

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

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

Радиотехнический факультет (РТФ)

Г. М. Шевченко

НЕЛИНЕЙНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

**Методические указания
по выполнению курсовой работы для студентов
очной, заочной форм обучения и заочной
формы обучения с применением
дистанционных образовательных технологий**

Томск 2024

УДК 621.373
ББК 32.841

Корректор: А. Н. Миронова

Шевченко Г. М.

Нелинейные радиотехнические цепи : методические указания по выполнению курсовой работы для обучающихся с применением дистанционных образовательных технологий / Г. М. Шевченко. – Томск : ТУСУР, 2024. – 47 с.

Представлены общие методические указания по выполнению курсовых работ, определены тематика и порядок выполнения курсовых работ, приведены требования к их содержанию и оформлению.

Одобрено на заседании кафедры радиоэлектроники и систем связи, протокол № 8 от 16.05.2024

УДК 621.373
ББК 32.841
©Шевченко Г.М, 2024
©Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Общие указания по выполнению курсовой работы	5
2 Выполнение курсовой работы.....	6
3 Требования к содержанию курсовой работы.....	7
4 Требования к оформлению курсовой работы	11
5 Тематика курсовых работ	14
Список использованных источников.....	15
Рекомендуемая литература.....	16
Приложение А Образец оформления титульного листа.....	17
Приложение Б Пример выполнения курсовой работы	18
Приложение В Задания на выполнение курсовых работ по вариантам.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи» представляет собой значимую часть учебной программы, направленную на развитие ключевых навыков и компетенций студентов в области радиотехники и электроники. Работа способствует углубленному изучению нелинейных эффектов в радиотехнике, формирует понимание основных принципов функционирования нелинейных цепей и развивает умения анализировать и проектировать радиотехнические системы с учетом нелинейных эффектов.

В рамках курсовой работы студенты приобретают практический опыт, проводя исследования и эксперименты, анализируя результаты и формулируя рекомендации по оптимизации нелинейных радиотехнических цепей. Это позволяет им применить теоретические знания на практике, развивать аналитические навыки, а также научиться представлять свои исследовательские работы в соответствии с актуальными стандартами и требованиями области нелинейных радиотехнических цепей.

1 ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Согласно Образовательному стандарту ТУСУР 01-2021 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления», курсовая работа (КР) – это учебная работа, содержащая результаты теоретических и (или) экспериментальных исследований по отдельной учебной дисциплине.

Тема курсовых работ в дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи» связана с математическим моделированием, расчетом и анализом нелинейных эффектов в радиотехнических устройствах. Выполнение работы базируется на знании теоретического материала курса «Нелинейные радиотехнические цепи», а также на знаниях и умениях, полученных обучающимися при освоении предшествующих дисциплин: «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Электроника», «Радиоавтоматика».

2 ВЫПОЛНЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Основные этапы выполнения курсовой работы по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»:

1. Обзор литературы, связанной с темой исследования. Изучение существующих методов и моделей, которые могут быть применены в работе.

2. Сбор необходимых данных и параметров для исследуемой радиотехнической схемы, включающих в себя характеристики компонентов, схему подключения и другую информацию.

3. Разработка математической модели нелинейной радиотехнической схемы, включающую в себя уравнения и параметры, которые описывают поведение схемы.

4. Выполнение численных расчетов и симуляций для получения результатов с использованием специализированных программных средств или симуляторов для моделирования радиотехнической схемы.

5. Изучение результатов моделирования. Оценка частотных характеристик, амплитуды, фазы, нелинейных искажений и других параметров согласно заданию.

6. Анализ нелинейных эффектов, которые могут возникнуть в радиотехнической схеме, включая исследование искажений сигнала, гармонических и интермодуляционных искажений и других нелинейных явлений.

7. Оформление результатов выполнения курсовой работы.

3 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Образовательный стандарт ТУСУР 01-2021 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления» устанавливает общие требования и правила оформления курсовых работ, выполняемых студентами ТУСУРа в процессе обучения по направлениям подготовки и специальностям технического профиля.

Работа в общем случае должна включать следующие структурные элементы в указанной ниже последовательности:

- **титульный лист;**
- **задание (ТЗ);**
- **реферат на русском языке;**
- реферат на английском языке;
- сокращения, обозначения, термины и определения;
- **оглавление;**
- **введение;**
- **основную часть;**
- **заключение;**
- **список использованных источников;**
- приложения.

Обязательные структурные элементы выделены полужирным шрифтом.

К графическому материалу относят чертежи и схемы, которые представляют в составе пояснительной записки к курсовой работе.

Образец титульного листа продемонстрирован в приложении А. Задания (технические задания) по вариантам представлены в приложении В.

Реферат (ГОСТ 7.9, ГОСТ 7.32) размещается на отдельном листе (странице). Заголовком служит слово «Реферат», записанное с прописной

буквы симметрично тексту полужирным шрифтом, без нумерации. Реферат должен содержать:

- сведения о количестве листов (страниц) работы, иллюстраций, таблиц, использованных источников, приложений;
- перечень ключевых слов;
- текст реферата.

Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста работы, которые в наибольшей мере характеризуют его содержание. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и записываются прописными буквами в строку через запятые. Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- предмет исследования;
- цель работы;
- метод (-ы) исследования, аппаратуру и перечень работ;
- полученные результаты;
- дополнительные сведения (особенности выполнения и оформления работы и т. п.).

Изложение материала в тексте реферата должно быть кратким и точным. Следует избегать сложных грамматических оборотов. Оптимальный объем текста реферата – 850 печатных знаков (без пробелов), но не более одной страницы формата А4.

Оглавление представляет собой элемент пояснительной записки, включающий упорядоченный перечень всех материалов курсовой работы, представляемых к защите. В оглавлении перечисляют введение, порядковые номера и заголовки разделов и подразделов, заключение, список использованных источников, обозначения и заголовки приложений пояснительной записки и указывают номера страниц, на которых начинаются соответствующие

структурные элементы записки. При наличии самостоятельных конструкторских, технологических, программных и иных документов, помещаемых в пояснительную записку, их перечисляют в содержании с указанием обозначений и наименований.

Размещают оглавление после технического задания.

Заголовок «ОГЛАВЛЕНИЕ» записывают в верхней части страницы, симметрично тексту прописными буквами обычным шрифтом увеличенного размера (кегель 16).

В структурном элементе «Введение» представляют цель работы, область исследования и (или) область применения разрабатываемого объекта, их научное, техническое значение, а также оценку современного состояния решаемой научно-технической проблемы.

Основная часть пояснительной записки должна содержать перечень подлежащих разработке вопросов, указанных в ТЗ.

Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы и оценку полноты решения поставленных задач.

Список использованных источников должен включать сведения об источниках, на которые опирался автор при составлении работы. Сведения об источниках приводятся в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте работы арабскими цифрами с точкой и печатают с абзацного отступа. Заголовок «СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ» записывают в верхней части страницы симметрично тексту прописными буквами обычным шрифтом увеличенного размера (кегель 16).

В приложения рекомендуется включать материалы, дополняющие текст работы, если они не могут быть включены в основную часть. В приложения могут быть помещены (при наличии):

- дополнительные материалы к работе;

- промежуточные математические доказательства и расчеты;
- таблицы вспомогательных цифровых данных;
- описания применяемого в работе нестандартного оборудования;
- протоколы испытаний;
- инструкции, методики, описания алгоритмов и программ, разработанных в процессе выполнения работы;
- иллюстрации вспомогательного характера;
- акты внедрения;
- отчеты о патентных исследованиях;
- копии охранных документов.

