

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

**ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ  
ПОСОБИЕ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**“АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА”**

для специальности

2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств».

2020

**Автор:**

С. В. Жучкевич

Рецензенты: Н. М. Гарбузова, преподаватель филиала Белорусского национального технического университета «Минский государственный политехнический колледж»;

С. А. Павлюковец, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ЭАПУ и ТК факультета информационных технологий Белорусского национального технического университета

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Аналоговая электроника» учащимися специальности: 2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств».

В электронном учебно-методическом пособии представлен теоретический и практический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения текущей и итоговой аттестации.

Белорусский национальный технический университет.

Филиал БНТУ «Минский государственный политехнический колледж».

пр-т Независимости, 85, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42

E-mail: mgpk@bntu.by

<http://www.mgpk.bntu.by>

Регистрационный № БНТУ/МГПК-05.2020

©БНТУ, 2020

©Жучкевич С. В., 2020

## Содержание

[Пояснительная записка](#)

[Выписка из учебного плана](#)

[Междисциплинарные связи](#)

[Типовая учебная программа учебной дисциплины](#)

[Перечень существенных и несущественных ошибок](#)

[Критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся](#)

[Календарно-тематический план](#)

[Перечень разделов и тем](#)

[Теоретический материал](#)

[Практический материал](#)

[Самоконтроль знаний](#)

[Перечень вопросов к ОКР](#)

[Литература](#)

[Обратная связь](#)

## **Пояснительная записка**

Учебное пособие предназначено для формирования знаний, умений и навыков, необходимых учащимся электротехнических специальностей.

Изложены основные понятия элементной базы аналоговой электроники, принципы построения типовых схем и электронных устройств на базе дискретных элементов и интегральных микросхем. Приведены методики расчета электрических схем. Рассмотрены методы экспериментальных исследований аналоговых электронных устройств.

Содержание соответствует программе утвержденной Министерством образования РБ № 170.

Учебное пособие может быть полезно учащимся смежных специальностей, программа образования которых включает вопросы аналоговой электроники.

## Выписка из учебного плана

Из учебного плана специальности 2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств», утвержденного директором филиала 15.06.2016 г. на базе БШ; 15.06.2016 г. на базе СШ.

Учебная дисциплина «Аналоговая электроника» изучается на протяжении второго семестра.

Виды работ	Количество часов
	2 семестр обучения
Всего часов	88
Из них: лабораторных работ	24
практических работ	6
Количество: тематических контрольных работ	4
обязательных контрольных работ	2
Экзамен	-

В результате изучения дисциплины учащиеся в области электроники *должны знать на уровне представления:*

современные достижения и основные тенденции развития электроники;  
новые разработки структур электронных приборов и интегральных схем;

варианты использования современных материалов при создании элементной базы электронных устройств;

особенности использования электронных приборов;  
основные схемы аналоговой, импульсной и преобразовательной техники;

*знать на уровне понимания:*

физические явления и процессы в основе работы электронных приборов;

устройство, принцип действия, область применения, характеристики интегральных микросхем, полупроводниковых, фото-, оптоэлектронных и индикаторных приборов;

принципы конструирования и расчета полупроводниковых приборов;  
влияние режима работы и внешних воздействий на параметры и характеристики электронного прибора;

основы обеспечения качества и надежности при конструировании, производстве и эксплуатации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;

принципы построения типовых электронных схем, применяемых в телемеханике, автоматике и вычислительной технике;

принципы функционирования и практической реализации аналоговой, импульсной и преобразовательной техники;

методы расчета электронных устройств;

*уметь:*

читать принципиальные схемы электронных устройств;

осуществлять выбор элементов схем;

осуществлять расчет электронных приборов и базовых схем;

проектировать электронные устройства;

анализировать работу электронных приборов, аналоговой, импульсной и преобразовательной техники;

собирать схемы и выполнять эксперименты по исследованию электронных приборов, аналоговой, импульсной и преобразовательной техники;

измерять параметры и характеристики электронных устройств;

проводить анализ, оценивать точность результатов, обрабатывать и оформлять результаты измерений.

## Междисциплинарные связи



# **Типовая учебная программа учебной дисциплины**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УТВЕРЖДЕНО**  
Постановление  
Министерства образования  
Республики Беларусь  
28.12.2017 № 170

## **ТИПОВАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ «АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

профессионального компонента типового учебного плана  
по специальности 2-36 04 32 «Электроника механических  
транспортных средств» для реализации образовательной программы  
среднего специального образования, обеспечивающей получение  
квалификации специалиста со средним специальным образованием

Минск  
2017



*Рекомендовано к изданию экспертным советом  
Республиканского института профессионального образования*

**Автор:** *Е.П. Конопелько*, преподаватель филиала Белорусского национального технического университета «Минский государственный политехнический колледж».

**Рецензенты:** *В.Т. Крушев*, доцент кафедры информационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кандидат технических наук.

*Н.Г. Паршина*, преподаватель филиала «Минский государственный автомеханический колледж имени академика М.С. Высоцкого» учреждения образования «Республиканский институт профессионального образования».

Ответственный за выпуск *В.А. Журавлев*, методист учреждения образования «Республиканский институт профессионального образования».

Типовая учебная программа обсуждена и одобрена на заседании бюро учебно-методического объединения в сфере среднего специального образования на республиканском уровне по специальностям в области радиоэлектронной и вычислительной техники.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Типовая учебная программа по учебной дисциплине «Аналоговая электроника» (далее – программа) предусматривает изучение основной элементной базы аналоговой электроники, принципов построения типовых схем и электронных устройств на базе дискретных элементов и интегральных микросхем (ИМС), методов расчета электронных схем и экспериментальных исследований.

Изучение учебной дисциплины базируется на знаниях, полученных учащимися при изучении учебных дисциплин «Математика», «Физика», «Теоретические основы электротехники», «Электрические измерения», «Электронные приборы».

При изложении учебного материала следует соблюдать единство терминологии и обозначений. Содержание учебного материала необходимо систематически пополнять сведениями о новых разработках и направлениях в аналоговой электронике.

Для закрепления теоретических знаний и приобретения учащимися практических навыков программой учебной дисциплины предусматривается проведение лабораторных и практических работ.

В ходе преподавания учебной дисциплины необходимо знакомить учащихся с современным опытом внедрения прогрессивных технологий построения функциональных узлов и устройств аналоговой техники, проводить экскурсии на выставки.

При изложении программного учебного материала особое внимание следует обращать на требования безопасности при выполнении лабораторных работ, вопросы охраны окружающей среды, энерго- и ресурсосбережения.

В целях контроля усвоения программного учебного материала предусмотрено проведение двух обязательных контрольных работ, задания для которых разрабатываются преподавателем учебной дисциплины и обсуждаются на заседании предметной (цикловой) комиссии учреждения образования.

Программой определены цели изучения каждой темы, спрогнозированы результаты их достижения в соответствии с уровнями усвоения учебного материала.

В результате изучения учебной дисциплины учащиеся *должны*:

*знать на уровне представления:*

область применения аналоговых электронных устройств в механических транспортных средствах;

условно-графическое и буквенно-цифровое обозначение, принципы действия элементной базы аналоговых электронных устройств;

основную терминологию, расчетные соотношения, размерность электрических величин;

*знать на уровне понимания:*

назначение и функции элементов схем простейших, операционных и импульсных усилителей, усилителей мощности и постоянного тока, компараторов и генераторов гармонических колебаний;

схемы, устройство, принципы функционирования и практической реализации аналоговых электронных устройств различного назначения;

методы расчета аналоговых электронных устройств;

*уметь:*

осуществлять выбор элементов схем;

читать принципиальные схемы;

составлять и рассчитывать электрические схемы аналоговых электронных устройств;

собирать электрические цепи по приведенным схемам, проводить их испытания;

пользоваться измерительными приборами и устройствами;

обрабатывать и анализировать результаты измерений;

пользоваться справочной литературой.

Для обеспечения должного уровня подготовки специалистов в процессе изучения учебной дисциплины рекомендуется активно использовать компьютерную технику, наглядные пособия, плакаты, электронные лекции и презентации, видео- и кинофильмы.

Программа содержит примерный перечень оснащения лаборатории приборами, оборудованием, техническими и демонстрационными средствами обучения, необходимыми для обеспечения образовательного процесса.

Преподаватель должен прививать учащимся навыки самостоятельной работы с технической и справочной литературой, самостоятельного изучения несложных вопросов программы.

В программе приведены критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся по учебной дисциплине, разработанные на основе десятибалльной шкалы оценки результатов учебной деятельности обучающихся в учреждениях, обеспечивающих получение среднего специального образования.

Приведенный в программе тематический план является примерным. Предметная (цикловая) комиссия учреждения образования может вносить обоснованные изменения в содержание программного учебного материала и распределение учебных часов по разделам и темам в пределах общего бюджета времени, отведенного на изучение учебной дисциплины. Все изменения должны быть утверждены заместителем руководителя учреждения образования.

### ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Раздел, тема	Количество учебных часов		
	Всего	В том числе	
		на лабора- торные работы	на практи- ческие работы
<b>Введение</b>	<b>2</b>		
<b>Раздел 1. Электронные усилители</b>	<b>32</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
1.1. Общие сведения об электронных усилителях	4		
1.2. Обратная связь в электронных усилителях	4		
1.3. Режимы работы транзистора	2		
1.4. Режимы работы усилительного каскада	4		
1.5. Однокаскадные усилители	18	4	4
<b>Раздел 2. Многокаскадные усилители</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	
2.1. Общие сведения. Межкаскадные связи	2		
2.2. Двухкаскадный усилитель с RC-связью	3	2	
<i>Обязательная контрольная работа № 1</i>	1		
<b>Раздел 3. Усилители мощности</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	
3.1. Назначение выходных каскадов и требования к ним	2		
3.2. Однотактные усилители мощности	2		
3.3. Двухтактные усилители мощности	4	2	
<b>Раздел 4. Усилители постоянного тока</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	
4.1. Общие сведения об усилителях постоянного тока. Простейшие усилители постоянного тока. Дрейф нуля	2		
4.2. Дифференциальные усилители	4	2	
<b>Раздел 5. Операционные усилители</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>2</b>
5.1. Общие сведения об операционных усилителях	2		
5.2. Реализация операционных усилителей на базе микросхем	2		
5.3. Построение базовых схем на основе операционных усилителей	8	4	2
5.4. Компаратор на операционных усилителях	4	2	
<b>Раздел 6. Импульсные усилители</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	
6.1. Общие сведения об импульсных усилителях	4	2	
6.2. Коррекция амплитудно-частотной характеристики импульсных усилителей	1		
<i>Обязательная контрольная работа № 2</i>	1		
<b>Раздел 7. Генераторы гармонических колебаний</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	
7.1. Общие сведения о генераторах	1		
7.2. LC-генераторы	4	2	
7.3. RC-генераторы	5	4	
7.4. Стабилизация частоты автогенераторов гармонических колебаний	2		
<b>Итого</b>	<b>88</b>	<b>24</b>	<b>6</b>

**СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
	<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	
<p>Познакомить с целями, задачами и предметом учебной дисциплины «Аналоговая электроника».</p> <p>Сформировать знания об аналоговых сигналах и основных аналоговых функциях.</p>	<p>Цели, задачи и предмет учебной дисциплины «Аналоговая электроника», межпредметные связи.</p> <p>Аналоговые сигналы и основные аналоговые функции.</p>	<p>Высказывает общее суждение о целях, задачах и предмете учебной дисциплины «Аналоговая электроника».</p> <p>Описывает аналоговые сигналы и основные аналоговые функции.</p>
	<b>РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ</b>	
	<b>Тема 1.1. Общие сведения об электронных усилителях</b>	
<p>Сформировать знания о классификации аналоговых устройств, стандартизации и унификации электронных усилителей, о структурной схеме, параметрах и характеристиках электронных усилителей.</p>	<p>Классификация аналоговых электронных устройств. Общие сведения об усилителях электрических сигналов. Стандартизация и унификация электронных усилителей. Структурная схема электронного усилителя. Основные параметры и характеристики электронных усилителей. Причины искажений, нестабильности показателей и собственных помех.</p>	<p>Излагает классификацию основных аналоговых устройств, общие сведения об усилителях электрических сигналов. Объясняет структурную схему электронного усилителя, принцип унификации электронных усилителей. Раскрывает физический смысл основных параметров и характеристик электронных усилителей, причины возникновения искажений, нестабильности показателей усилителя и собственных помех.</p>
	<b>Тема 1.2. Обратная связь в электронных усилителях</b>	
<p>Сформировать понятие об обратной связи, ее видах, влиянии на</p>	<p>Обратная связь и ее виды. Влияние обратной связи на коэффициент усиления, входные и выход-</p>	<p>Раскрывает сущность обратной связи, описывает ее виды, объяс-</p>

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
<p>параметры и характеристики электронных усилителей.</p>	<p>ные сопротивления электронного усилителя с обратной связью. Влияние отрицательной обратной связи на нелинейные искажения, внутренние помехи и амплитудно-частотную характеристику.</p>	<p>няет влияние обратной связи на параметры и характеристики электронных усилителей.</p>
	<b>Тема 1.3. Режимы работы транзистора</b>	
<p>Сформировать знания о построении нагрузочной прямой, режиме работы транзистора по постоянному току, об усилительном и ключевом режимах работы транзистора.</p>	<p>Режим работы транзистора по постоянному току. Построение нагрузочной прямой и выбор рабочей точки. Усилительный и ключевой режимы работы транзистора.</p>	<p>Объясняет построение нагрузочной прямой, принцип задания режима работы по постоянному току, описывает ключевой и усилительный режимы работы транзистора.</p>
	<b>Тема 1.4. Режимы работы усилительного каскада</b>	
<p>Сформировать знания о режимах работы усилительных каскадов в классах А, В, АВ, С, об их особенностях.</p> <p>Сформировать понятие о методах обеспечения режимов работы усилителя по постоянному току, о назначении методики расчета элементов схемы, построении нагрузочной прямой, об определении режима работы электронного усилителя.</p>	<p>Выбор статического режима в зависимости от значения входного сигнала. Характеристика работы усилительного каскада в различных классах усиления и их особенности (класс А, В, АВ, С).</p> <p>Методы обеспечения режима работы электронного усилителя по постоянному току. Принцип действия, назначение элементов схемы с фиксированным током базы и напряжением эмиттер-база. Построение нагрузочной прямой, методика расчета элементов схемы, определение режима работы.</p>	<p>Объясняет выбор статического режима усилительного каскада в зависимости от значения входного сигнала, работу усилительного каскада в классах А, В, АВ, С, излагает их особенности.</p> <p>Описывает методы обеспечения режима работы электронного усилителя по постоянному току, методику расчета элементов схемы, объясняет построение нагрузочной прямой, определяет режим работы электронного усилителя.</p>
	<b>Тема 1.5. Однокаскадные усилители</b>	
<p>Сформировать знания об осо-</p>	<p>Особенности каскадов предварительного уси-</p>	<p>Объясняет особенности каска-</p>

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
<p>бенностях каскадов предварительного усиления напряжения, о принципе работы, назначении элементов простейшего однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе.</p> <p>Сформировать понятие о резисторных каскадах с общим эмиттером, общей базой, общим коллектором (эмиттерный повторитель), о методах температурной стабилизации усилительного каскада, о принципе работы усилителя на полевом транзисторе, его свойствах, методике расчета.</p>	<p>ления напряжения. Схема, принцип работы и назначение элементов простейшего однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе.</p> <p>Основные параметры однокаскадных усилителей. Расчет коэффициента усиления электронного усилителя на различных частотах.</p> <p>Резисторные каскады с общим эмиттером и с общей базой. Резисторные каскады с общим коллектором (эмиттерный повторитель).</p> <p>Температурная стабилизация усилительного каскада. Усилительные каскады на полевых транзисторах. Методика расчета.</p>	<p>дов предварительного усиления напряжения, принцип работы, назначение элементов простейшего однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе.</p> <p>Описывает резисторные каскады с общим эмиттером, общей базой, общим коллектором (эмиттерный повторитель), методы температурной стабилизации усилительного каскада, принцип работы усилителя на полевом транзисторе, его свойства, методику расчета.</p>
<p>Сформировать умение исследовать характеристики и параметры усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схеме с общим эмиттером, анализировать усилительные свойства каскада.</p>	<p><i>Лабораторная работа № 1</i></p> <p>Исследование усилительного каскада с общим эмиттером.</p>	<p>Исследует характеристики и параметры усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схеме с общим эмиттером, анализирует усилительные свойства каскада.</p>
<p>Сформировать умение исследовать характеристики и параметры усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схеме с общим коллектором, анализировать усилительные свойства каскада.</p>	<p><i>Лабораторная работа № 2</i></p> <p>Исследование усилительного каскада с общим коллектором.</p>	<p>Исследует характеристики и параметры усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схеме с общим коллектором, анализирует усилительные свойства каскада.</p>
<p>Сформировать умение проводить расчет электронного уси-</p>	<p><i>Практическая работа № 1</i></p> <p>Расчет электронного усилителя по постоянному току.</p>	<p>Проводит расчет электронного усилителя в соответствии с за-</p>

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
<p>теля в соответствии с заданными режимами (по постоянному току) и требуемыми параметрами.</p>	<p><i>Практическая работа № 2</i></p> <p>Расчет коэффициента усиления усилителя на средних частотах (СЧ).</p>	<p>данными режимами (по постоянному току) и требуемыми параметрами.</p>
<p>Сформировать умение проводить расчет коэффициента усиления усилителя на СЧ в соответствии с заданными режимами и требуемыми параметрами.</p>	<p>РАЗДЕЛ 2. МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ</p> <p>Тема 2.1. Общие сведения. Межкаскадные связи</p>	<p>Проводит расчет коэффициента усиления усилителя на СЧ в соответствии с заданными режимами и требуемыми параметрами.</p>
<p>Сформировать понятие о структуре многокаскадных усилителей, их достоинствах и недостатках, о видах межкаскадных связей.</p> <p>Сформировать знания о принципе работы многокаскадных усилителей, об их особенностях и параметрах.</p>	<p>Структура многокаскадных усилителей. Их достоинства и недостатки. Разновидности межкаскадных связей.</p> <p>Принцип работы многокаскадных усилителей.</p>	<p>Описывает структуру многокаскадных усилителей, их достоинства и недостатки, виды межкаскадных связей.</p> <p>Излагает принцип работы многокаскадных усилителей, их особенности и параметры.</p>
<p>Сформировать знания о принципе работы, назначении элементов, особенностях и параметрах двухкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с RC-связью.</p>	<p>Тема 2.2. Двухкаскадный усилитель с RC-связью</p> <p>Двухкаскадный усилитель на биполярных транзисторах с RC-связью, назначение элементов схемы, принцип работы и параметры.</p>	<p>Объясняет принцип работы, назначение элементов, особенно-сти, параметры двухкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с RC-связью.</p>
<p>Сформировать умение исследовать параметры и характеристики двухкаскадного усилителя с RC-связью.</p>	<p><i>Лабораторная работа № 3</i></p> <p>Исследование двухкаскадного усилителя с RC-связью.</p>	<p>Исследует параметры и характеристики двухкаскадного усилителя с RC-связью.</p>

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
<i>Обязательная контрольная работа № 1</i>		
<b>РАЗДЕЛ 3. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ</b>		
<b>Тема 3.1. Назначение выходных каскадов и требования к ним</b>		
Сформировать знания о назначении выходных каскадов и требованиях, предъявляемых к ним.	Выходные каскады, назначение и требования, предъявляемые к ним.	Излагает назначение выходных каскадов и требования, предъявляемые к ним.
<b>Тема 3.2. Однотактные усилители мощности</b>		
Сформировать знания о принципе работы, назначении элементов и особенностях схемных решений однотактных усилителей мощности.	Принцип работы однотактных усилителей мощности, назначение элементов, особенности схемных решений.	Объясняет принцип работы, назначение элементов и особенности схемных решений однотактных усилителей мощности.
<b>Тема 3.3. Двухтактные усилители мощности</b>		
Сформировать знания о принципе работы, назначении элементов и особенностях схемных решений двухтактных усилителей мощности.	Принцип работы двухтактных усилителей мощности, назначение элементов, особенности.	Объясняет принцип работы, назначение элементов и особенности схемных решений двухтактных усилителей мощности.
<i>Лабораторная работа № 4</i>		
Сформировать умение исследовать основные параметры и характеристики двухтактного усилителя мощности.	Исследование двухтактного усилителя мощности.	Исследует основные параметры и характеристики двухтактного усилителя мощности.
<b>РАЗДЕЛ 4. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b>		
<b>Тема 4.1. Общие сведения об усилителях постоянного тока. Простейшие усилители постоянного тока. Дрейф нуля</b>		
Сформировать знания о простейших усилителях постоянного тока, о причинах возникновения и способах устранения дрейфа нуля.	Назначение, особенности усилителей постоянного тока. Схема простейшего усилителя постоянного тока. Причины возникновения и способы устранения дрейфа нуля.	Излагает особенности простейших усилителей постоянного тока, причины возникновения и способы устранения дрейфа нуля.

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
<b>Тема 4.2. Дифференциальные усилители</b>		
Сформировать понятие о принципе работы и особенностях дифференциального усилителя.	Дифференциальные (балансные) усилители: принцип работы, достоинства.	Излагает принцип работы и особенности дифференциального усилителя.
<i>Лабораторная работа № 5</i>		
Сформировать умение исследовать основные параметры и характеристики дифференциального усилителя.	Исследование дифференциального усилителя.	Исследует основные параметры и характеристики дифференциального усилителя.
<b>РАЗДЕЛ 5. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ</b>		
<b>Тема 5.1. Общие сведения об операционных усилителях</b>		
Сформировать знания о назначении, УГО, структуре, характеристиках, параметрах и особенностях использования ОУ.	Общие сведения об операционных усилителях (ОУ): назначение, условное графическое обозначение (УГО), структура, принцип работы, параметры и характеристики.	Излагает назначение, структуру, характеристики, параметры и особенности использования ОУ, описывает их УГО.
<b>Тема 5.2. Реализация операционных усилителей на базе микросхем</b>		
Дать понятие о реализации ОУ на базе микросхем, о назначении элементов схемы, принципе работы.	Реализация ОУ на базе микросхем: назначение элементов схемы, принцип работы.	Объясняет реализацию ОУ на базе микросхем, назначение элементов схемы, принцип работы.
<b>Тема 5.3. Построение базовых схем на основе операционных усилителей</b>		
Сформировать знания о базовых схемах устройств на основе ОУ, особенностях подключения ОУ для реализации данных схем, принципе работы, методике расчета базовых схем на основе ОУ.	Инвертирующие и неинвертирующие усилители на базе ОУ: схемы, принцип работы, основные расчетные соотношения. Типовое применение ОУ: повторитель, интегратор, дифференциатор, суммирующее и вычитающее устройство.	Описывает базовые схемы устройств на основе ОУ, особенности подключения ОУ для реализации данных схем, принцип работы; излагает методику расчета базовых схем на основе ОУ.

