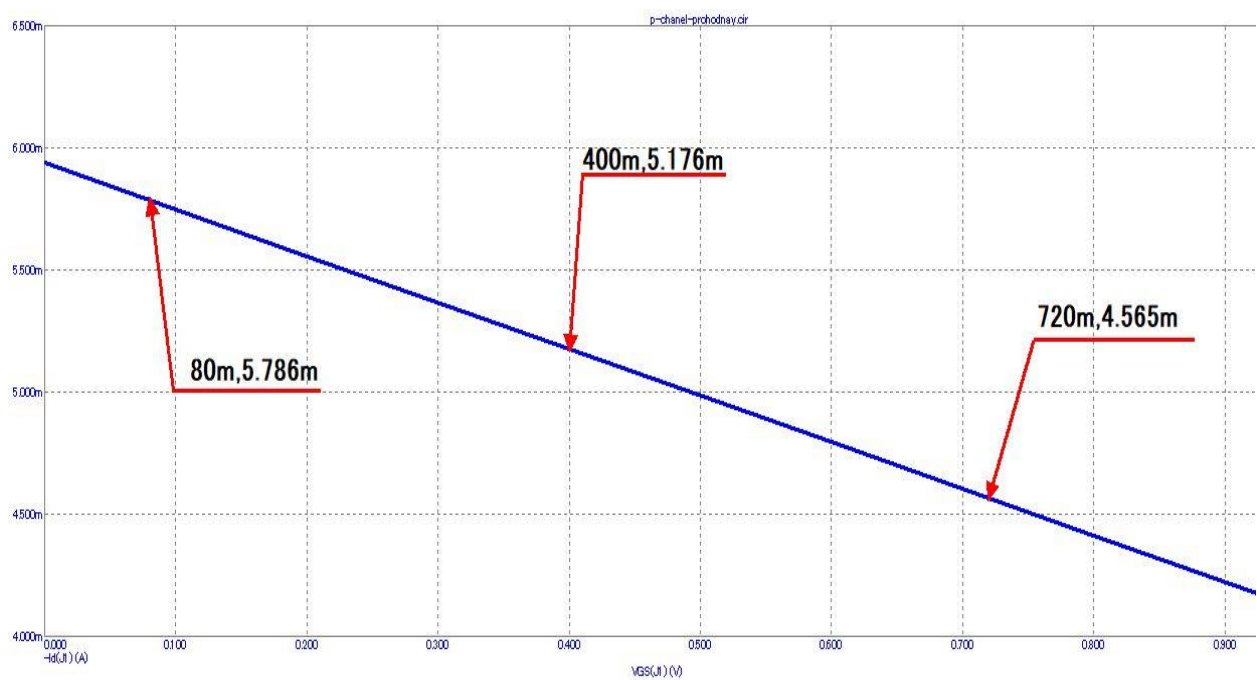


Рисунок А.4 – Проходная ВАХ полевого транзистора 2N3820 с нанесенной РТ

Приложение Б (обязательное)