В приложениях целесообразно приводить графический материал большого объема или формата, таблицы большого формата, дополнительные расчеты, описания аппаратуры и приборов, описания алгоритмов и программ, задач, решаемых с использованием программного обеспечения персональных компьютеров, и т. д. На все приложения в тексте пояснительной записки должны быть даны ссылки. Приложения располагают после списка использованных источников в порядке ссылок на них в тексте. Приложения обозначают заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Ё, З, И, О, Ч, Ъ, Ы, Ь, которые приводят после слова «ПРИЛОЖЕНИЕ». Если в документе одно приложение, оно обозначается «ПРИЛОЖЕНИЕ А».

Каждое приложение начинают с новой страницы. В верхней части страницы, симметрично тексту, приводят слово «ПРИЛОЖЕНИЕ», записанное прописными буквами обычным шрифтом увеличенного размера (кегель 16), и обозначение приложения.

4 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Пояснительную записку к курсовой работе необходимо оформлять строго в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

Работа должна быть выполнена в электронном виде с использованием компьютера. Формат листа А4 (210 × 297 мм).

Тип шрифта для всего текста работы – Times New Roman черного цвета размером 14 пт. Междустрочный интервал – 1,5 строки (в таблицах и рисунках используется одинарный междустрочный интервал). При создании текстового файла работы устанавливаются следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм. Абзацный отступ должен быть одинаковым по всему тексту работы (в том числе и в маркированных и нумерованных списках перечислений) и равен 1,25 см. Выравнивание текста производится по ширине страницы.

Текст работы разделяют на разделы и подразделы (или, соответственно, главы и параграфы). Каждый раздел (главу) рекомендуется начинать с новой страницы. Разделы (главы) должны иметь порядковые номера в пределах пояснительной записки, обозначенные арабскими цифрами и записанные с абзацного отступа. Подразделы могут быть разделены на пункты.

Подразделы и пункты должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела или подраздела. Отдельные разделы могут не иметь подразделов и состоять непосредственно из пунктов. Если раздел или подраздел состоит из одного пункта, этот пункт также нумеруется. Точка в конце номеров разделов, подразделов, пунктов не ставится.

Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки следует выполнять с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце и без подчеркивания. В начале заголовка

помещают номер соответствующего раздела, подраздела, пункта. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Расстояние между заголовком и текстом должно быть равно удвоенному межстрочному расстоянию: между заголовками раздела и подраздела – одному межстрочному расстоянию

Все таблицы нумеруют в пределах раздела арабскими цифрами. Над левым верхним углом таблицы помещают надпись «Таблица» с указанием номера таблицы, например: «Таблица 2.1» (первая таблица второго раздела). Таблица может иметь название. Название таблицы помещают после номера таблицы через тире с прописной буквы. На все таблицы должны быть ссылки в тексте пояснительной записки. Таблицу следует располагать непосредственно после абзаца, где она упоминается впервые, или на следующей странице.

Все иллюстрации в тексте пояснительной записки именуется рисунками. Рисунки нумеруются в пределах раздела (приложения) арабскими цифрами, например: «Рисунок 1.1» (первый рисунок первого раздела), «Рисунок В.1» (первый рисунок приложения В). Рисунок может иметь подрисуночный текст. Слово «рисунок», его номер и подрисуночную надпись помещают ниже изображения и пояснительных данных симметрично рисунку, например: «Рисунок 1.1 – Схема бистабильной ячейки с отдельными входами установки». На все рисунки должны быть ссылки в тексте пояснительной записки. Рисунки должны размещаться сразу после ссылки или на следующей странице.

Формулы следует выделять из текста в отдельную строку. Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, должны быть приведены непосредственно под формулой. Значение каждого символа дают с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова «где»

без двоеточия после него. Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, отделяют запятой. Формулы должны нумероваться в пределах раздела (приложения) арабскими цифрами. Номер формулы должен состоять из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках, например: (1.1). Формулы следует набирать в редакторе формул MathType.

Формулы необходимо выделять из текста в отдельную строку и оформлять в редакторе формул. Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, должны быть приведены непосредственно под формулой. Значение каждого символа дают с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

Запись числовых расчетов выполняют в следующем порядке:

- формула;
- знак «=» (равно);
- подстановка числовых величин и коэффициентов в последовательности буквенных обозначений в формуле и, через пробел, – обозначение единицы физической величины результата;
 - знак «=» (равно);
 - результат с единицей физической величины.

Нумерация страниц пояснительной записки должна быть сквозной, первой страницей является титульный лист. На титульном листе и в задании номер страницы не проставляется. Номер страниц проставляется в правом верхнем углу листа

Рекомендуемый объем работы без учета приложений составляет от 15 до 25 листов (страниц).

5 ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ РАБОТ

Выбор варианта для выполнения курсовой работы осуществляется по общим правилам с использованием следующей формулы:

$$V = (N \times K) \operatorname{div} 100,$$

где V – искомый номер варианта,

N – общее количество вариантов,

K – код варианта,

div – целочисленное деление.

При $V = 0$ выбирается максимальный вариант.

Пример расчета и моделирования нелинейных эффектов в радиотехнических устройствах представлен в приложении Б.

Описание компьютерной системы моделирования приведено в программе схемотехнического анализа Micro-Cap. Micro-Cap – SPICE-подобная программа для аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей с интегрированным визуальным редактором, ее можно скачать в личном кабинете студента.

Также курсовая работа может быть выполнена с использованием других программ – симуляторов электронных схем (например, Ltspice).

Технические задания по вариантам представлены в приложении В.

Дополнительно для 14-го варианта в модуле курса «Курсовой проект (работа)» представлены результаты экспериментальных измерений для проведения сравнительного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978.

2. Троян, П. Е. Твердотельная электроника : учеб. пособие / П. Е. Троян. – Томск : ТУСУР, 2006. – 330 с. – URL: <https://edu.study.tusur.ru/publications/538> (дата обращения: 05.07.2023).

3. КТ315 Справочник по отечественным транзисторам // Сайт 5v. – URL: <https://www.5v.ru/ds/trnz/kt315.htm> (дата обращения: 06.07.2023).

4. Шарапов, А. В. Аналоговая схемотехника : учеб. пособие / А. В. Шарапов. – Томск : ТМЦДО, 2005. – 193 с.

5. Петухов, В. М. Полевые и высокочастотные биполярные транзисторы средней и большой мощности и их зарубежные аналоги : справочник : в 4 т. / В. М. Петухов. – М. : КУБК-а, 1997.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Высшая школа, 2003. – 462 с.
2. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие для вузов / И. С. Гоноровский. – М. : Дрофа, 2006. – 717 с.
3. Сиберт, У. М. Цепи, сигналы, системы : в 2 ч. : пер. с англ. / У. М. Сиберт. – М. : Мир, 1988. – Ч. 1. – 336 с.
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1986. – 598 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Образец оформления титульного листа

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

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД С ОЭ

Курсовая работа
по дисциплине
«Нелинейные радиотехнические цепи»
Пояснительная записка
ФДО КР.431271.001ПЗ

Обучающийся гр. 111-1

И. И. Иванов

(подпись)

(дата)

Руководитель курсовой работы:

(должность, звание)

И. И. Иванов

(подпись)

(оценка)

М.П.

(дата)

Томск 20__

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример выполнения курсовой работы

Расчет усилительного каскада с ОЭ

В качестве примера для расчета выберем усилительный каскад с общим эмиттером (ОЭ).