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
Сформировать умение исследовать схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ, их основные параметры и характеристики.	<i>Лабораторная работа № 6</i> Исследование схем инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ.	Исследует схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ, их основные параметры и характеристики.
Сформировать умение исследовать схемы интегратора, дифференциатора, суммирующего устройства на базе ОУ, их основные параметры и характеристики.	<i>Лабораторная работа № 7</i> Исследование схем интегратора, дифференциатора, суммирующего устройства на базе ОУ.	Исследует схемы интегратора, дифференциатора, суммирующего устройства на базе ОУ, их основные параметры и характеристики.
Сформировать умение проводить расчет схем на базе ОУ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к их параметрам и характеристикам.	<i>Практическая работа № 3</i> Расчет схем на базе ОУ.	Проводит расчет схем на базе ОУ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к их параметрам и характеристикам.
<b>Тема 5.4. Компаратор напряжения на операционных усилителях</b>		
Сформировать представление о компараторах напряжения, их разновидностях, области применения. Сформировать знания о принципе работы компаратора напряжения на ОУ с гистерезисом и без гистерезиса.	Компаратор напряжения: область применения, разновидности. Схемы, принцип работы компаратора напряжения на ОУ с гистерезисом и без гистерезиса.	Различает разновидности компараторов напряжения, называет область их применения. Объясняет принцип работы компаратора напряжения на ОУ с гистерезисом и без гистерезиса.
Сформировать умение исследовать схемы аналоговых компара-	<i>Лабораторная работа № 8</i> Исследование компаратора напряжения на ОУ.	Исследует схемы аналоговых компараторов напряжения на опе-

Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
торов на операционных усилителях, их основные параметры и характеристики.		рационных усилителях, их основные параметры и характеристики.
<b>РАЗДЕЛ 6. ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ</b>		
<b>Тема 6.1. Общие сведения об импульсных усилителях</b>		
Сформировать понятие об особенностях работы импульсных усилителей.	Схема, особенности работы импульсного усилителя. Физические процессы в импульсном усилителе.	Объясняет особенности работы и физические процессы в импульсном усилителе.
Сформировать умение исследовать работу импульсных усилителей, их основные параметры и характеристики.	<i>Лабораторная работа № 9</i> Исследование импульсных усилителей.	Исследует работу импульсных усилителей, их основные параметры и характеристики.
<b>Тема 6.2. Коррекция амплитудно-частотной характеристики импульсных усилителей</b>		
Сформировать понятие о способах коррекции амплитудно-частотной характеристики импульсных усилителей.	Способы коррекции амплитудно-частотной характеристики импульсных усилителей.	Объясняет способы коррекции амплитудно-частотной характеристики импульсных усилителей.
<i>Обязательная контрольная работа № 2</i>		
<b>РАЗДЕЛ 7. ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ</b>		
<b>Тема 7.1. Общие сведения о генераторах</b>		
Дать понятие об электронном генераторе. Сформировать знания о классификации генераторов, области их применения. Сформировать понятие о режимах и условиях возбуждения генераторов.	Понятие об электронном генераторе как преобразователе электрической энергии источника питания в электрические колебания необходимой формы, частоты и мощности. Классификация генераторов и область применения. Режимы и условия возбуждения генераторов.	Раскрывает сущность понятия «электронный генератор». Излагает классификацию генераторов, область их применения. Объясняет режимы и условия возбуждения генераторов.



Цель изучения темы	Содержание темы	Результат
Сформировать понятие о назначении, схемах, принципе работы и особенностях LC-генераторов гармонических колебаний.	<p align="center"><b>Тема 7.2. LC-генераторы</b></p> LC-генераторы гармонических колебаний: назначение, схемы, принцип работы и особенности.	Объясняет назначение, схемы, принцип работы и особенности LC-генераторов гармонических колебаний.
Сформировать умение исследовать работу LC-генератора, его основные параметры и характеристики.	<p align="center"><i>Лабораторная работа № 10</i></p> Исследование LC-генератора.	Исследует работу LC-генератора, его основные параметры и характеристики.
Сформировать понятие о назначении, схемах, принципе работы и особенностях RC-генераторов гармонических колебаний.	<p align="center"><b>Тема 7.3. RC-генераторы</b></p> Назначение, схемы, принцип работы и особенности гармонических колебаний RC-генераторов. Схемы включения RC-генератора на полярных транзисторах и на ОУ. Принцип работ и параметры RC-генераторов.	Объясняет назначение, схемы, принцип работы и особенности RC-автогенераторов гармонических колебаний.
Сформировать умение исследовать работу RC-генератора на биполярных транзисторах, его основные параметры и характеристики.	<p align="center"><i>Лабораторная работа № 11</i></p> Исследование RC-генератора на биполярных транзисторах.	Исследует работу RC-генератора на биполярных транзисторах, его основные параметры и характеристики.
Сформировать умение исследовать работу RC-генератора на ОУ, его основные параметры, условия самовозбуждения и схемную реализацию.	<p align="center"><i>Лабораторная работа № 12</i></p> Исследование RC-генератора на ОУ.	Исследует работу RC-генератора на ОУ, его основные параметры, условия самовозбуждения и схемную реализацию.
Ознакомить с основными способами стабилизации частоты генераторов гармонических колебаний	<p align="center"><b>Тема 7.4. Стабилизация частоты генераторов гармонических колебаний</b></p> Основные способы стабилизации частоты генераторов гармонических колебаний	Высказывает общее суждение об основных способах стабилизации частоты генераторов гармонических колебаний

## ЛИТЕРАТУРА

### ОСНОВНАЯ

- Бэйкер, Б. Что нужно знать цифровому разработчику об аналоговой электронике / Б. Бэйкер. М., 2010.
- Галкин, В.И. Промышленная электроника и микроэлектроника : учеб. / В.И. Галкин, Е.В. Пелевин. Минск, 2006.
- Гололобов, В.Н. Экскурсия по электронике / В.Н. Гололобов. М., 2008.
- Дунаев, С.Д. Электроника, микроэлектроника и автоматика : учеб. / С.Д. Дунаев. М., 2003.
- Дьюб, С.Д. Электроника: схемы и анализ / С.Д. Дьюб. М., 2008.
- Кашкаров, А.П. Новейшие технологии в электронике / А.П. Кашкаров. М., 2013.
- Лаврентьев, Б.Ф. Схемотехника электронных средств : учеб. пособие / Б.Ф. Лаврентьев. М., 2010.
- Марченко, А.Л. Основы электроники : учеб. пособие / А.Л. Марченко. М., 2013.
- Москатов, Е.А. Основы электронной техники : учеб. пособие / Е.А. Москатов. Ростов н/Д, 2010.
- Наундорф, У. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование / У. Наундорф. М., 2008.
- Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учеб. / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. М., 2005.
- Рег, Дж.А. Промышленная электроника / А.Дж. Рег, Г.Дж. Сартори. М., 2011.
- Ярочкина, Г.В. Задачник по радиоэлектронике : практикум / Г.В. Ярочкина. М., 2008.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

- Акимова, Г.Н. Электронная техника : учеб. / Г.Н. Акимова. М., 2003.
- Бабичев, А.П. Физические величины : справ. / под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., 1991.
- Ежков, Ю.С. Справочник по схемотехнике усилителей / Ю.С. Ежков. 2-е изд. М., 2002.
- Ревич, Ю.В. Занимательная электроника / Ю.В. Ревич. СПб., 2005.
- Ткаченко, Ф.А. Техническая электроника / Ф.А. Ткаченко. Минск, 2002.
- Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. М., 2009.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НОРМАТИВНЫЕ ПРАВОВЫЕ АКТЫ

- ГОСТ 2.104-2006. Единая система конструкторской документации. Основные надписи.
- ГОСТ 2.105-95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.
- ГОСТ 2.301-68. Единая система конструкторской документации. Форматы.

ГОСТ 2.302-68. Единая система конструкторской документации. Масштабы.

ГОСТ 2.730-73. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые.

ГОСТ 2.743-91. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники.

ГОСТ 17021-88. Микросхемы интегральные. Термины и определения.

ГОСТ 18421-93. Аналоговая и аналого-цифровая вычислительная техника. Термины и определения.

ГОСТ 20003-74. Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

ГОСТ 20332-84. Тиристоры. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

ГОСТ 23217-78. Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения.

ГОСТ 23706-93. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 6. Особые требования к омметрам (приборам для измерения полного сопротивления) и приборам для измерения активной проводимости.

ГОСТ 24855-81. Преобразователи измерительные тока, напряжения, мощности, частоты, сопротивления аналоговые. Общие технические условия.

ГОСТ 8476-93. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 3. Особые требования к ваттметрам и варметрам.

ГОСТ 8711-93. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 2. Особые требования к амперметрам и вольтметрам.

## ПЕРЕЧЕНЬ

существенных и несущественных ошибок  
по учебной дисциплине «Аналоговая электроника» для специальности  
2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств»

### *Существенные ошибки:*

#### **В изложении теоретического материала:**

- затруднения в изложении целей и задач аналоговой электроники в целом;
- затруднения в стандартном изложении основных терминов и определений в области электроники;
- ошибки в изложении определений и классификации электронных приборов, аналоговых электронных устройств;
- затруднения в объяснении методов и средств измерений напряжения, сопротивления и силы тока;
- затруднения в объяснении принципов работы схем аналоговой электроники;
- ошибки в анализе классификации и маркировки ИМС;
- затруднения в объяснении принципов работы электронных приборов;
- непонимание, незнание основных терминов, определений, понятий аналоговой электроники;
- незнание принципов работы полупроводниковых элементов (диодов, транзисторов, тиристоров, фотоприборов);
- незнание, непонимание характеристик полупроводниковых элементов и схем;
- незнание параметров элементов схем;
- незнание электрических принципиальных схем;
- неправильное подключение различных элементов в схемах;
- отсутствие узлов в схеме;
- ошибки при пояснении сути измерения параметров элементов и компонентов электрических цепей;
- отсутствие в ответе логичности при изложении принципа работы схем;
- ошибки, свидетельствующие о том, что учащийся не усвоил правила решения задач.

#### **При выполнении лабораторных работ:**

- несоблюдение нормативно-методических документов при выполнении лабораторных работ;

- нарушение последовательности действий при выполнении лабораторных работ;
- ошибки при отражении в отчете принципиальных схем;
- неумение проводить измерения электрических величин;
- ошибки в расчетах основных характеристик измерений;
- ошибки в преобразовании формул;
- затруднения в оценке полученных результатов;
- затруднения в воспроизведении формул, в оперировании ими и применении к решению задач.