Анализ переходных процессов

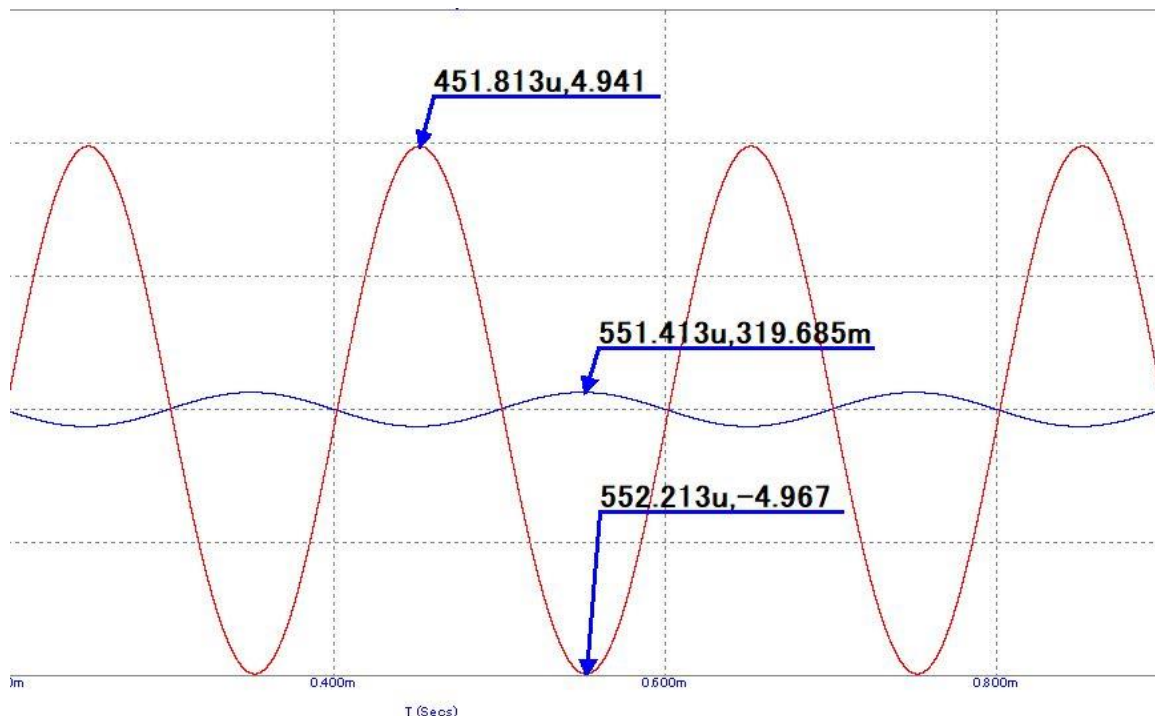


Рисунок Б.1 – Амплитуда напряжения входного и выходного сигнала на выходном каскаде

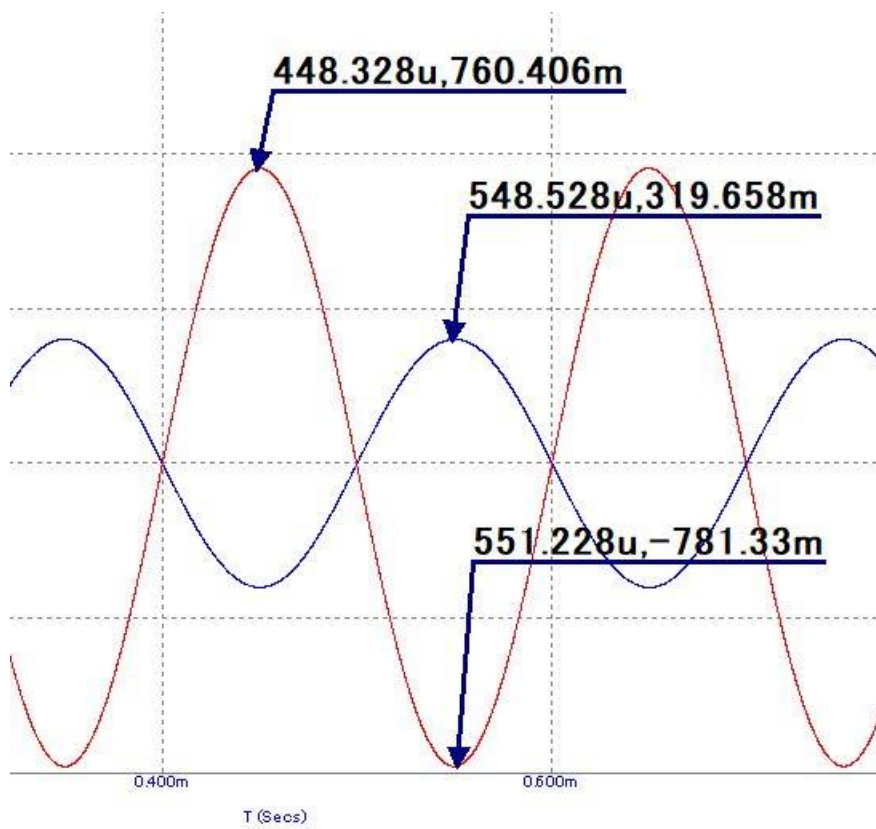


Рисунок Б.2 – Амплитуда входного и выходного сигнала на входном каскаде с эмиттерным повторителем