Задание: выбрать рабочую точку в режиме покоя, рассчитать элементы и оценить основные параметры каскада с ОЭ (рис. 1) на транзисторе КТ315В при следующих исходных данных:

$$E = 24 \text{ В}, U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}, R_{\text{H}} = 1 \text{ кОм}, R_{\text{C}} = 1 \text{ кОм},$$

$$f_{\text{H}} = 20 \text{ Гц}, T_{\text{min}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_{\text{max}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где E – напряжение питания, $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение, R_{H} – сопротивление нагрузки, R_{C} – сопротивление коллектора, T_{min} и T_{max} – минимальная и максимальная температура соответственно.

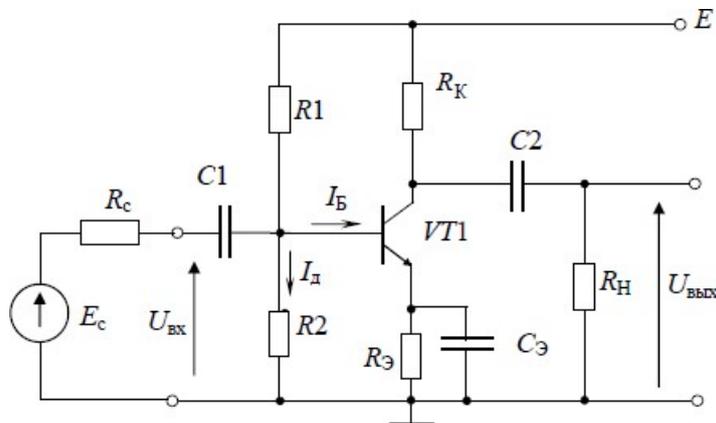


Рис. 1 – Усилительный каскад с ОЭ

Справочные материалы на транзистор КТ315В:

– максимально допустимое (импульсное) напряжение коллектор – база 40 В;

– максимально допустимое (импульсное) напряжение коллектор – эмиттер 40 В;

- максимально допустимый постоянный (импульсный) ток коллектора 100 мА;
- максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора без теплоотвода (с теплоотводом) 0,15 Вт;
- статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером 30–120;
- обратный ток коллектора $\leq 0,5$ мкА;
- граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером ≥ 250 МГц.

Выбор положения рабочей точки транзистора

Координаты рабочей точки рассчитываются так, чтобы получить без ограничения требуемые амплитуды напряжения и тока в нагрузке с учетом смещения рабочей точки в заданном диапазоне температур.

Напряжение в рабочей точке транзистора

$$U_0 = U_{КЭ\text{ нас}} + U_{\text{вых}} + \Delta U_{КЭ} = 0,4 + 5 + 1,6 = 7 \text{ В},$$

где $\Delta U_{КЭ}$ – допустимая нестабильность напряжения в рабочей точке в заданном диапазоне рабочих температур (выбрана равной 1,6 В).

Величина сопротивления резистора в цепи коллектора

$$R_K = \frac{E - U_{Э} - U_0 - U_{\text{вых}}}{I_{\text{min}} + U_{\text{вых}} / R_H} = \frac{24 - 5 - 7 - 5}{1 + 5} = 1,2 \text{ кОм},$$

где $U_{Э} = 5$ В (выбирается равным (10–20)% от E ; чем больше $U_{Э}$, тем лучше с точки зрения стабильности режима, но ниже КПД каскада);

$I_{\text{min}} = 1$ мА – минимальный ток транзистора (его величиной задаются так, чтобы исключить попадание рабочей точки транзистора в нелинейную область характеристик при малых токах).

Ток в рабочей точке

$$I_0 = I_{\min} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_K} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_H} = 1 + 5 + 4,2 = 10,2 \text{ мА.}$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе

$$P_K = U_0 I_0 = 7 \cdot 10,2 = 71,4 \text{ мВт.}$$

Коэффициент полезного действия выходной цепи

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Sigma}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{2R_H I_0 E} = \frac{5 \cdot 5}{2 \cdot 1 \cdot 10,2 \cdot 24} = 0,051, \text{ или } 5,1\%.$$

Максимальная температура перехода

$$T_{\text{П}} = T_{\text{max}} + \frac{P_K}{P_{\text{Доп}}} = 50 + 71,4 \cdot 0,67 = 98 \text{ }^\circ\text{C} < T_{\text{Доп}}.$$

Расчет элементов цепи смещения по постоянному току

Величина сопротивления резистора в цепи эмиттера

$$R_{\text{Э}} = U_{\text{Э}} / I_0 = 5 / 10,2 = 0,49 \text{ кОм.}$$

Сопротивление выходной цепи постоянному току

$$R_{\text{=}} = R_K + R_{\text{Э}} = 1,2 + 0,49 = 1,69 \text{ кОм.}$$

Проводим нагрузочную прямую постоянного тока через точку $E = 24 \text{ В}$ на оси абсцисс и точку $I = E / R_{\text{=}} = 14,2 \text{ мА}$ на оси ординат и отмечаем на ней рабочую точку в режиме покоя A . Ток базы в рабочей точке равен $I_{\text{Б0}} = 0,13 \text{ мА}$. Отметив положение рабочей точки на входной характеристике транзистора, находим напряжение на эмиттерном переходе ($U_{\text{БЭ0}} \approx 0,7 \text{ В}$).

Допустимое изменение тока коллектора

$$\Delta I_K = \frac{\Delta U_{\text{КЭ}}}{R_K + R_{\text{Э}}} = \frac{1,6}{1,2 + 0,49} = 0,95 \text{ мА.}$$

Температурное смещение выходных характеристик

$$\Delta I_T = \Delta I_{\text{К0}} + I_0 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T \approx 10,2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 60 = 0,3 \text{ мА,}$$

где $\Delta I_{\text{К0}}$ – изменение обратного тока коллекторного перехода, которым для кремниевого транзистора можно пренебречь;

$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} = 60^\circ\text{C}$ – изменение температуры окружающей среды.

Допустимый коэффициент температурной нестабильности каскада

$$S' = \Delta I_K / \Delta I_T = 0,95 / 0,3 = 3,2.$$

Параллельное сопротивление базовых резисторов

$$R_{\text{Б}} = R_{\text{Э}} \frac{(1+\beta)(S'-1)}{1+\beta-S'} = 0,49 \frac{101 \cdot 2,2}{101-3,2} = 1,1 \text{ кОм.}$$

Верхний резистор базового делителя

$$R1 = \frac{ER_{\text{Б}}}{U_{\text{Э}} + U_{\text{БЭ}} + R_{\text{Б}}I_{\text{Б}}} = \frac{24 \cdot 1,1}{5 + 0,7 + 1,1 \cdot 0,13} = 4,5 \text{ кОм.}$$

Нижний резистор базового делителя

$$R2 = \frac{R1 \cdot R_{\text{Б}}}{R1 - R_{\text{Б}}} = \frac{4,5 \cdot 1,1}{4,5 - 1,1} = 1,5 \text{ кОм.}$$

Выбираем резисторы УЛМ или МЛТ ряда E12 с допустимым отклонением $\pm 10\%$:

$$R_{\text{Э}} = 470 \text{ Ом}; R_{\text{К}} = 1,2 \text{ кОм}; R1 = 4,7 \text{ кОм}; R2 = 1,5 \text{ кОм.}$$

Основные показатели усилителя в области средних частот

Сопротивление выходной цепи транзистора переменному току

$$R_{\sim} = R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}} = \frac{1,2 \cdot 1}{1,2 + 1} = 0,545 \text{ кОм.}$$

Проводим нагрузочную прямую переменного тока через рабочую точку A и точку на оси абсцисс при $U_{\text{КЭ}} = U_0 + I_0 R_{\sim} = 12,6 \text{ В}$.