**При выполнении практических работ:**

- нарушение последовательности действий при выполнении практических работ;
- ошибки при отражении в отчете принципиальных схем;
- ошибки в расчетах, характеристиках;
- ошибки в преобразовании формул;
- затруднения в оценке полученных результатов;
- неумение рассчитывать основные параметры схем (усилителей, генераторов);
- затруднения в воспроизведении формул, в оперировании ими и применении к решению задач.

***Несущественные ошибки:***

**В изложении теоретического материала:**

- неполное изложение целей и задач аналоговой электроники;
- неполное изложение терминов и определений в области аналоговой электроники;
- неполное перечисление основных характеристик схем;
- наличие неточностей при изложении принципов работы принципиальных схем аналоговой электроники
- неполное указание параметров элементов;
- наличие недочетов при начертании принципиальных схем;
- наличие недочетов, опечаток при решении задач.
- нерациональный план устного или письменного ответа;
- неполное, неточное изложение принципа работы полупроводниковых приборов;
- неполное, неточное изложение определений;
- неполное, неточное изложение принципа работы схем (усилителей, генераторов);
- искажение формы вольт-амперных характеристик полупроводниковых элементов;

- неполное изложение основных параметров полупроводниковых элементов;
- искажение размеров, формы элементов в условных графических обозначениях;
- отсутствие узлов в некоторых частях принципиальных схем электронных устройств;
- определение некоторых параметров элементов без учета размерности величин, входящих в формулу.

**При выполнении лабораторных работ:**

- наличие опечаток (менее 5);
- неточности в оформлении работ;
- применение нерационального способа решения поставленных задач;
- искажение формы вольт-амперных характеристик полупроводниковых элементов;
- неполное изложение в отчете назначения и основных характеристик, временных диаграмм;
- неумение преобразовывать единицы измерения электрических величин;
- ошибки вычислительного характера, не приводящие к абсурдным результатам;
- небрежное выполнение записей названий и целей работы, таблиц с полученными результатами измерений, выводов, формул и расчетов;
- искажение размеров, формы элементов в условных графических обозначениях;
- отсутствие узлов в некоторых частях принципиальных схем электронных устройств;
- определение некоторых параметров элементов без учета размерности величин, входящих в формулу;
- небрежное выполнение схем и рисунков в отчете.

**При выполнении практических работ:**

- наличие опечаток (менее 5);
- неточности в оформлении работ;
- применение нерационального способа решения поставленных задач;
- искажение формы вольт-амперных характеристик полупроводниковых элементов;
- неполное изложение в отчете назначения и основных характеристик схем;
- неумение преобразовывать единицы измерения электрических величин;

- ошибки вычислительного характера, не приводящие к абсурдным результатам;
- небрежное выполнение записей названий и целей работы, таблиц с полученными результатами измерений, выводов, формул и расчетов;
- искажение размеров, формы элементов в условных графических обозначениях;
- отсутствие узлов в некоторых частях принципиальных схем электронных устройств;
- определение некоторых параметров элементов без учета размерности величин, входящих в формулу;
- небрежное выполнение схем и рисунков в отчете.

***Недочеты*** - это оговорки, описки, если они не искажают смысл излагаемого материала, орфографические ошибки.

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УЧАЩИХСЯ**

Отметка в баллах	Показатели оценки
<b>1</b>	<b>2</b>
1 (один)	<p>Узнавание отдельных объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (фактов, терминов в области электроники, аналоговой техники: полупроводниковый резистор, диод, биполярный и полевой транзистор, тиристоры, аналоговые и цифровые микросхемы, усилители, генераторы, электронно-лучевые трубки и т. д., условных графических и буквенно-цифровых обозначений основных элементов промышленной электроники, размерности электрических величин); наличие многочисленных существенных ошибок, исправляемых с непосредственной помощью преподавателя.</p>
2 (два)	<p>Различение объектов изучения программного учебного материала, предъявленных в готовом виде (фактов, терминов в области электроники механических транспортных средств, аналоговой электроники: полупроводниковый резистор, диод, биполярный и полевой транзистор, тиристоры, аналоговые и цифровые микросхемы, усилители, генераторы, электронно-лучевые трубки и т. д., условных графических и буквенно-цифровых обозначений основных элементов промышленной электроники, размерности электрических величин, характеристик, схем и т. д.); осуществление соответствующих практических действий (сборка электрических цепей и выполнение экспериментов по исследованию полупроводниковых приборов); наличие многочисленных существенных ошибок, исправляемых с непосредственной помощью преподавателя.</p>
3 (три)	<p>Воспроизведение части программного материала по памяти (фрагментарный пересказ и перечисление фактов, терминов в области электроники механических транспортных средств: полупроводниковый резистор, диод, биполярный и полевой транзистор, тиристоры, аналоговые схемы и микросхемы,</p>



1	2
	усилители и т. д., условных графических и буквенно-цифровых обозначений основных элементов электроники, размерностей электрических величин, характеристик, устройств электроники механических транспортных средств); осуществление умственных и практических действий по образцу (описание работы типовых полупроводниковых приборов и схем аналоговой электроники и проведение экспериментов по их исследованию); наличие отдельных существенных ошибок.
4 (четыре)	Воспроизведение большей части программного учебного материала (описание с элементами объяснения фактов, терминов в области электроники механических транспортных средств физических процессов, принципа действия основных элементов и схем электроники, области применения электронных устройств); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (выбор полупроводниковых приборов, проверка их работоспособности, сборка электрических цепей, измерение параметров и характеристик полупроводниковых приборов и электронных устройств, анализ полученных результатов); наличие единичных существенных ошибок.
5 (пять)	Осознанное воспроизведение большей части программного учебного материала (описание элементов и схем аналоговой электроники механических транспортных средств с объяснением, физических явлений, лежащих в основе их функционирования, принципа действия основных элементов электроники механических транспортных средств); применение знаний в знакомой ситуации по образцу (выбор полупроводниковых приборов, проверка их работоспособности, сборка электрических цепей, измерение параметров и характеристик полупроводниковых приборов и электронных устройств, анализ полученных результатов); наличие несущественных ошибок.
6 (шесть)	Полное знание и осознанное воспроизведение всего программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (описание и объяснение физических явлений, лежащих в основе

1	2
	<p>функционирования элементов электроники, принципа их действия, выявление и обоснование зависимости параметров и характеристик элементов электроники от режимов их работы, и т. д., выполнение заданий по образцу, на основе предписаний проверка полупроводниковых приборов на работоспособность, сборка цепей их включения, измерение и определение параметров, построение характеристик полупроводниковых приборов, электронных устройств); наличие несущественных ошибок.</p>
<p>7 (семь)</p>	<p>Полное прочное знание и воспроизведение программного учебного материала; владение программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение физических явлений, лежащих в основе функционирования схем электроники механических транспортных средств, принципа их действия, с использованием характеристик приборов, временных диаграмм, обоснование и доказательство зависимости параметров и характеристик схем от режимов их работы, формулирование выводов и т.д., недостаточно самостоятельное выполнение заданий по проверке полупроводниковых приборов на работоспособность, сборке цепей их включения, измерению и определению параметров, построению характеристик полупроводниковых приборов, электронных устройств); наличие единичных несущественных ошибок.</p>
<p>8 (восемь)</p>	<p>Полное, прочное, глубокое знание и воспроизведение программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в знакомой ситуации (развернутое описание и объяснение физических явлений, лежащих в основе функционирования аналоговых электронных схем механических транспортных средств, принципа их действия, с использованием характеристик приборов, временных диаграмм, обоснование и доказательство зависимости параметров и характеристик аналоговых электронных схем механических транспортных средств от режимов их работы, формулирование выводов,</p>

1	2
	самостоятельное выполнение заданий по проверке полупроводниковых приборов на работоспособность, сборке цепей их включения, измерению и определению параметров, построению характеристик полупроводниковых приборов, составлению и расчету электрических схем аналоговых электронных устройств); наличие единичных несущественных ошибок.
9 (девять)	Полное, прочное, глубокое, системное знание программного учебного материала; оперирование программным учебным материалом в частично измененной ситуации (применение учебного материала для составления и расчета электрических аналоговых схем электронных устройств). Выдвижение предположений и гипотез по моделированию возможных вариантов изменения режимов работы электронных схем механических транспортных средств и т. д., наличие действий и операций творческого характера для выполнения заданий по испытанию различных электронных устройств механических транспортных средств, выбору элементной базы электронных устройств при проектировании автоматизированных систем и при проведении ремонтных работ, расчету параметров элементов электронных схем и т. д.
10 (десять)	Свободное оперирование программным учебным материалом; применение знаний и умений в незнакомой ситуации (самостоятельные действия по описанию, объяснению работы аналоговых электронных устройств в механических транспортных средствах, методов расчета сложных аналоговых электрических схем, выбора элементной базы электронных устройств при проектировании автоматизированных систем и при проведении ремонтных работ, методов испытания различных электронных схем механических транспортных средств, выполнение творческих работ и заданий по расчету параметров элементов электронных схем и т. д.)

# Календарно-тематический план

МІНІСТЭРСТВА АДУКАЦЫІ РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ

ЗАТВЕРДЖАЮ  
Нам. кіраўніка  
па вучэбнай рабоце  
«...» ... 20... г.

## Календарна-тэматычны план

па вучэбнай дысцыпліне / практыцы «Аналоговая электроніка»

Курс 2

Выкладчык: Жучкевіч Светлана Викторовна

Колькасць вучэбных гадзін па вучэбнаму плану 88

№№ груп	Тэарэтычны		Лабараторныя, практычныя		Курсавыя праектаванні				Усяго
	08P26	09P2к	08P26	09P2к					
На дысцыпліну	58	58	30	30					88
У т. л. на семестры									
4	58	58	30	30					88
Фактычна выкарыстаны									

АКР № 1 вучэбнай № 19 ; АКР № 2 вучэбнай № 38; АКР № вучэбнай №

Складзены ў адпаведнасці з вучэбнай праграмай, зацверджанай Міністэрствам асветы РБ.

(п. 1 п. 1)

28. 12. 2017 №170

Разгледжаны на пасяджэнні прадметнай (матэрыяльнай) камісіі

Прапавод № ат 20 г.

Старшыня прадметнай (прадметнай) камісіі /И. И. Буткевич

(Д. І. І.)

Распрацоўшчык /С. В. Жучкевич

(П. І. П.)