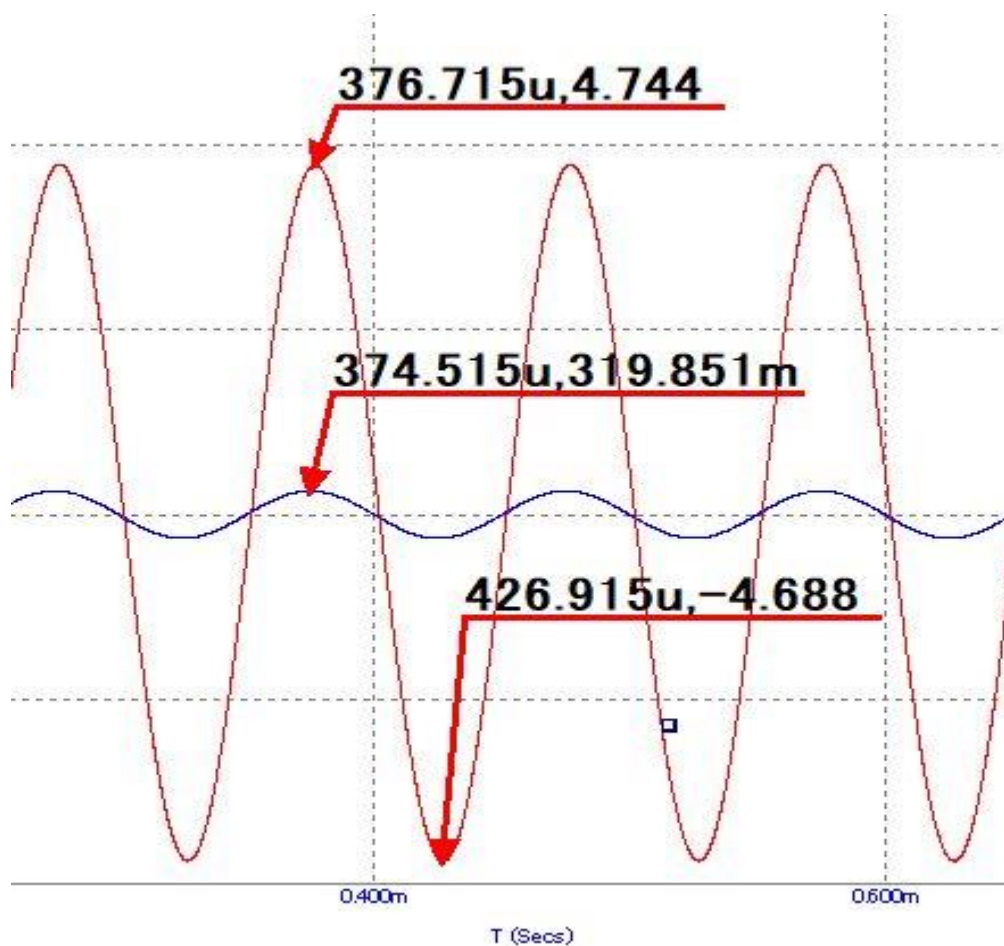


Рисунок Б.3 – Амплитуда входного и выходного сигнала на усилителе

The circuit diagram shows a two-stage BJT amplifier. The first stage uses a common-emitter configuration with a signal source V_1 (amplitude $1.965E-022$) connected through a resistor R_g to the base of transistor VT_1 . The base of VT_1 is biased by a voltage divider consisting of R_1 and R_2 connected to a $5.203V$ supply. The emitter of VT_1 is connected to ground through a resistor R_3 and a capacitor C_2 . The collector of VT_1 is connected to a $3.476V$ supply through a resistor R_4 and a capacitor C_3 . The second stage uses a common-emitter configuration with the collector of VT_1 connected to the base of transistor VT_2 through a capacitor C_4 . The base of VT_2 is biased by a voltage divider consisting of R_5 and R_6 connected to a $5.203V$ supply. The emitter of VT_2 is connected to ground through a resistor R_7 and a capacitor C_5 . The collector of VT_2 is connected to a $3.476V$ supply through a resistor R_8 and a capacitor C_6 . The output of the second stage is connected to the base of transistor VT_3 through a capacitor C_7 . The base of VT_3 is biased by a voltage divider consisting of R_9 and R_{10} connected to a $5.203V$ supply. The emitter of VT_3 is connected to ground through a resistor R_{11} and a capacitor C_8 . The collector of VT_3 is connected to a $3.476V$ supply through a resistor R_{12} and a capacitor C_9 . The output of the third stage is connected to the output terminal out through a resistor R_{13} and a capacitor C_{10} . The output terminal out is connected to ground through a resistor R_{14} and a capacitor C_{11} . The circuit is powered by a $5.203V$ supply and a $3.476V$ supply. Various simulation results are shown in red boxes, including peak-to-peak voltages (pd) and phase shifts (ps) for various components and nodes.