Оценим входное сопротивление транзистора (его можно определить также по углу наклона касательной в рабочей точке на входной характеристике):

$$h_{11\text{Э}} = r_{\text{Б}} + r_{\text{Э}}(1+\beta) = 50 + 2,55 \cdot 101 = 308 \text{ Ом,}$$

где $r_{\text{Б}} \approx 50 \text{ Ом}$, $r_{\text{Э}} = 26/10,2 = 2,55 \text{ Ом}$.

Определяем коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_0 = \frac{\beta R_{\sim}}{h_{11Э}} = \frac{100 \cdot 545}{308} = 177.$$

Входное сопротивление каскада

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{Б}} \parallel h_{11Э} = \frac{1,1 \cdot 0,308}{1,1 + 0,308} = 0,24 \text{ кОм.}$$

Сквозной коэффициент усиления

$$K_e = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_c} = \frac{R_{\text{ВХ}} K_0}{R_{\text{ВХ}} + R_c} = \frac{0,24 \cdot 177}{0,24 + 1} = 34.$$

Необходимое значение ЭДС источника сигнала

$$E_c = U_{\text{ВЫХ}} / K_e = 5000 / 34 = 147 \text{ мВ.}$$

Коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{K_0 R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{177 \cdot 0,24}{1} = 42,5.$$

Коэффициент усиления сигнала по мощности

$$K_p = K_0 \cdot K_I = 177 \cdot 42,5 = 7523.$$

Расчет величин емкостей конденсаторов

Задаемся допустимой величиной фазовых сдвигов на нижней рабочей частоте (например, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\varphi_2 = 10^\circ$, $\varphi_3 = 25^\circ$) для каждого из конденсаторов из условия

$$\varphi_{\text{н}} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \arctg \sqrt{M_{\text{н}}^2 - 1} = 45^\circ.$$

Емкости конденсаторов (с учетом того, что один радиан равен 57°):

$$C1 \geq \frac{1}{2\pi f_{\text{н}} (R_{\text{ВХ}} + R_c) \varphi_1} = \frac{57 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 20 \cdot (0,24 + 1) \cdot 10} = 36,6 \text{ мкФ};$$

$$C2 \geq \frac{1}{2\pi f_{\text{н}} (R_{\text{Н}} + R_{\text{К}}) \varphi_2} = \frac{57 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 20 \cdot (1 + 1,2) \cdot 10} = 20,6 \text{ мкФ};$$

$$C_3 \geq \frac{1 + \beta}{2\pi f_H (R_c \parallel R_B + h_{113}) \Phi_3} = \frac{101 \cdot 57 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 20 \cdot (0,52 + 0,31) \cdot 25} = 2209 \text{ мкФ}.$$

Выбираем электролитические конденсаторы из ряда E12:

$$C1 = 33 \text{ мкФ}; C2 = 22 \text{ мкФ}; C_3 = 2000 \text{ мкФ}.$$

Оценка полосы пропускания в области верхних частот

Постоянная времени каскада в области верхних частот

$$\tau_{\beta} = \tau_{\beta} + C_{\beta} R_{\beta} (1 + \beta) = 0,03 + 7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,545 \cdot 101 = 0,42 \text{ мкс},$$

где $\tau_{\beta} = \frac{1}{2\pi f_{\beta}} = \frac{1}{6,28 \cdot 5} \approx 0,03 \text{ мкс}.$

Верхняя граничная частота на уровне $M_B = 3 \text{ дБ}$ ($M_B = \sqrt{2}$)

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_{\beta}} = \frac{1000}{6,28 \cdot 0,42} = 379 \text{ кГц}.$$

Влияние отрицательной обратной связи на нелинейные искажения

В усилителе без обратной связи при большом входном сигнале происходит искажение формы выходного сигнала, и в выходном напряжении кроме основной гармоники появляются высшие гармонические составляющие. При введении отрицательной обратной связи (ООС) высшие гармоники через звено обратной связи подаются на вход усилителя и усиленными вычитаются из выходного напряжения усилителя. Таким образом, содержание гармоник при том же значении выходного напряжения (для этого придется поднять усиление сигнала в A раз) уменьшится, т. е. нелинейные искажения в усилителе с ООС будут меньше.

Влияние отрицательной обратной связи на величину входного и выходного сопротивлений усилителя

Входное сопротивление усилителя с последовательной ООС определяется по формуле ($U_{OC} = -U_{BX}K\gamma$) [5]:

$$R_{\text{вхОС}} = \frac{U}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{ОС}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вх}} + U_{\text{вх}}K\gamma}{I_{\text{вх}}} = R_{\text{вх}} (1 + K\gamma) = R_{\text{вх}} A. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что входное сопротивление усилителя при введении последовательной ООС возрастает пропорционально глубине обратной связи.

Выходное сопротивление усилителя с ООС определяется как отношение напряжения холостого хода к току короткого замыкания в выходной цепи:

$$R_{\text{выхОС}} = \frac{U_{\text{ХХ}}}{I_{\text{КЗ}}}. \quad (2)$$

На холостом ходе обратная связь остается, поэтому $U_{\text{ХХ}} = K_{\text{ХХ}}U_{\text{ХХ}}/A$. При коротком замыкании обратная связь исчезает, поэтому $I_{\text{КЗ}} = K_{\text{ХХ}}U_{\text{ХХ}}/R_{\text{ВЫХ}}$.

Из выше сказанного следует:

$$R_{\text{выхОС}} = \frac{K_{\text{ХХ}}U_{\text{вх}}/A}{K_{\text{ХХ}}U_{\text{вх}}/R_{\text{ВЫХ}}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{A}. \quad (3)$$

Другими словами, выходное сопротивление усилителя при введении ООС по напряжению уменьшается пропорционально глубине обратной связи по сравнению с выходным сопротивлением усилителя до введения обратной связи $R_{\text{ВЫХ}}$ (3).

При введении параллельной по входу ООС входное сопротивление усилителя уменьшается, а при введении ООС по току возрастает выходное сопротивление усилителя. Следовательно, выбирая один из типовых способов введения ООС, можно в нужную сторону изменять величины входного и выходного сопротивлений усилителя.

Искажения на различных диапазонах частот

В качестве примера будем использовать схему усилительного каскада с ОЭ (рис. 1).

1. На нижних частотах возрастает сопротивление разделительных конденсаторов $C1$ и $C2$. Это приводит к образованию делителя напряжения во входной и выходной цепях усилительного каскада, вследствие чего уменьшается коэффициент передачи входной цепи и не всё сформированное на коллекторе напряжение сигнала доходит до нагрузки. Чем больше емкости разделительных конденсаторов, тем меньше коэффициент частотных искажений на низких частотах [5].

Анализ каскада в области нижних частот нужен для получения расчетных соотношений для выбора емкостей разделительных конденсаторов по допустимой величине коэффициента частотных искажений M_n на нижней граничной частоте f_n для усилителей гармонических сигналов или по допустимой величине относительного спада вершины Δ импульса длительностью t_n для усилителей импульсных сигналов.