№№ вучэбных заняткаў	Назва раздзелаў, назвы тэм па вучэбнай праграме, назвы тэм асобна па вучэбных занятках	Колькасць вучэбных гадзін
1	2	3
1	<b>Введение</b> Цели, задачи и предмет дисциплины. Аналоговые сигналы и основные функции	2
	<b>Раздел 1 Электронные усилители</b>	32
	<b>Тема 1.1 Общие сведения об электронных усилителях</b>	4
2	Классификация аналоговых электронных устройств. Общие сведения об электронных усилителях	2
3	Структурная схема усилителя. Основные параметры и характеристики усилителей.	2
	<b>Тема 1.2 Обратная связь в электронных усилителях</b>	4
4	Понятие обратной связи. Виды обратных связей в усилителях.	2
5	Влияние обратных связей на параметры и работу усилителя.	2
	<b>Тема 1.3 Режимы работы транзистора</b>	2
6	Построение нагрузочной прямой. Усилительный и ключевой режимы. ТК №1	2
	<b>Тема 1.4 Режимы работы усилительного каскада</b>	4
7	Характеристика работы усилительного каскада в различных классах усиления, их особенности.	2
8	Принцип действия, назначение элементов схем с фиксированным напряжением и током базы.	2
	<b>Тема 1.5 Однокаскадные усилители</b>	18
9	Схема, принцип работы, диаграммы простейшего усилителя на БТ. Особенности расчета.	2
10	<i>Лабораторная работа №1</i> Исследование усилительного каскада с общим эмиттером	2
11	Резисторные каскады с общим эмиттером и базой	2

Тип вучэбных заняткаў	Вучэбна-метадзічныя матэрыялы, сродкі вучэбнага працэсу	Задачы для выканання на домі	Забавы
4	3	6	7
Урок изуч. нов. мат.	Плакат «Аналоговые сигналы»	[4] с.5-12	
Урок изуч. нов. мат.	Плакат «Усилитель»	[1] с.97-102 [3] с.244-253	
Комбинир. урок	Плакат «Классификация усилителей»	[1] с.99-104 [4] с.91-94	
Комбинир. урок	Плакат «Виды обратных связей»	[1] с.104-106 [4] с.118-122	
Комбинир. урок	Плакат «Виды обратных связей»	[1] с.104-109 Повт. Т.1, 1, 1, 2	
Комбинир. урок	Плакат «Режимы работы транзистора», карточки с заданиями	[1] с.46-57 [4] с.28-38	
Комбинир. урок	Плакат «Режимы работы усилителя»	[1] с.115-133 [4] с.91-94	
Комбинир. урок	Плакаты «Усилитель с фиксированным током и напряжением базы»	[1] с.115-133 [4] с.91-94	
Комбинир. урок	Плакат «Усилитель на БТ»	[1] с.100-106	
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[1] с.122-125	
Комбинир. урок	Плакат «Усилители с ОЭ и ОБ»	[1] с.122-125	

№№ учебников, заданий	Назва раздела(в), главы тем на учебной программе, главы тем учебных учебников, заданий	Количество учебных занятий
1	2	3
12	<b>Практическая работа №1</b> Расчет электронного усилителя по постоянному току	2
13	Резисторные каскады с общим коллектором	2
14	<b>Лабораторная работа №2</b> Исследование усилительного каскада с общим коллектором	2
15	Температурная стабилизация усилительного каскада	2
16	Усилительные каскады на полевых транзисторах, ТК №2	2
17	<b>Практическая работа №2</b> Расчет коэффициента усиления усилителя на СЧ	2
	<b>Раздел 2 Многокаскадные усилители</b>	6
	<b>Тема 2.1 Общие сведения. Межкаскадные связи</b>	2
18	Структура многокаскадных усилителей. Достоинства и недостатки. Разновидности межкаскадных связей. Подготовка к ОКР №1	2
	<b>Тема 2.2 Двухкаскадный усилитель с RC-связью</b>	3
19	Двухкаскадный усилитель с RC-связью: назначение элементов, принцип работы, параметры. <b>Обязательная контрольная работа №1</b>	1
20	<b>Лабораторная работа №3</b> Исследование двухкаскадного усилителя с RC-связью	2
	<b>Раздел 3 Усилители мощности</b>	8
	<b>Тема 3.1 Назначение выходных каскадов и требования к ним</b>	2
21	Анализ ОКР №1. Назначение элементов выходных каскадов и требования, предъявляемые к ним.	2
	<b>Тема 3.2 Однотактные усилители мощности</b>	2
22	Однотактные усилители мощности.	2

Тип учебных занятий	Учебно-методические материалы, средства визуализации	Задание для выполнения на зан.	Задачи
4	5	6	7
Урок форм. нов. умений	Методические указания, карточки с заданиями	[1] с.115-133 [4] с.91-94	
Комбинир. урок	Плакат "Усилители с ОК ОБ"	[1] с.122-125	
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[1] с.122-125	
Комбинир. урок	Плакат "Усилители с термостабилизацией"	[1] с.122-125	
Комбинир. урок	Плакат "Усилители на ПТ" МУ для расчета усилителей	[1] с.120-122 [6] с.94-116	
Урок форм. нов. умений	Методические указания, карточки с заданиями	[1] с.115-133 [4] с.91-94	Повт. Т1.3- 1.5
Комбинир. урок	Плакат «Многокаскадные усилители»	[6] с.104-106	
Урок изу. нов. мат.	Плакат «Двухкаскадный усилитель с RC-связью»	[6] с.116-118	Повт. Т1.1- 2.2
Урок контр. и коррекции	Индивидуальные карточки с заданиями		
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[1] с.122-125	
Комбинир. урок	Плакат «Выходные каскады»	[1] с.174-176 [6] с.118-120	
Комбинир.	Плакат «Усилитель	[1] с.176-177	

№№ учебников, заданий	Назва раздела(в), главы тем на учебной программе, главы тем учебных учебников, заданий	Количество учебных занятий
1	2	3
	схема, принцип работы, элементы, особенности.	
	<b>Тема 3.3 Двухтактные усилители мощности</b>	4
23	Двухтактные усилители мощности: схема, принцип работы, элементы, особенности.	2
24	<b>Лабораторная работа №4</b> Исследование двухтактного усилителя мощности.	2
	<b>Раздел 4 Усилители постоянного тока</b>	6
	<b>Тема 4.1 Общие сведения об усилителях постоянного тока (УПТ). Простейшие УПТ. Дрейф нуля.</b>	2
25	Назначение, особенности УПТ. Схема простейшего УПТ. постоянный ток. Дрейф нуля. ТК №3.	2
	<b>Тема 4.2 Дифференциальные усилители</b>	4
26	Дифференциальные балансные усилители: анализ работы, достоинства, назначение элементов схем.	2
27	<b>Лабораторная работа №5</b> Исследование дифференциального усилителя.	2
	<b>Раздел 5 Операционные усилители (ОУ)</b>	16
	<b>Тема 5.1 Общие сведения об ОУ</b>	2
28	Назначение, УГО, классификация, принцип работы, структура, параметры, характеристики ОУ.	2
	<b>Тема 5.2 Реализация ОУ на базе микросхем</b>	2
29	Реализация ОУ на базе микросхем: принцип работы, назначение элементов схем.	2
	<b>Тема 5.3 Построение базовых схем на основе ОУ</b>	8
30	Принцип работы <u>неинвертирующих</u> и <u>инвертирующих</u> усилителей, сумматора, дифференциатора, интегратора.	2
31	<b>Лабораторная работа №6</b> Исследование <u>инвертирующего</u> и <u>неинвертирующего</u> усилителя на базе ОУ.	2
32	<b>Лабораторная работа №7</b> Исследование схем интегратора, дифференциатора, суммирующего устройства на базе ОУ.	2

Тип учебных занятий	Учебно-методические материалы, средства визуализации	Задание для выполнения на зан.	Задачи
4	5	6	7
урок	мощности однотактный»	[6] с.118-120	
Комбинир. урок	Плакат «Двухтактный усилитель мощности»	[6] с.118-120 [1] с.177-181	
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[1] с.176-177 [6] с.118-120	
Комбинир. урок	Плакат «УПТ», карточки с заданиями	[1] с.113-136	
Комбинир. урок	Плакат «Дифференциальный усилитель»	[1] с.162-165	
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[1] с.162-165	
Комбинир. урок	Плакат «ОУ»	[4] с.131-139 [1] с.165-168	
Комбинир. урок	Плакат «ОУ серии К140Д1»	[4] с.131-139 [1] с.168-173	
Комбинир. урок	Плакат «Схемы ОУ»	[4] с.131-139 [1] с.168-173	
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[4] с.131-139 [1] с.168-173	
Урок форм. нов. умений	Методические указания Лабораторный стенд	[4] с.131-139 [1] с.168-173	



№ вучэбнага занятка	Назва сэрвіснага тэк	Дз сэрвіснага		Назва сэрвіснага	
		тэарэтычны	лабараторны, практычны	тэарэтычны	лабараторны, практычны

**Літаратура (Інфармацыйна-аналітычны матэрыял)**  
Навуковы выдання

№№ п.п	Назва	Аўтар (скажана)	Выдавецтва год выдання
1	Промышленная электроніка і мікрэлектроніка	Галкін В. І., Пелевін Е. В.	Мінск: Беларусь, 2000
2	Асновы прамысловай электронікі	Крыштафовіч А.	М., Выш. Шк., 1985
3	Асновы электроннай тэхнікі	Москатов Е. А.	Ростов на Д., 2010
4	Асновы прамысловай электронікі	Под ред. Герасімова В. В.	М., Выш. Шк., 1990
5	Электроніка, мікрэлектроніка, аўтаматка	Дунаев С. Д.	М., Маршрут, 2003
6	Электронная тэхніка	Акімова Г. Н.	М., Маршрут, 2004
7	Занімабельная электроніка	Ревіч Ю. В.	СПб., БХВ-Петербург, 2005
8	Сайт фірмы «Каскад»		
9	http://www.cpp-kaskad.ru		
10	http://www.shema.ru		
11	http://www.cs.ua./rad/lib/titc/titsh.zip		

**ІНСТРУКЦЫЯ**  
**па складанні календарна-тэматычнага плана па вучэбнай дысцыпліне**

Календарна-тэматычны план выкладчыка з'яўляецца абавязковым дакументам, які спрымае навуковай арганізацыі навучальнага працэсу па дысцыпліне, забяспечвае металічна правільнае планаванне выканання вучэбнай праграмы ў строгай паслядоўнасці і ўвазках з сумеснымі дысцыплінамі.

Добра прадуманы і якасна складзены календарна-тэматычны план дапамагае загалю падрыхтаваць да заняткаў неабходныя наглядныя дапаможнікі, правільна спланаваны правядзенне лабараторных і практычных работ, эсэўнай і г.д.

Наўняць календарна-тэматычнага плана дае магчымасць ажыццявіць сістэматычны кантроль з боку вучэбнай часткі і шклявой (прадметнай) камісіі за ходам выканання праграмы і раўнамернай загрузкі навучэнцаў.

Пры складанні календарна-тэматычнага плана на тытульным лісце календарна-тэматычнага плана ставіцца колькасць гадзін, прадугледжаных вучэбным планам на паўнавучэбную дысцыпліну ў семестры, а ў табліцы даецца сапраўдная колькасць гадзін, што вынікае ў азначэнні з раскладам заняткаў, на які складзена календарна-тэматычны план.

Запоўненне граф 2 і 3 ажыццяўляецца пасля аналізу праграмы з улікам вопыту, набутага выкладчыкам.

У гэтых жа графах неабходна прадугледзіць паўтарыны вучэбнага матэрыялу, кантрольныя, практычныя, лабараторныя работы і інш.

У графе 4 ўказваецца тып заняткаў згодна прыкладнай кваліфікацыі (на выбар выкладчыка):

- Па лічбы зместе работы і па характары пазнаваўчай дзейнасці: ўводны; першага аналізіна з матэрыялам; засваення новых ведаў; прымянення атрыманых ведаў на практыцы; фарміравання навыкаў; замацавання; паўтарыны і абсцуплення; кантрольны; змешаны (камбінаваны).