Рисунок В.2 – Рассеиваемые мощности

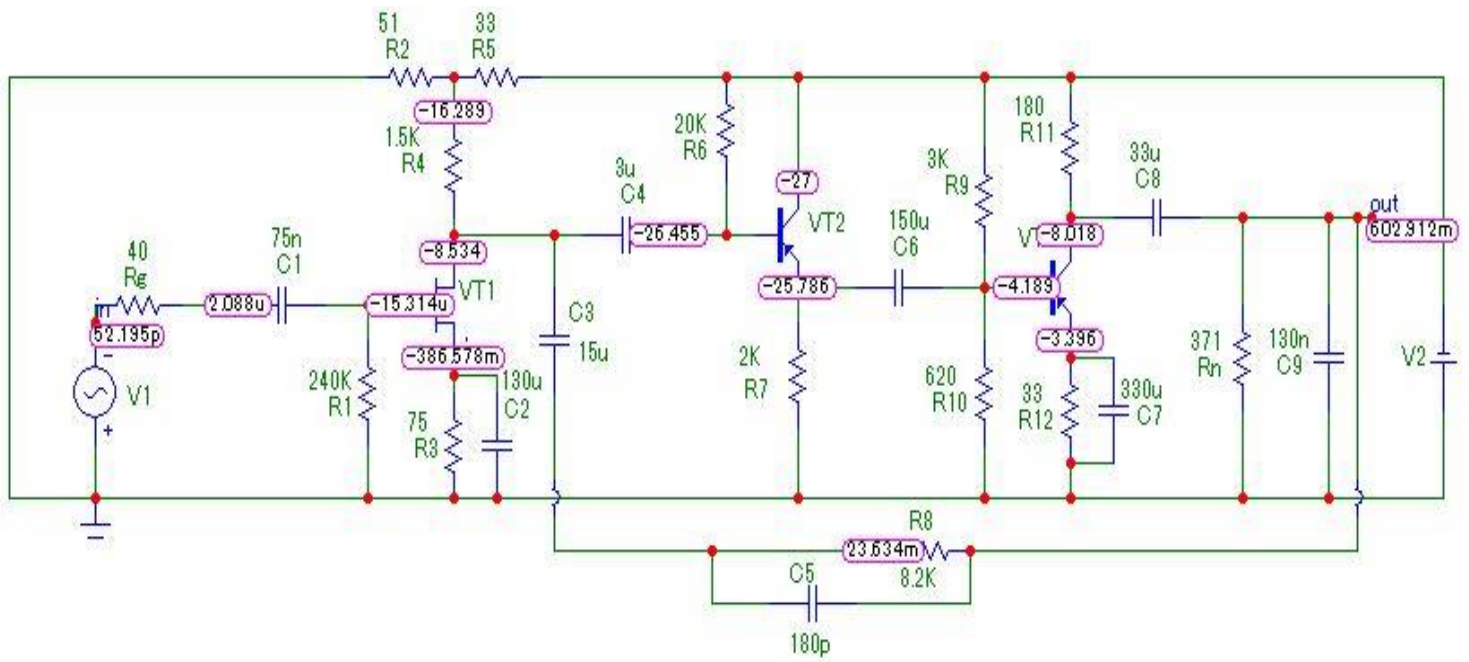


Рисунок В.3 – Узловые потенциалы

Приложение Г (обязательное)