Соотношения для оценки вносимых конденсатором $C1$ частотных и фазовых искажений:

$$M_{C1}(\omega) = \frac{K_{\text{вх}}}{K_{\text{вх}}(\omega)} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_1}\right)^2},$$
$$\varphi_1(\omega) = \arg K_{\text{вх}}(j\omega) = \arctg \frac{1}{\omega\tau_1}.$$

2. В области верхних частот учитывают влияние емкости коллекторного перехода C_K и инерционность процесса рекомбинации неосновных носителей.

Оценить частотные и фазовые искажения на верхних частотах (в том числе и на верхней граничной частоте $\omega_v = 2\pi f_v$), а также время нарастания фронта импульса на выходе каскада можно по формулам:

$$M_{\text{в}}(\omega) = \sqrt{1 + (\omega\tau_{\text{в}})^2}, \quad \varphi_{\text{в}}(\omega) = -\arctg \omega\tau_{\text{в}}, \quad t_{\text{в}} = 2,2\tau_{\text{в}},$$

где $\tau_{\text{в}} = \tau_{\beta} + [C_{\text{н}} + C_{\text{к}}(1 + h_{21\text{э}})]R_{\text{н}}$.

Оценка нелинейных искажений с помощью коэффициента гармоник

На практике распространена оценка нелинейных искажений с использованием графических методов [5, 6]. Но в случае малых нелинейностей менее 100 мВ допускается использовать аналитические методы расчета.

При гармоническом входном сигнале выходной сигнал усилителя по форме отличается от гармонического, то есть в усилителе появляются нелинейные искажения. Нелинейные искажения объясняются нелинейностью вольт-амперной характеристики активных элементов, применяемых в усилителе. Нелинейные искажения со спектральной точки зрения – это появление в выходном сигнале усилителя не только усиленного входного сигнала, но и его высших гармоник [5].

При усилении гармонического сигнала степень нелинейности принято оценивать коэффициентом нелинейных искажений (коэффициентом гармоник):

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{K=2}^{\infty} P_K}{P_1}} \approx \frac{\sqrt{I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + I_{4m}^2}}{I_{1m}},$$

где P_K – мощность K -й гармоники выходного сигнала; I_{Km} – амплитудное значение K -й гармоники выходного тока; P_1 – мощность первой гармоники выходного сигнала; I_{1m} – амплитудное значение первой гармоники выходного тока.

Моделирование усилителя

Схема каскада со значениями постоянных токов и напряжений показана на рисунке 2.

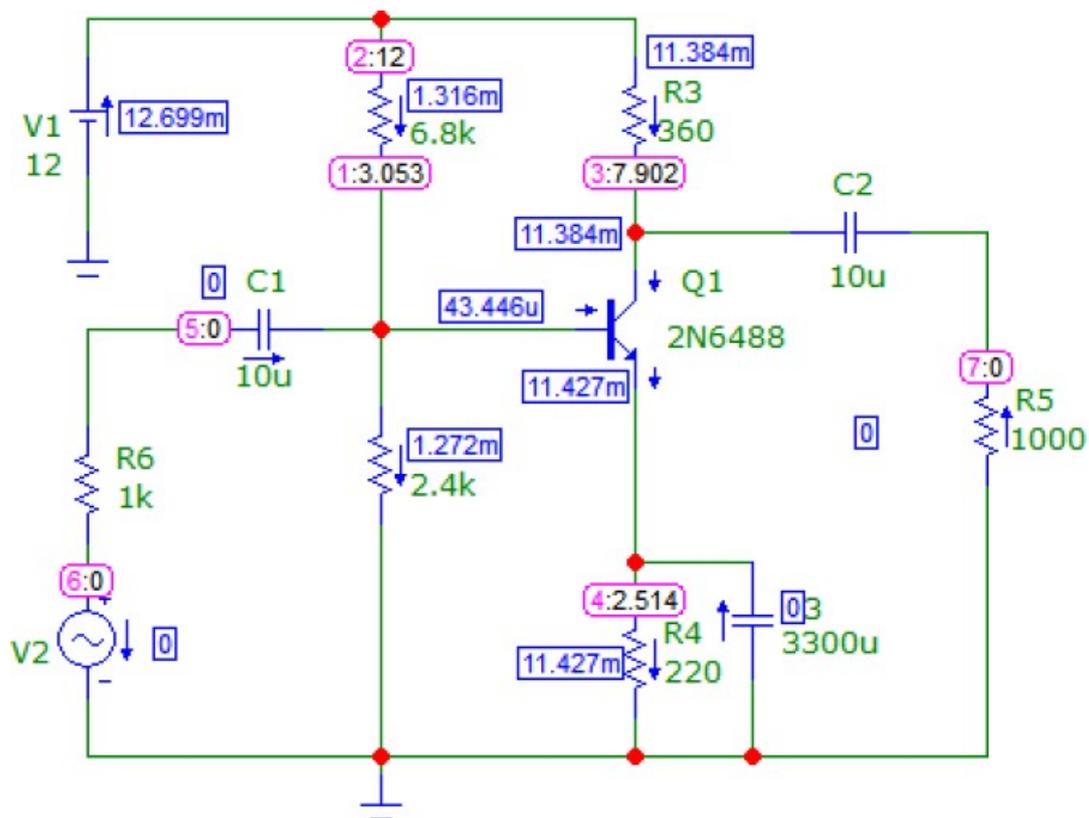


Рис. 2 – Усилительный каскад с ОЭ

Результаты расчета и моделирования по постоянному току сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета и моделирования по постоянному току

Показатель	$U_{кэ0}$, В	$I_{к0}$, мА	$U_{бэ0}$, В	$I_{б0}$, мкА	U_{R3} , В
Расчет	5	12,5	0,541	48	2,4
Модель	5,388	11,384	0,539	43,446	2,514

Установки анализа при снятии осциллограммы выходного напряжения показаны на рисунке 3.

Для расчёта коэффициента гармоник используются функции HARM, THD, FFT. Функции HARM и FFT рассчитывают спектр сигнала, а THD рассчитывает коэффициент гармоник через результаты, полученные при помощи функции FFT.

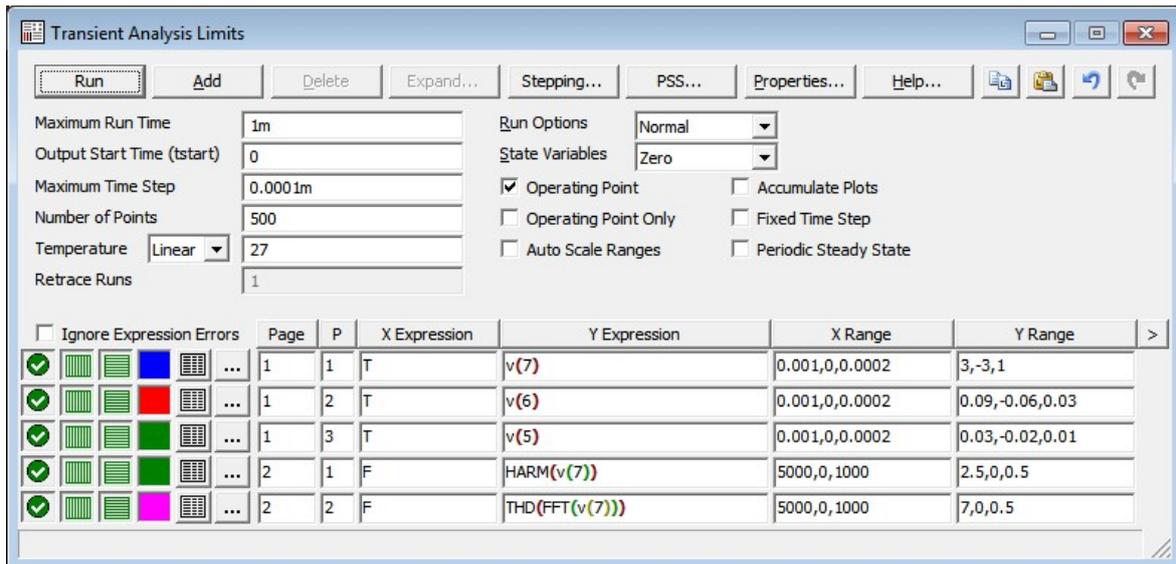


Рис. 3 – Установки анализа при снятии осциллограммы выходного напряжения

Аргументом функций HARM и FFT может быть любой сигнал, а функции THD – спектр любого сигнала. Для того чтобы рассчитать коэффициент гармоник на выходе, необходимо задать выражение $\text{THD}(\text{FFT}(v(7)))$ в установках анализа программы Transient Analysis Limits (рис. 3).