- Па дыдактычных мэтах і мэтай у агульнай сістэме: камбінаваны (змешаны); аналізіна з новым матэрыялам; замацавання ведаў; абсцуплення і сістэматызаваны амаўчвання; выпрабаванні і замацавання ўменняў і навыкаў; праверкі ведаў.
- Удкладаны пераход асноўных тыпаў урокаў: урок вывучэння новых ведаў; урок фарміравання новых уменняў; урок сістэматызаваны і абсцуплення; урок кантролю і карэкцыі ведаў, уменняў, камбінаваны (змешаны) урок.

Прапанаваныя варыянты не выключаюць выкарыстання іншых педагагічных тыпаў урокаў. Віды заняткаў выкладчык указвае пры складанні плана вучэбных заняткаў.

Графа 5 павіна змяшчаць абавязковы мінімум вучэбна-наглядных дапаможнікаў і іншых сродаў навучання, якія неабходна выкарыстоўваць на гэтых занятках.

У графе 6 «Заланы для навучэнцаў на дом» вызначаецца змест і аб'ём матэрыялу для самастойнай працы навучэнцаў, у тым ліку для паўтарына.

Календарна-тэматычны план складзена на навучальны год, разглядзена шклявой (прадметнай) камісіяй і зацверджана намеснікам дырэктара па вучэбнай рабоце.

Усе карэктывы, якія неабходна ўнесці ў календарна-тэматычны план (у сувязі з улікам дасягненняў навукі і тэхнікі, змен тэарэтычных палажэнняў і інш.), павіны быць абмеркаваны шклявой (прадметнай) камісіяй, зацверджаны намеснікам дырэктара па вучэбнай рабоце і пазначаны ў графе 7.

## Перечень разделов и тем

Введение

Раздел 1 Усилители

Тема 1.1 Общие сведения об электронных усилителях

Тема 1.2 Обратная связь в усилителях

Тема 1.3 Режимы работы транзистора

Тема 1.4 Режимы работы усилительного каскада

Тема 1.5 Однокаскадные усилители

Раздел 2 Многокаскадные усилители

Тема 2.1 Общие сведения. Межкаскадные связи

Тема 2.2 Двухкаскадный усилитель с RC-связью

Раздел 3 Усилители мощности

Тема 3.1 Назначение выходных каскадов и требования к ним

Тема 3.2 Однотактные усилители мощности

Тема 3.3 Двухтактные усилители мощности

Раздел 4 Усилители постоянного тока

Тема 4.1 Общие сведения об усилителях постоянного тока (УПТ).  
Простейшие УПТ. Дрейф нуля.

Тема 4.2 Дифференциальные усилители

Раздел 5 Операционные усилители (ОУ)

Тема 5.1 Общие сведения об ОУ

Тема 5.2 Реализация ОУ на базе микросхем

Тема 5.3 Построение базовых схем на основе ОУ

Тема 5.4 Компаратор на ОУ

Тема 5.5 Импульсные усилители

Раздел 6 Генераторы гармонических колебаний



Тема 6.1 Общие сведения о генераторах

Тема 6.2 LC-генераторы

Тема 6.3 RC-генераторы

Тема 6.4 Стабилизация частоты автогенераторов гармонических колебаний

## Теоретический материал

### Введение

Электроника- область науки, техники. Производства, охватывающая исследование, разработку электронных средств (ЭС) и принципов их использования. При этом аналоговая электроника охватывает только те ЭС, которые предназначены для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону непрерывной функции, а цифровая электроника- средства для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону дискретной функции.

Курс «Аналоговая электроника» рассматривает принципы функционирования, способы расчета, методы анализа аналоговых устройств.

Учащиеся должны знать принципы построения и функционирования аналоговых устройств, уметь рассчитывать электронные цепи.

Фундамент электроники был заложен трудами физиков в XVIII–XIX в. Первые в мире исследования электрических разрядов в воздухе осуществили академики Ломоносов и Рихман в России и независимо от них американский ученый Франкель. В 1743 г. Ломоносов в оде "Вечерние размышления о божьем величии" изложил идею об электрической природе молнии и северного сияния. Уже в 1752 году Франкель и Ломоносов показали на опыте с помощью "громовой машины", что гром и молния представляют собой мощные электрические разряды в воздухе. Ломоносов установил также, что электрические разряды имеются в воздухе и при отсутствии грозы, т.к. и в этом случае из "громовой машины" можно было извлекать искры. "Громовая машина" представляла собой Лейденскую банку установленную в жилом помещении. Одна из обкладок которой была соединена проводом с металлической гребенкой или острием укрепленным на шесте во дворе.

Лейденская банка, названная по имени голландского города Лейдена, представляла собой простейший конденсатор. Она состояла из большого стеклянного стакана, обклеенного изнутри и снаружи станиолью (тонкой оловянной фольгой, использовавшейся в те времена для тех же целей, что и современная алюминивая—металл алюминий еще не был известен). Банка заряжалась от электростатической машины.

В 1802 году профессор физики Петербургской медико-хирургической академии – Василий Владимирович Петров впервые, за несколько лет до английского физика Дэви, обнаружил и описал явление электрической дуги в воздухе между двумя угольными электродами. Кроме этого фундаментального открытия, Петрову принадлежит описание разнообразных видов свечения разряженного воздуха при прохождении через него электрического тока. Работы Петрова зарубежным ученым были не доступны, так как они были только на русском языке. В России значимость работ не была понята и они были забыты. Поэтому открытие дугового разряда было приписано английскому физика Дэви.

## Этапы развития электроники

**1 этап.** К первому этапу относится изобретение в 1809 году русским инженером Ладыгиным лампы накаливания.

Открытие в 1874 году немецким ученым Брауном выпрямительного эффекта в контакте металл–полупроводник. Использование этого эффекта русским изобретателем Поповым для детектирования радиосигнала позволило создать ему первый радиоприемник. Датой изобретения радио принято считать 7 мая 1895 г. когда Попов выступил с докладом и демонстрацией на заседании физического отделения русского физико–химического общества в Петербурге. А 24 марта 1896 г. Попов передал первое радиосообщение на расстояние 350м. Успехи электроники в этот период ее развития способствовали развитию радиотелеграфии. Одновременно разрабатывали научные основы радиотехники с целью упрощения устройства радиоприемника и повышения его чувствительности. В разных странах велись разработки и исследования различных типов простых и надежных обнаружителей высокочастотных колебаний – детекторов.

**2 этап.** Второй этап развития электроники начался с 1904 г. когда английский ученый Флеминг сконструировал электровакуумный диод. Основными частями диода являются два электрода находящиеся в вакууме. Металлический анод (А) и металлический катод (К) нагреваемый электрическим током до температуры при которой возникает термоэлектронная эмиссия.

В 1907 г. американский инженер Ли де Форест установил, что поместив между катодом (К) и анодом (А) металлическую сетку (с) и подавая на нее напряжение  $V_c$  можно управлять анодным током  $I_a$  практически без инерционно и с малой затратой энергии. Так появилась первая электронная усилительная лампа – триод. Ее свойства как прибора для усиления и генерирования высокочастотных колебаний обусловили быстрое развитие радиосвязи.

В разных странах стало быстро развиваться производство электронных ламп. Особенно сильно это развитие стимулировалось военным значением радиосвязи. Поэтому 1913 – 1919 годы – период резкого развития электронной техники. В 1913 г. немецкий инженер Мейснер разработал схему лампового регенеративного приемника и с помощью триода получил незатухающие гармонические колебания. Новые электронные генераторы позволили заменить искровые и дуговые радиостанции на ламповые, что практически решило проблему радиотелефонии. С этого времени радиотехника становится ламповой. В России первые радиолампы были изготовлены в 1914 году в Санкт–Петербурге консультантом русского общества беспроволочного телеграфирования Николаем Дмитриевичем Папалекси, будущим академиком АН СССР. Папалекси окончил

Страсбургский университет, где работал под руководством Брауна. Первые радиолампы Папалекси из-за отсутствия совершенной откачки были не вакуумными, а газонаполненными (ртутными). С 1914 – 1916 гг. Папалекси проводил опыты по радиотелеграфии. Работал в области радиосвязи с подводными лодками. Руководил разработкой первых образцов отечественных радиоламп. С 1923 – 1935 гг. совместно с Мандельштамом руководил научным отделом центральной радиолaborатории в Ленинграде. С 1935 года работал председателем научного совета по радиофизике и радиотехнике при академии наук СССР.

Первые в России электровакуумные приемо–усилительные радиолампы были изготовлены Бонч – Бруевичем. Он родился в г. Орле (1888 г.). В 1909 году окончил инженерное училище в Петербурге. В 1914 г. окончил офицерскую электротехническую школу. С 1916 по 1918 г. занимался созданием электронных ламп и организовал их производство. В 1918 году возглавил Нижегородскую радиолaborаторию, объединив лучших радиоспециалистов того времени (Остряков, Пистолькорс, Шорин, Лосев). В марте 1919 года в нижегородской радиолaborатории началось серийное производство электровакуумной лампы РП–1. В 1920 году Бонч–Бруевич закончил разработку первых в мире генераторных ламп с медным анодом и водяным охлаждением, мощностью до 1 кВт. Видные немецкие ученые, ознакомившись с достижениями Нижегородской лаборатории признали приоритет России в создании мощных генераторных ламп. Большие работы по созданию электровакуумных приборов развернулись в Петрограде. Здесь работали Чернышев, Богословский, Векшинский, Оболенский, Шапошников, Зусмановский, Александров.

Переход от длинных волн к коротким и средним и развитие радиовещания потребовали разработки более совершенных ламп, чем триоды. Разработанная в 1924г. и усовершенствованная в 1926г. американцем Хеллом экранированная лампа с двумя сетками (тетрод), и предложенная им же 1930 г. электровакуумная лампа с тремя сетками (пентод), решили задачу повышения рабочих частот радиовещания. Пентоды стали самыми распространенными радиолампами. Развитие специальных методов радиоприема вызвало в 1934–1935 годах появления новых типов многосеточных частотообразовательных радиоламп. Появились также разнообразные комбинированные радиолампы, применение которых позволило значительно уменьшить число радиоламп в приемнике. Особенно наглядно взаимосвязь между электровакуумной и радиотехникой проявилась в период, когда радиотехника перешла к освоению и использованию диапазона УКВ (ультракороткие волны – метровые, дециметровые, сантиметровые и миллиметровые диапазоны). Для этой цели, во–первых, были значительно усовершенствованы уже известные радиолампы. Во–вторых, были разработаны электровакуумные приборы с новыми принципами управления электронными потоками. Сюда относятся многорезонаторные магнетроны(1938г), клистроны(1942г), лампы обратной волны ЛОВ (1953г). Такие приборы могли генерировать и усиливать

колебания очень высоких частот, включая миллиметровый диапазон волн. Эти достижения электровакуумной техники обусловили развитие таких отраслей как радионавигация, радиолакация, импульсная многоканальная связь.