Результаты частотного анализа

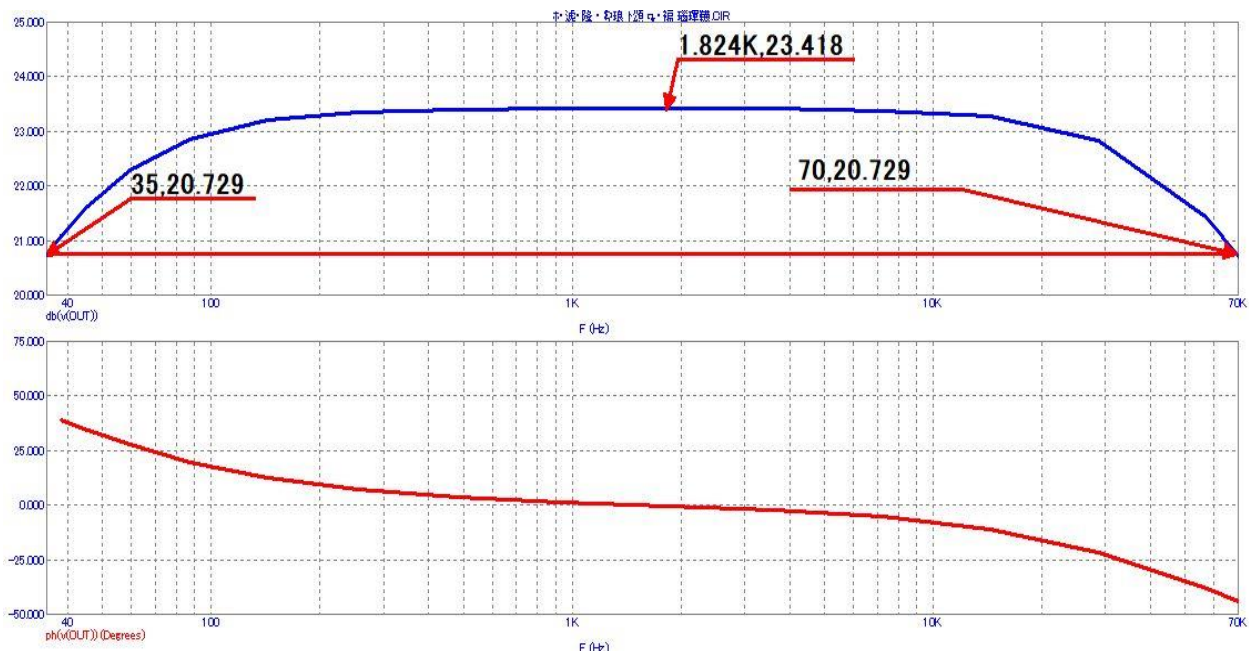


Рисунок Г.1 – АЧХ и ФЧХ выходного каскада

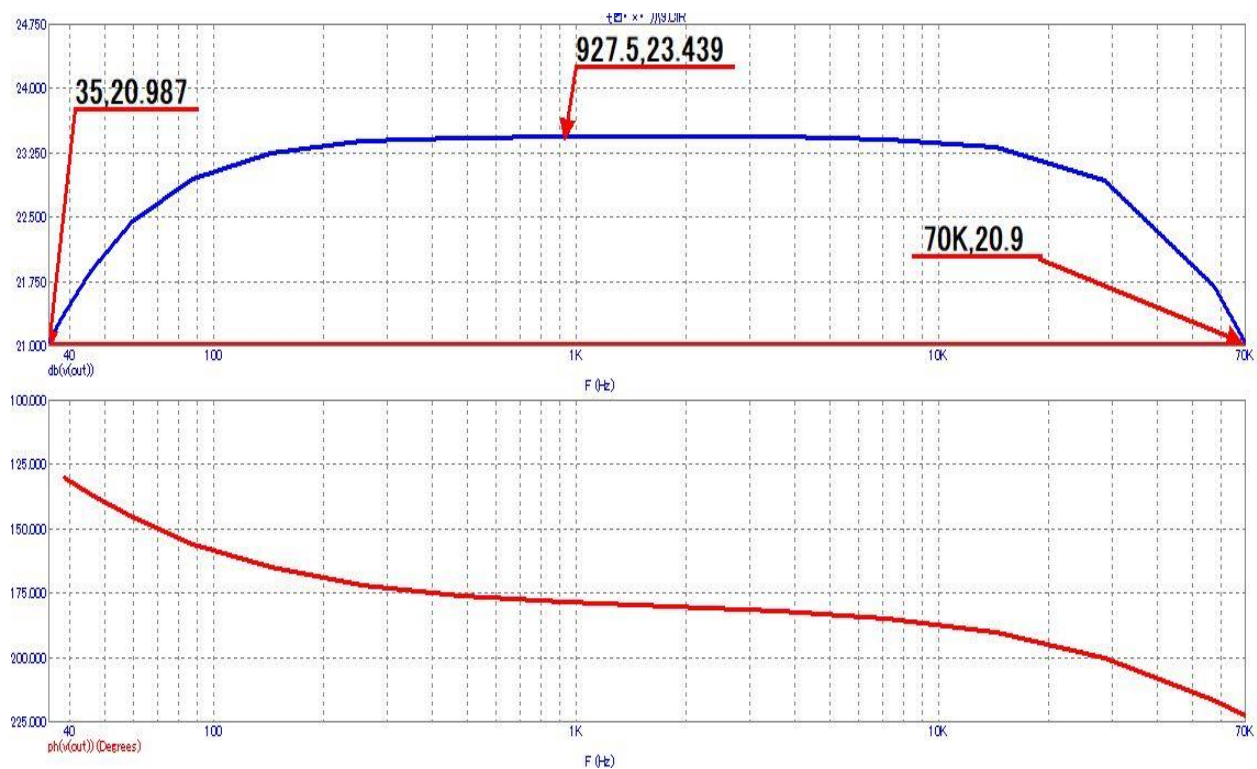


Рисунок Г.2 – АЧХ и ФЧХ трехкаскадного усилителя

Приложение Д (обязательное)