Делаем отметку в окне **Operating Point** (рис. 4), запускаем анализ нажатием кнопки **Run** (▶). Получим осциллограммы напряжения в узлах $V(7)$, $V(6)$ и $V(5)$ (рис. 4).

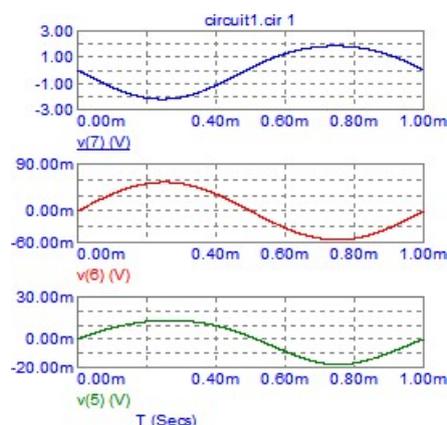


Рис. 4 – Осциллограммы: выходного сигнала $V(7)$ (синий луч); ЭДС источника сигнала $V(6)$ (красный луч); напряжения на входе усилителя $V(5)$ (зеленый луч)

Не выходя из анализа **Transient**, снимаем отметку в окне **Operating Point** (рис. 5), а в окне **State Variable** выбираем режим **Leave**.

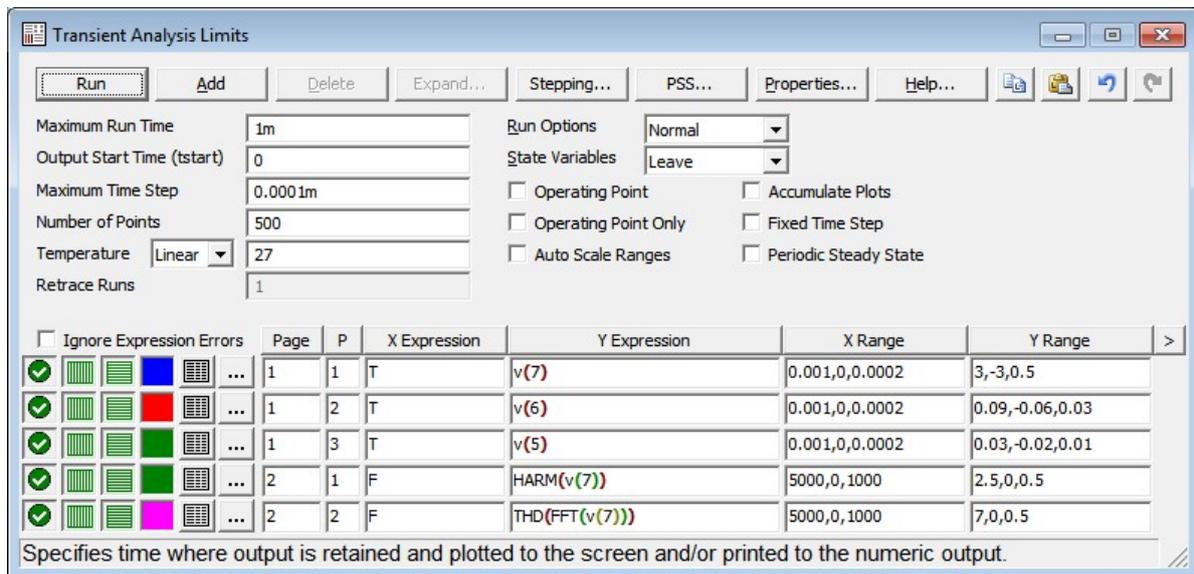


Рис. 5 – Установки анализа при снятии осциллограммы выходного напряжения и расчет коэффициента гармоник

Запускаем несколько раз анализ в этом режиме, нажимая кнопку **Run**. Это нужно делать для завершения переходных процессов в схеме усилителя. Признаком завершения указанных процессов является совпадение значений напряжений в начальной и конечной точках интервала времени расчета (рис. 4).

На рисунке 6 показан результат расчёта коэффициента гармоник.

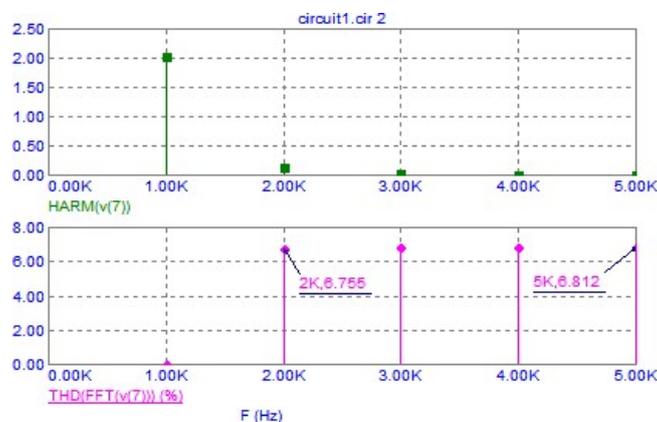


Рис. 6 – Результаты расчета коэффициента гармоник

По рисунку 6 определяем, что при учёте только второй гармоники коэффициент гармоник $k_T = 6,755\%$, а при учёте со второй по пятую $k_T = 6,812\%$.

Установки анализа при расчете АЧХ показаны на рисунке 7.

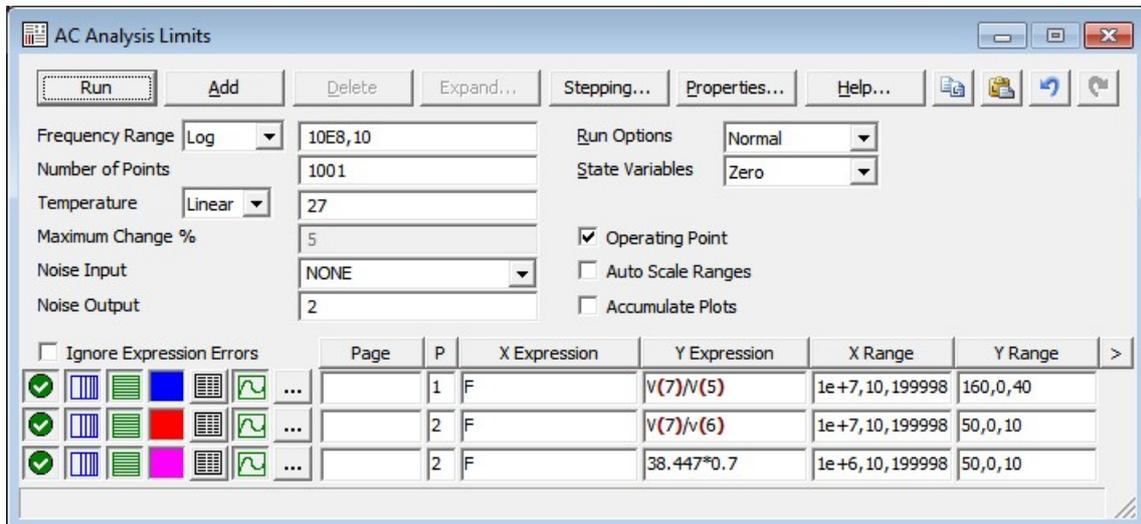


Рис. 7 – Установки анализа при снятии АЧХ

АЧХ устройства показаны на рисунке 8.