В 1934 году сотрудники центральной радиолaborатории, Коровин и Румянцев, провели первый эксперимент по применению радиолакации и определению летящего самолета. В 1935 г. теоретические основы радиолакации были разработаны в Ленинградском физико-техническом институте Кобзаревым. Одновременно с разработкой вакуумных электроприборов, на втором этапе развития электроники, создавались и совершенствовались газоразрядные приборы.

В 1918 г. в результате исследовательской работы доктора Шретера немецкая фирма "Пинтш" выпустила первые промышленные лампы тлеющего разряда на 220 В. начиная с 1921 года голландская фирма Philips выпустила первые неоновые лампы тлеющего разряда на 110 В. В США первые миниатюрные неоновые лампы появились в 1929 г.

В 1930 году Ноулз впервые опубликовал описание неоновой лампы тлеющего разряда, в которой возникновение разряда между анодом и катодом вызывается третьим электродом.

В 30-е годы были заложены основы радиотелевидения. Первые предложения о специальных передающих трубках сделали независимо друг от друга Константинов и Катаев. Подобные же трубки названные иконоскопами построил в США Владимир Константинович Зворыкин. В 1912 г. он окончил Петербургский экономический институт. В 1914 г. колледж "Де Франс" в Париже. В 1917 эмигрировал в США. В 1920 г. поступил в фирму "Вестингаус Электрик". В 1929 г. возглавил лабораторию американской радиокорпорации "Камдем и Пристон". В 1931 г. Зворыкин создал первый иконоскоп – передающую трубку, которая сделала возможным развитие электронных телевизионных систем. В 1933 г. Шмаков и Тимофеев предложили более чувствительные передающие трубки – супериконоскоп, позволивший вести телевизионные передачи без сильного искусственного освещения.

В 1939г. советский ученый Брауде предложил идею создания еще более чувствительной передающей трубки названной суперортикон. К 1930 годам относятся первые эксперименты с очень простыми передающими устройствами получившими название видикон. Идея создания видикона была выдвинута Чернышевым в 1925 году. Первые практические образцы видиконов появились в США в 1946 г.

### **3. Третий этап**

#### **3.1 Изобретение точечного транзистора.**

Третий период развития электроники – это период создания и внедрения дискретных полупроводниковых приборов, начавшийся с изобретения точечного транзистора. В 1946 году при лаборатории "Белл Телефон" была создана группа во главе с Уильямом Шокли, проводившая

исследования свойств полупроводников кремния и германия. Группа проводила как теоретические, так и экспериментальные исследования физических процессов на границе раздела двух полупроводников с различными типами электрической проводимости. В итоге были изобретены: трехэлектродные полупроводниковые приборы – транзисторы. В зависимости от количества носителей заряда транзисторы были разделены на:

- униполярные (полевые), где использовались однополярные носители.
- биполярные, где использовались разнополярные носители (электроны и дырки).

Идеи создания полевых транзисторов появились раньше, чем биполярных, но практически реализовать эти идеи не удавалось. Успех был достигнут 23 декабря 1947 г. сотрудниками лаборатории "Белл Телефон" – Бардиным и Браттейном, под руководством Шокли. Бардин и Браттейн в результате многочисленных вариантов получили работающий полупроводниковый прибор. Информация об этом изобретении появилась в журнале "The Physical Review" в июле 1948 года.

Устройство изобретенное Бардиным и Браттейном было названо точечным транзистором типа А и представлял собой конструкцию представленную на рисунке 1, где (1) кристалл Германия, (2) вывод эмиттера, (3) вывод базы. Усиление сигнала осуществлялось за счет большого различия в величинах сопротивления, низкоомного входного и высокоомного выходного. Поэтому создатели нового прибора называли его сокращенно – транзистором (в пер. с английского – "преобразователь сопротивления").

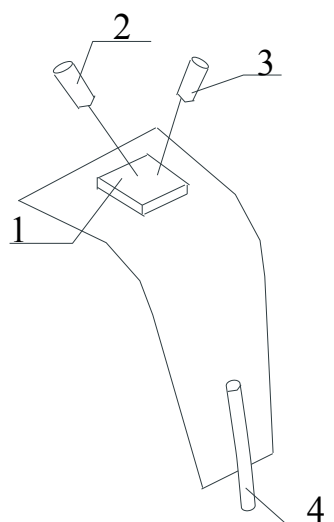


Рисунок 1-Точечный транзистор

#### 4.2 Изобретение плоскостного биполярного транзистора.

Одновременно, в период апрель 1947 – январь 1948 г., Шокли опубликовал теорию плоскостных биполярных транзисторов.

Шокли рассмотрел теорию плоскостного транзистора из кристалла полупроводника, содержащего два р-п перехода. Положительная р-область является эмиттером, отрицательная р-область коллектором, п-область представляет собой базу (рисунок 2). Таким образом, вместо металлических точечных контактов используются две р-п области. Изобретение транзисторов явилось знаменательной вехой в истории развития электроники и поэтому его авторы Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли были удостоены нобелевской премии по физике за 1956г.

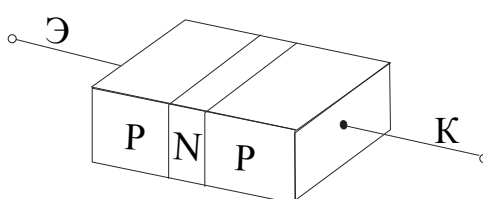


Рисунок 2-Плоскостной транзистор

Появление транзисторов – это результат кропотливой работы десятков выдающихся ученых и сотен виднейших специалистов, которые в течении предшествующих десятилетий развивали науку о полупроводниках. Среди них были не только физики, но и специалисты по электронике, физхимии, материаловедению.

Ускоренная разработка и производство транзисторов развернулись в США в кремниевой долине, расположенной в 80-ти км от Сан-Франциско. Возникновение кремниевой долины связывают с именем Ф. Термена – декана инженерного факультета Стенфордского университета, когда его студенты Хьюлетт, Паккард и братья Вариян создали фирмы, прославившие их имена во время второй мировой войны.

Бурное развитие кремниевой долины началось, когда Шокли основал собственную фирму по производству кремниевых транзисторов. Его фирма начала работу осенью 1955 г.

Первыми транзисторами выпущенными отечественной промышленностью были точечные транзисторы, которые предназначались для усиления и генерирования колебаний частотой до 5 МГц. В процессе производства первых в мире транзисторов были отработаны отдельные технологические процессы и разработаны методы контроля параметров. Накопленный опыт позволил перейти к выпуску более совершенных приборов, которые уже могли работать на частотах до 10 МГц. В дальнейшем на смену точечным транзисторам пришли плоскостные, обладающие более высокими электрическими и эксплуатационными качествами.

С появлением биполярных полевых транзисторов начали воплощаться идеи разработки малогабаритных ЭВМ. На их основе стали создавать бортовые электронные системы для авиационной и космической техники. Так как эти устройства содержали тысячи отдельных ЭРЭ (электрорадиоэлементов) и постоянно требовалось все большее и большее их увеличение, появились и технические трудности. С увеличением числа элементов электронных систем практически не удавалось обеспечить их работоспособность сразу же после сборки, и обеспечить, в дальнейшем, надежность функционирования систем. Даже опытные сборщики и наладчики ЭВМ допускали несколько ошибок на 1000 спаек. Разработчики предполагали новые перспективные схемы, а изготовители не могли запустить эти схемы сразу после сборки т.к. при монтаже не удавалось избежать ошибок, обрывов в цепи за счет не пропаев, и коротких замыканий. Требовалась длинная и кропотливая наладка. Проблема качества монтажно-сборочных работ стало основной проблемой изготовителей при обеспечении работоспособности и надежности радиоэлектронных устройств. Решение проблемы межсоединений и явилось предпосылкой к появлению микроэлектроники. Пробразом будущих микросхем послужила печатная плата, в которой все одиночные проводники объединены в единое целое и изготавливаются одновременно групповым методом путем травли медной фольги с плоскости фольгированного диэлектрика.

В 1960 году Роберт Нойс из фирмы Fairchild предложил и запатентовал идею монолитной интегральной схемы и применив планарную технологию изготовил первые кремниевые монолитные интегральные схемы.

Электронные устройства (ЭУ) по способу формирования и передачи сигналов управления делятся на 2 класса: аналоговые (непрерывные) и дискретные (прерывистые).

Аналоговые ЭУ служат для приема, преобразования, передачи электрического сигнала, изменяющегося по закону непрерывной (аналоговой) функции. В аналоговом ЭУ каждому конкретному значению реальной физической величины на входе датчика соответствует однозначное, вполне определенное значение выбранного электрического параметра постоянного или переменного тока. Это может быть напряжение или ток на участке электрической цепи, его частота, фаза.

Что же такое сигнал? Сигнал – это что-либо, несущее информацию. Свет, звук, температура, скорость - всё это физические величины, изменение которых имеет для нас определённое значение: либо как процесс жизнедеятельности, либо как технологический процесс.

Многие физические величины человек способен воспринимать, как информацию. Для этого у него есть преобразователи – органы чувств, которые разнообразные внешние сигналы преобразуют в импульсы (имеющие, кстати, электрическую природу), поступающие в головной мозг. При этом все виды сигналов: и свет, и звук, и температура преобразуются в импульсы одной природы.



В электронных системах функции органов чувств выполняют датчики (сенсоры), которые преобразуют все физические величины в электрические сигналы. Для света – фотоэлементы, для звука – микрофоны, для температуры – терморезистор или термопара.

Почему именно в электрические сигналы? Ответ очевиден, электрические величины универсальны, так как любые другие величины могут быть преобразованы в электрические и наоборот; электрические сигналы удобно передавать и обрабатывать.

После поступления информации, человеческий мозг на основе обработки этой информации отдаёт управляющие воздействия мышцам и другим механизмам. Аналогично в электронных системах электрические сигналы управляют электрической, механической, тепловой и другими видами энергии, посредством электродвигателей, электромагнитов, электрических источников света.

И так, вывод. То, что ранее делал человек (или не мог делать), выполняют электронные системы: контролируют, управляют, регулируют, связывают на расстоянии и т.п.

#### Способы представления информации

При использовании в качестве носителя информации электрических сигналов возможны две её формы:

1) аналоговая – электрический сигнал аналогичен исходному в каждый момент времени, т.е. непрерывен во времени. Температура, давление, скорость изменяются по непрерывному закону – датчики преобразуют эти величины в электрический сигнал, который изменяется по такому же закону (аналогичен). Величины, представленные в такой форме, могут принимать бесконечно много значений в каком-то диапазоне.

2) дискретная - импульсная и цифровая – сигнал представляет собой последовательность импульсов, в которых закодирована информация. При этом кодируются не все значения, а только в конкретные моменты времени – дискретизация сигнала.

#### Виды аналогового сигнала:

- Прямая: Напряжение (электрическое) Примером Аналогового устройства является потенциометр, преобразующий линейное перемещение  $X$  в напряжение  $U_{вых}$ .

- Окружность: положение ротора, колеса, шестерни, стрелки аналоговых часов, или фаза несущего сигнала;

- Отрезок: положение поршня, рычага управления, жидкостного термометра или электрический сигнал, ограниченный по амплитуде

#### Аналоговые сигналы часто используют:

- Для представления непрерывно изменяющихся физических величин. Например, аналоговый электрический сигнал, снимаемый с термопары, несет информацию об изменении температуры.