Оценка коэффициента нелинейных искажений

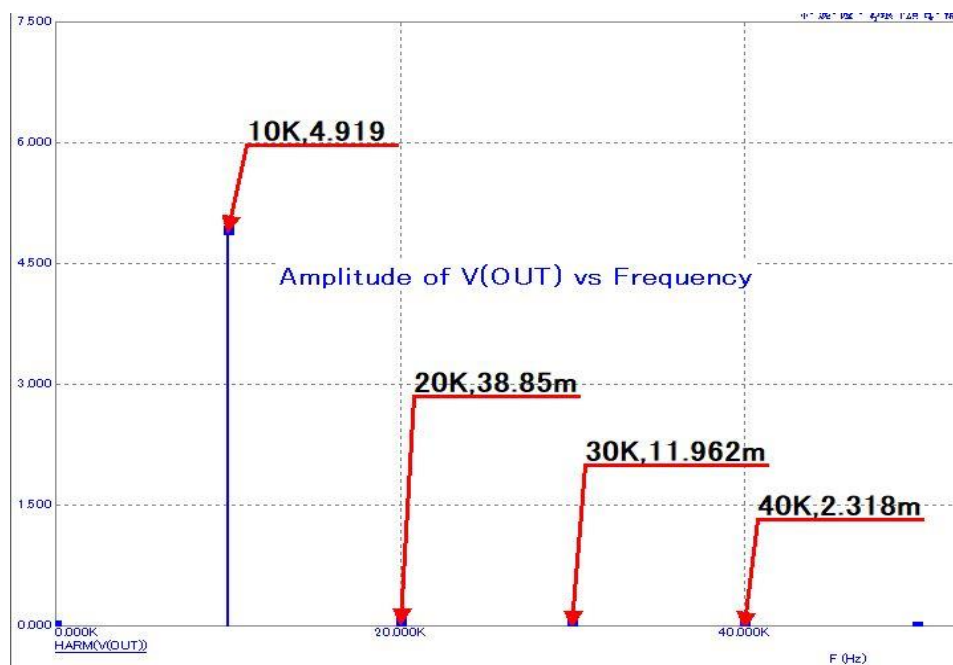


Рисунок Д.1 – График гармоник выходного каскада

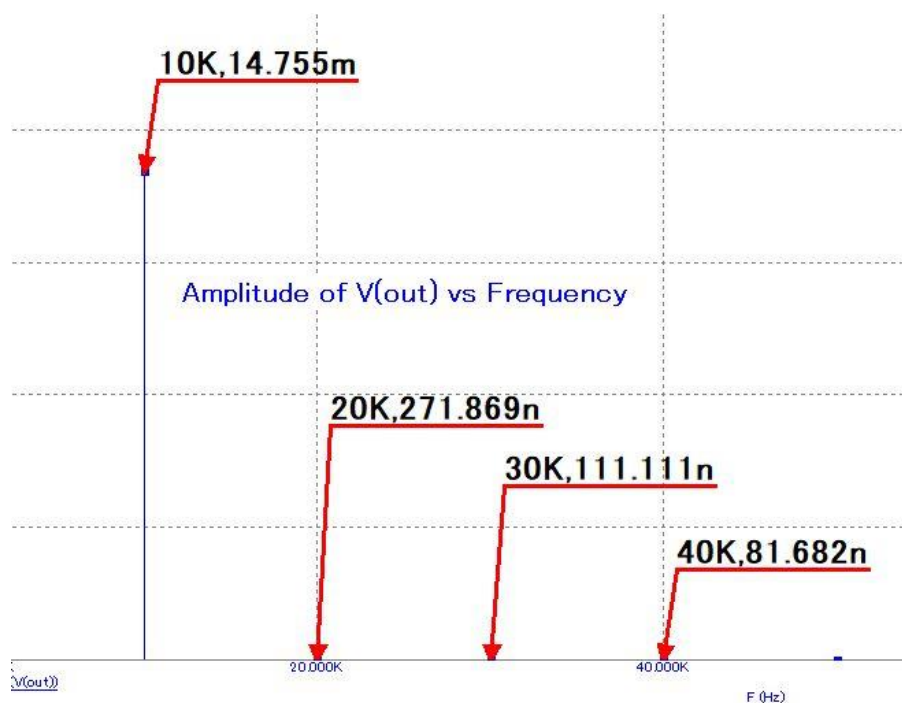


Рисунок Д.2 – График гармоник сигнала на выходе усилителя

Приложение Е (обязательное)