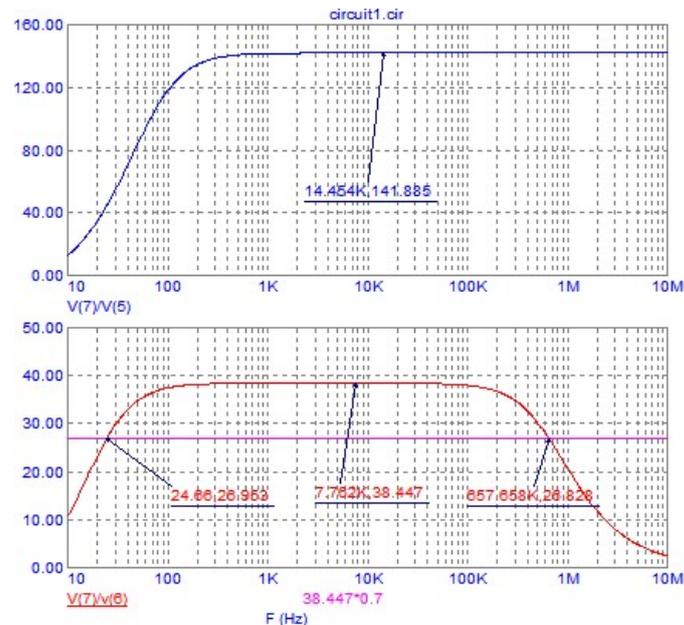


Рис. 8 – АЧХ усилителя – $V(7)/V(5)$ (синий луч), сквозная АЧХ $V(7)/V(6)$ (красный луч)

По рисунку 8 видно, что коэффициент усиления усилителя по напряжению K_0 составляет 142, сквозной коэффициент усиления $K_e = 38$, нижняя граничная частота $f_n = 25$ Гц, верхняя $f_v = 656$ кГц.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Задания на выполнение курсовых работ по вариантам

Вариант 1

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Резонансный усилитель.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Резонансная частота – 1,5 кГц. Напряжение питания – 15 В. Сопротивление нагрузки – 50 Ом. Амплитуда входного сигнала – 1 В.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.
- 4.3. Рассчитать схему избирательного усилителя и выбрать элементную базу.
- 4.4. Провести моделирование и оценить работоспособность избирательного усилителя в САПР.
- 4.5. Оценить нелинейные искажения резонансного усилителя.
- 4.6. Оценить влияние уровня входного сигнала на нелинейные искажения избирательного усилителя.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
«__» _____ 20__ г.

Вариант 2

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Амплитудный детектор на операционных усилителях.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Амплитуда входного сигнала – 3 В. Входной сигнал – прямоугольный. Период – 2 мс.
Время импульса – 45%. Погрешность – не более 1%. Сопротивление нагрузки – 1,2 кОм.
Диапазон рабочих температур – 20 ± 10 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.

4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.

4.3. Рассчитать схему амплитудного детектора и выбрать элементную базу.

4.4. Оценить нелинейные искажения.

4.5. Провести моделирование и оценить работоспособность амплитудного детектора
в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал:

_____ «__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению:

_____ «__» _____ 20__ г.

Вариант 3

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Амплитудный детектор на операционных усилителях.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Амплитуда входного сигнала – 2 В. Входной сигнал – синусоидальный. Частота – 1 кГц. Погрешность – не более 1%. Сопротивление нагрузки – 500 Ом. Диапазон рабочих температур – 20 ± 10 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.

4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.

4.3. Рассчитать схему амплитудного детектора и выбрать элементную базу.

4.4. Провести моделирование и оценить работоспособность амплитудного детектора в САПР.

4.5. Оценить нелинейные искажения.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал:

_____ «__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению:

_____ «__» _____ 20__ г.

Вариант 4

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Амплитудный детектор на операционных усилителях.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Амплитуда входного сигнала – 2 В. Входной сигнал – прямоугольный. Период – 1 мс.
Время импульса – 30%. Погрешность – не более 1%. Сопротивление нагрузки – 1 кОм.
Диапазон рабочих температур – 20 ± 10 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.
- 4.3. Рассчитать схему амплитудного детектора и выбрать элементную базу.
- 4.4. Оценить нелинейные искажения.
- 4.5. Провести моделирование и оценить работоспособность амплитудного детектора в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал:

_____ «__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению:

_____ «__» _____ 20__ г.

Вариант 5

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Амплитудный детектор на операционных усилителях.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Амплитуда входного сигнала – 3 В. Входной сигнал – прямоугольный. Период – 4 мс.
Время импульса – 45%. Погрешность – не более 1%. Сопротивление нагрузки – 1,3 кОм.
Диапазон рабочих температур – 20 ± 10 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.
- 4.3. Рассчитать схему амплитудного детектора и выбрать элементную базу.
- 4.4. Оценить нелинейные искажения.
- 4.5. Провести моделирование и оценить работоспособность амплитудного детектора в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал:

_____ «__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению:

_____ «__» _____ 20__ г.

Вариант 6

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Усилительный каскад с ОЭ.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Транзистор 2SC380. Напряжение питания 18 В, выходное напряжение 4 В, сопротивление нагрузки 1 кОм, внутреннее сопротивление источника питания 1 кОм, частота 26 Гц, температура от –10 до 50 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы
- 4.3. Построить выходную характеристику.
- 4.4. Выбрать положение рабочей точки транзистора в режиме покоя.
- 4.5. Построить нагрузочные прямые постоянного и переменного тока.
- 4.6. Рассчитать элементы усилительного каскада с ОЭ.
- 4.7. Оценить нелинейные искажения.
- 4.8. Проанализировать частотную характеристику усилителя с общим эмиттером.
- 4.9. Провести моделирование и оценить работоспособность усилительного каскада с ОЭ в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
«__» _____ 20__ г.

Вариант 7

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
« ____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Усилительный каскад с ОЭ.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Транзистор 2N6488G. Напряжение питания 12 В, выходное напряжение 2 В, сопротивление нагрузки 1 кОм, внутреннее сопротивление источника питания 1 кОм, частота 30 Гц, температура от –10 до 50 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы
- 4.3. Построить выходную характеристику.
- 4.4. Выбрать положение рабочей точки транзистора в режиме покоя.
- 4.5. Построить нагрузочные прямые постоянного и переменного тока.
- 4.6. Рассчитать элементы усилительного каскада с ОЭ.
- 4.7. Оценить нелинейные искажения.
- 4.8. Изучение влияния тока коллектора, напряжение коллектор – эмиттер и тока базы на характеристики усилителя.
- 4.9. Провести моделирование и оценить работоспособность усилительного каскада с ОЭ в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
« ____ » _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
« ____ » _____ 20__ г.