Схема электрическая принципиальная (на отдельных листах)

Лист 1 – Выходной каскад электронного усилителя;

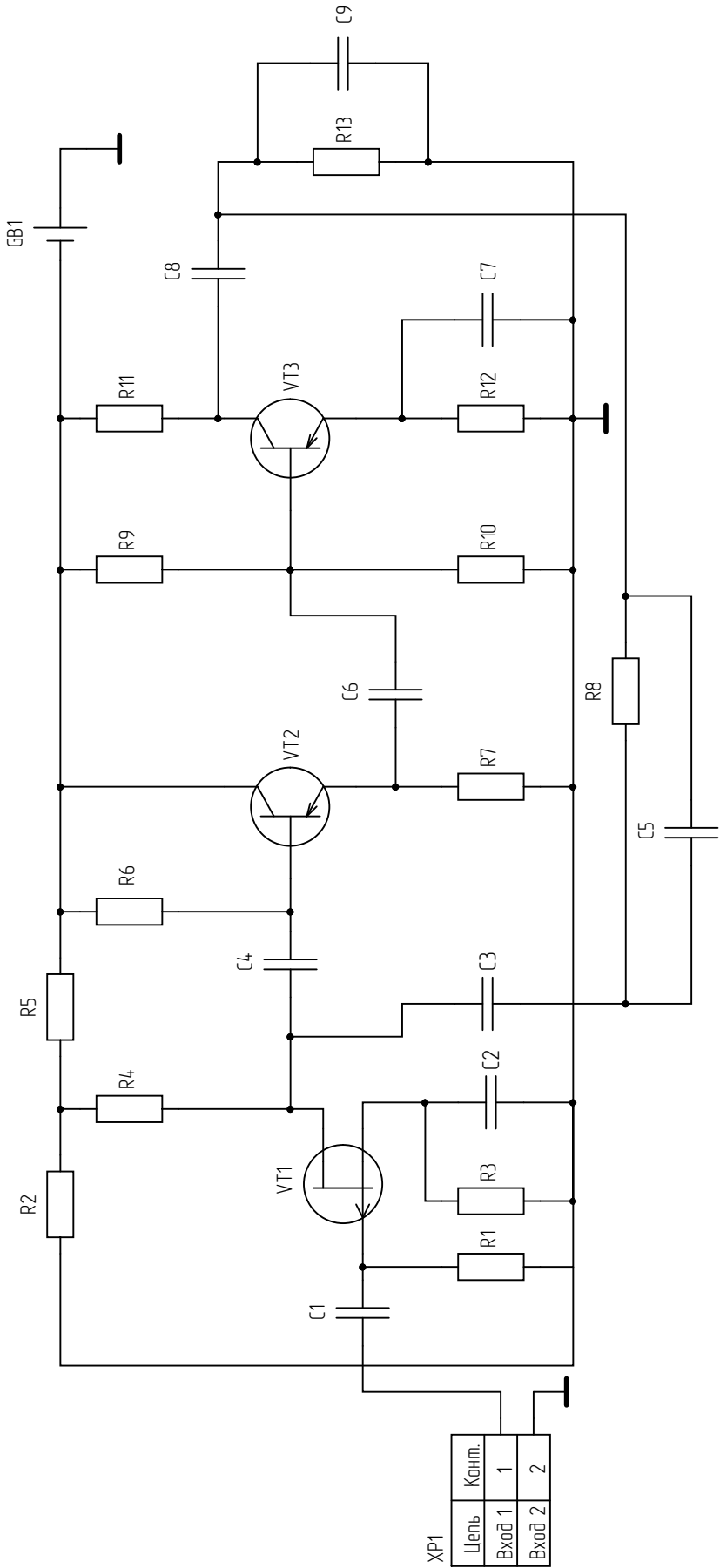
Лист 2 – Входной каскад с эмиттерным повторителем;

Лист 3 – Усилитель электронный;

Лист 4 – Перечень элементов.