Вариант 8

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____ / А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Усилительный каскад с ОЭ.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Транзистор КТ315. Напряжение питания 18 В, выходное напряжение 3 В, сопротивление нагрузки 3,1 кОм, внутреннее сопротивление источника питания 1,3 кОм, частота 100 Гц, температура от -10 до 50 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы
- 4.3. Построить выходную характеристику.
- 4.4. Выбрать положение рабочей точки транзистора в режиме покоя.
- 4.5. Построить нагрузочные прямые постоянного и переменного тока.
- 4.6. Рассчитать элементы усилительного каскада с ОЭ.
- 4.7. Оценить нелинейные искажения.
- 4.8. Измерить частотную характеристику каскада усилителя и проверить его работу в широком диапазоне частот.
- 4.9. Провести моделирование и оценить работоспособность усилительного каскада с ОЭ в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
«__» _____ 20__ г.

Вариант 9

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

- 1. Тема работы: Влияние отрицательной обратной связи на величину входного и выходного сопротивления усилителя.**
- 2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.**
- 3. Перечень вопросов, подлежащих разработке:**
 - 3.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
 - 3.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.
 - 3.3. Рассчитать элементы усилителя.
 - 3.4. Оценить влияние отрицательной обратной связи на величину входного и выходного сопротивления усилителя.
 - 3.5. Провести моделирование и оценить работоспособность схемы в САПР.

4. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
«__» _____ 20__ г.

Вариант 10

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой РСС

_____ / А. В. Фатеев

«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

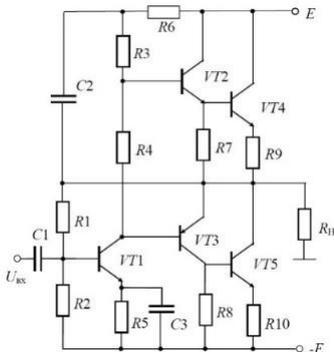
на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Выходной каскад УНЧ.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Схема выходного каскада УНЧ. Режим работы биполярных транзисторов АВ. Выходная мощность 10 Вт, сопротивлением нагрузки $R_H = 5 \text{ Ом}$.



4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Рассчитать и выбрать элементы выходного каскада УНЧ.
- 4.3. Определить коэффициент полезного действия.
- 4.4. Оценить нелинейные искажения.
- 4.5. Проанализировать влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на отрицательную обратную связь по напряжению.
- 4.6. Оценить качественно усилительные свойства каскада на средних частотах.
- 4.7. Провести моделирование и оценить работоспособность выходного каскада УНЧ в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____

«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____

«__» _____ 20__ г.

Вариант 11

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
« ____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Влияние отрицательной обратной связи на величину входного и выходного сопротивления усилителя.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

3.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.

3.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.

3.3. Рассчитать элементы усилителя.

3.4. Оценить влияние отрицательной обратной связи на величину входного и выходного сопротивления усилителя.

3.5. Провести моделирование и оценить работоспособность схемы в САПР.

4. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
_____ «__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
_____ «__» _____ 20__ г.

Вариант 12

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой РСС

_____ / А. В. Фатеев

«___» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

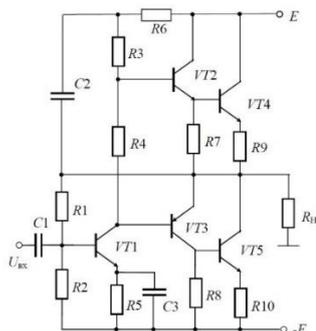
на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Выходной каскад УНЧ.

2. Срок сдачи работы: «___» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Схема выходного каскада УНЧ. Режим работы биполярных транзисторов АВ. Выходная мощность 13 Вт, сопротивлением нагрузки $R_H = 75 \text{ Ом}$.



4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Рассчитать и выбрать элементы выходного каскада УНЧ.
- 4.3. Определить коэффициент полезного действия.
- 4.4. Оценить нелинейные искажения.
- 4.5. Проанализировать влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на отрицательную обратную связь по напряжению.
- 4.6. Оценить качественно усилительные свойства каскада на средних частотах.
- 4.7. Провести моделирование и оценить работоспособность выходного каскада УНЧ в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____

«___» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____

«___» _____ 20__ г.

Вариант 13

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Усилительный каскад с ОЭ.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Транзистор BC546. Напряжение питания 24 В, выходное напряжение 2 В, сопротивление нагрузки 50 Ом, внутреннее сопротивление источника питания 1 кОм, частота 30 Гц, температура от -10 до 50 °С.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

- 4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.
- 4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы
- 4.3. Построить выходную характеристику.
- 4.4. Выбрать положение рабочей точки транзистора в режиме покоя.
- 4.5. Построить нагрузочные прямые постоянного и переменного тока.
- 4.6. Рассчитать элементы усилительного каскада с ОЭ.
- 4.7. Оценить нелинейные искажения.
- 4.8. Осуществить анализ каскада в области средних, нижних и верхних частот.
- 4.9. Произвести моделирование и оценить работоспособность усилительного каскада с ОЭ в САПР.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____
«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____
«__» _____ 20__ г.

Вариант 14

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: SPICE-модель биполярного транзистора 2N6488G.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Вольт-амперная и вольт-фарадная характеристика биполярного транзистора в диодном режиме. Импульс тока обратного восстановления¹.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

4.1. Экстракция SPICE-параметров из характеристик транзистора.

4.2. Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных измерений.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал:

_____ «__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению:

_____ «__» _____ 20__ г.

¹ Дополнительно для 14-го варианта в модуле курса «Курсовой проект (работа)» представлены результаты экспериментальных измерений для проведения сравнительного анализа.

Вариант 15

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Резонансный усилитель на полевом транзисторе.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Резонансная частота – 1,2 кГц. Напряжение питания – 23 В. Сопротивление нагрузки – 75 Ом. Амплитуда входного сигнала – 2 В.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.

4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.

4.3. Рассчитать схему избирательного усилителя и выбрать элементную базу.

4.4. Провести моделирование и оценить работоспособность избирательного усилителя в САПР.

4.5. Оценить нелинейные искажения резонансного усилителя.

4.6. Оценить влияние уровня входного сигнала на нелинейные искажения избирательного усилителя.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____

«__» _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____

«__» _____ 20__ г.

Вариант 16

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой РСС
_____/ А. В. Фатеев
« ____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Нелинейные радиотехнические цепи»
студенту группы _____.

1. Тема работы: Резонансный усилитель на ОУ.

2. Срок сдачи работы: «__» _____ 20__ г.

3. Исходные данные:

Резонансная частота – 2 кГц. Напряжение питания – 17 В. Сопротивление нагрузки – 75 Ом. Амплитуда входного сигнала – 2 В.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке:

4.1. Провести поиск информации по теме курсовой работы.

4.2. Обосновать выбор электрической принципиальной схемы.

4.3. Рассчитать схему избирательного усилителя и выбрать элементную базу.

4.4. Провести моделирование и оценить работоспособность избирательного усилителя в САПР.

4.5. Оценить нелинейные искажения резонансного усилителя.

4.6. Оценить влияние уровня входного сигнала на нелинейные искажения избирательного усилителя.

5. Требования к пояснительной записке

Пояснительная записка по работе оформляется в соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР 01-2021.

Задание выдал: _____

« ____ » _____ 20__ г.

Принял к выполнению: _____

« ____ » _____ 20__ г.