Перв.примен.	КИПР.468731.001 ЭЗ										
Справ.№											
Подп. и дата	Инв.№ дубл.	Взам.инв.№	КИПР.468731.001 ЭЗ								
Инв.№ подл.	Подп. и дата	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Выходной каскад электронного усилителя Схема электрическая принципиальная	Лит.	Масса	Масштаб	
								Э		1:1	
Инв.№ подл.	Подп. и дата	Разраб.	Сафронов				Схема электрическая принципиальная	Лист	1	Листов	3
								ТУСУР РКФ			
								группа 235-1			
Инв.№ подл.	Подп. и дата	Пров.	Кривин								
Инв.№ подл.	Подп. и дата	Т.контр.									
Инв.№ подл.	Подп. и дата	Н.контр.									
Инв.№ подл.	Подп. и дата	Утв.									

ТУСУР РКФ
группа 235-1



Перв. примен.	Справ. №	Поз. обозна-чение	Наименование			Кол.	Примечание		
		Конденсаторы							
		С1	К10-17Б-75нФ ОЖ0.460.107 ТУ			1			
		С2	К50-35-130мкФ-450В ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С3	К50-35-15мкФ-35В ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С4	К50-35-3мкФ-35В ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С5	К10-17-180пФ ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С6	К50-35-150мкФ-450В ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С7	К50-35-330мкФ-450В ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С8	К50-35-33мкФ-35В ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		С9	К10-17-120нФ ОЖ0.464.214 ТУ			1			
		Резисторы							
		R1	МЛТ-0,25-240 кОм ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R2	SQP-7-50 Ом			1			
		R3	МЛТ-0,25-75 Ом ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R4	МЛТ-0,25-1,5 кОм ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R5	SQP-5-33 Ом ±5%			1			
		R6	МЛТ-0,25-20 кОм ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R7	МЛТ-0,5-2 кОм ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R8	МЛТ-0,25-8,2 кОм ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R9	МЛТ-0,25-3 кОм ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R10	МЛТ-0,5-620 Ом ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		R11	SQP-5-180 Ом ±5%			1			
		R12	МЛТ-0,5-33 Ом ±5% ОЖ0.467.180 ТУ			1			
		Транзисторы							
		VT1	2N3820			1			
		VT2	2N2946A			1			
		VT3	BD140			1			
		Разъемы							
		XP1	Соединение контактное ГОСТ 10434-82			1			
		КИПР 468731.001 ПЭЗ							
		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
		Разраб.	Сафранов						
		Пров.	Кривин						
		И.контр.							
		Утв.							
		Усилитель электронный Перечень элементов					Лит.	Лист	Листов
							3	1	1
							ТУСУР РКФ группа 235-1		

Копировал

Формат А4

УВАЖАЕМЫЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ!

Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение. Данный отчет не подлежит использованию в коммерческих целях.

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: emelay6@icloud.com / ID: 5238632

Проверяющий: emelay6@icloud.com / ID: 5238632)



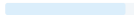
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://www.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 1
Начало загрузки: 20.01.2018 02:57:14
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: Пояснительная записка
Размер текста: 3114 кБ
Символов в тексте: 44124
Слов в тексте: 5135
Число предложений: 292

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 20.01.2018 02:57:16
Длительность проверки: 00:00:03
Комментарии: не указано
Модули поиска:

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
9,55% 	0% 	90,45% 



№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	1,72%	1,9%	2465.Автоматизированное ...	http://docme.ru	07 Мая 2017	Модуль поиска Интернет	6	6
[02]	1,16%	1,78%	Курсовая: "Расчет модели и ...	http://westud.ru	29 Мар 2016	Модуль поиска Интернет	3	4
[03]	1,55%	1,55%	Усилители на биполярных т...	http://knowledge.allbest.ru	раньше 2011	Модуль поиска Интернет	5	5