- Сигнал с микрофона — о быстрых изменениях давления в звуковой волне.

- В формировании первичного оптического изображения в фотосенсорах.

На практике аналоговый сигнал сопровождается большим количеством помех, тогда как цифровой их успешно отфильтровывает. Последний же способен восстанавливать исходные данные. Кроме того, непрерывный аналоговый сигнал часто несет в себе много лишней информации, что приводит к его избыточности — несколько цифровых сигналов можно передать вместо одного аналогового.

Если говорить о телевидении, а именно эта сфера своим переходом на “цифру” волнует большинство потребителей, то можно считать аналоговый сигнал совершенно себя изжившим. Однако пока что аналоговые сигналы принимает любая предназначенная для этого техника, а цифровой требует специальной. Правда, с распространением “цифры” аналоговых телевизоров все меньше и спрос на них катастрофически уменьшается.

Еще одна важная характеристика сигнала — безопасность. В этом отношении аналоговый демонстрирует полную незащищенность перед влияниями или вторжениями извне. Цифровой же шифруется посредством присвоения ему кода из радиоимпульсов, так что любое вмешательство исключено. На большие расстояния цифровые сигналы передавать сложно, потому используется схема модуляции-демодуляции.

## **Раздел 1 Электронные усилители**

### **Тема 1.1 Общие сведения об электронных усилителях**

Аналоговые устройства обработки сигналов продолжают занимать важное место в промышленной электронике. Это объясняется тем, что большинство типов первичных преобразователей физических величин — датчики температуры, давления и пр. — являются источниками аналоговых сигналов, а многие исполнительные элементы в объектах управления — электродвигатели, электромагниты и т.п. — управляются непрерывно изменяющимся электрическим током. Сложные системы управления, основой которых являются цифровые вычислительные комплексы, сопрягаются с объектами управления и датчиками с помощью аналоговых и аналого-цифровых устройств. Все это стимулирует ежегодное появление в мире многих десятков новых моделей аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем (ИМС). С точки зрения технологии изготовления ИМС делятся на полупроводниковые (монокристалльные, твердотельные) — изготавливаемые целиком на одной пластине кремния и гибридные — у которых резисторы, конденсаторы и соединительные проводники изготавливаются методами пленочной технологии, а бескорпусные активные элементы в виде чипов приклеиваются на пассивную часть схемы. Гибридные ИМС дороги, менее надежны и применяются обычно в тех случаях, когда отсутствуют монокристалльные ИМС с необходимыми параметрами. Поэтому большинство современных моделей ИМС монокристалльные. История интегральных микросхем началась 12 сентября 1958 г.,

когда в лаборатории фирмы Texas Instruments Джеком Килби (Jack S. Kilby) был продемонстрирован генератор сигналов, изготовленный им на кусочке германия размером 11x1.5 мм. Прологом этого события явилось изобретение Джином Хорни (основателем фирмы Fairchild Semiconductor) планарного транзистора в 2000 г. Дж. Килби за изобретение интегральной схемы был удостоен совместно с российским физиком Ж. И. Алферовым Нобелевской премии по физике. Появление интегральной микросхемы было вызвано стремлением снизить стоимость и повысить надежность электронных устройств за счет параллельного изготовления в едином технологическом процессе как активных элементов (транзисторов и диодов), так и пассивных (резисторов и конденсаторов). Впоследствии оказалось, что совместное изготовление транзисторов позволило лучше согласовать их характеристики, а это очень важно, например, для входных каскадов операционных усилителей. Расположение транзисторов в непосредственном тепловом контакте друг с другом обеспечило повышение температурной стабильности аналоговых схем, а микроскопические размеры и близость элементов друг к другу — повышение их быстродействия. Парадоксально, но в 1958 г. даже в США промышленность оказалась не готова к восприятию интегральных микросхем, несмотря на то, что проблемы, связанные с увеличением числа компонентов в одном изделии, уже тогда стояли очень остро. Всерьез тогда ими заинтересовались только военные. Только после того, как при участии все того же Дж. Килби был изготовлен первый микрокалькулятор, началось бурное развитие микросхемотехники и технологии ее реализации. Промежуточные (далеко еще не окончательные) итоги этого развития мы можем наблюдать сейчас. Если в 1958 г. одиночный транзистор с посредственными, по нынешним понятиям, характеристиками стоил \$10, то сегодня за те же деньги можно приобрести модуль памяти, содержащий несколько сотен миллионов транзисторов. Во многом благодаря развитию интегральных схем, мировой рынок электроники вырос с \$29 млрд. в 1961 г. до \$1150 млрд. в 2000 г., причем доля собственно микросхем составила в 2000 г. \$177 млрд. Несмотря на доминирование на рынке цифровых электронных компонентов, процентная доля аналоговых устройств с 1970 г. все время остается на одном и том же уровне – примерно 20...25%. Все это позволяет считать, что квалифицированные специалисты по аналоговой схемотехнике будут востребованы еще многие годы. По элементной базе различают:

Ламповый усилитель — усилитель, усилительными элементами которого служат электронные лампы

Полупроводниковый усилитель — усилитель, усилительными элементами которого служат полупроводниковые приборы (транзисторы, микросхемы и др.)

Гибридный усилитель — усилитель, часть каскадов которого собрана на лампах, часть — на полупроводниках

Квантовый усилитель — устройство для усиления электромагнитных волн за счёт вынужденного излучения возбуждённых атомов, молекул или ионов.

По характеру изменения во времени входного сигнала (по диапазону частот) различают усилители медленно меняющегося (постоянного) и переменного токов. Для усилителей постоянного тока характерно наличие усиления уже на нижней частоте  $f = 0$ . Применяется в автоматике, измерительной и аналоговой вычислительной технике.

В свою очередь, усилители переменного тока делятся на:

- Усилитель низкой частоты (УНЧ, усилитель звуковой частоты, УЗЧ) — усилитель, предназначенный для работы в области звукового диапазона частот (иногда также и нижней части ультразвукового, до 200 кГц). Используется преимущественно в технике звукозаписи, звуковоспроизведения, а также в автоматике, измерительной и аналоговой вычислительной технике.

- Усилитель высокой частоты (УВЧ, усилитель радиочастоты, УРЧ) — усилитель сигналов на частотах радиодиапазона. Применяется преимущественно в радиоприёмных и радиопередающих устройствах в радиосвязи, радио- и телевизионного вещания, радиолокации, радионавигации и радиоастрономии, а также в измерительной технике и автоматике

- Импульсный усилитель — усилитель, предназначенный для усиления импульсов тока или напряжения с минимальными искажениями их формы. Входной сигнал изменяется настолько быстро, что переходные процессы в усилителе являются определяющими при нахождении формы сигнала на выходе. Применяются в импульсных устройствах радиолокации, радионавигации, автоматики и измерительной техники.

Виды усилителей по полосе частот:

Широкополосный (апериодический) усилитель — усилитель, дающий одинаковое усиление в широком диапазоне частот

Полосовой усилитель — усилитель, работающий при фиксированной средней частоте спектра сигнала и приблизительно одинаково усиливающий сигнал в заданной полосе частот

Селективный усилитель — усилитель, у которого коэффициент усиления максимален в узком диапазоне частот и минимален за его пределами

Виды усилителей по типу нагрузки:

с резистивной;

с емкостной;

с индуктивной;

с резонансной.

Специальные виды усилителей

Дифференциальный усилитель — усилитель, выходной сигнал которого пропорционален разности двух входных сигналов, имеет два входа и, как правило, симметричный выход.

Операционный усилитель — многокаскадный усилитель постоянного тока с большими коэффициентом усиления и входным сопротивлением, дифференциальным входом и несимметричным выходом с малым выходным сопротивлением, предназначенный для работы в устройствах с глубокой отрицательной обратной связью.

Инструментальный усилитель — предназначен для задач, требующих прецизионного усиления с высокой точностью передачи сигнала

Масштабный усилитель — усилитель, изменяющий уровень аналогового сигнала в заданное число раз с высокой точностью

Логарифмический усилитель — усилитель, выходной сигнал которого приблизительно пропорционален логарифму входного сигнала

Квадратичный усилитель — усилитель, выходной сигнал которого приблизительно пропорционален квадрату входного сигнала

Интегрирующий усилитель — усилитель, сигнал на выходе которого пропорционален интегралу от входного сигнала

Инвертирующий усилитель — усилитель, изменяющий фазу гармонического сигнала на  $180^\circ$  или полярность импульсного сигнала на противоположную (инвертор)

Парафазный (фазиинверсный) усилитель — усилитель, применяемый для формирования двух противофазных напряжений

Малозумящий усилитель — усилитель, в котором приняты специальные меры для снижения уровня собственных шумов, способных вуалировать усиливаемый слабый сигнал

Изолирующий усилитель — усилитель, в котором входные и выходные цепи гальванически изолированы. Служит для защиты от высокого напряжения, которое может быть подано на входные цепи, и для защиты от помех, распространяющихся по цепям заземления

## **Тема 1.2 Обратная связь в электронных усилителях**

Под обратной связью (ОС) понимают передачу части энергии усиленных колебаний из выходной цепи во входную. Цепь, по которой осуществляется такая передача энергии, называется цепью обратной связи. Если электрические колебания из выходной цепи поступают во входную цепь в фазе с электрическими колебаниями входного сигнала, то это положительная ОС (ПОС). При противофазности указанных электрических колебаний образуется отрицательная ОС (ООС).

Иными словами, отрицательная обратная связь — это такое влияние выхода системы на вход («обратное»), которое уменьшает действие входного сигнала на систему.

В зависимости от принципа действия и способа подачи во входную цепь обратная связь может быть различных видов. По принципу действия различают ОС по напряжению и ОС по току. Напряжение ОС может подаваться на вход усилителя либо последовательно с напряжением входного сигнала, либо параллельно. В первом случае обратная связь называется последовательной, а во втором — параллельной.

## **Тема 1.3 Режимы работы транзистора**

Каждый переход БТ можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от полярности напряжений на переходах различают четыре режима работы транзистора.

1. Активный. Эмиттерный переход находится под прямым напряжением, а коллекторный под обратным. Режим является основным и используется в усилителях. Этот режим соответствует мах значению коэффициента передачи тока эмиттера, обеспечивает минимальные искажения сигнала.

Коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_\varepsilon$

Это отношение значений токов на линейных участках их зависимости.

$\alpha = 0,95 \dots 0,99$

2. Отсечки. Транзистор закрыт. Оба перехода под обратным напряжением. Ток, протекающий через транзистор очень мал. Режим используется для размыкания цепей передачи сигнала.

3. Режим насыщения. Оба перехода под прямым напряжением. Через транзистор протекает максимальный ток.

Выходной ток не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Из-за малого напряжения  $U_{кэ}$  режим насыщения используется для замыкания цепей передачи сигнала.

4. Инверсный режим. Переход Э-Б смещен в обратном направлении, а К-Б – в прямом.

Этот режим приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи тока эмиттера по сравнению с работой транзистора в активном режиме и поэтому на практике применяется редко.

#### **Тема 1.4 Режимы работы усилительного каскада**

Различают 5 режимов работы усилительного каскада по постоянному току: А, В, С, АВ, D.

Режим А—рабочая точка в режиме покоя (при отсутствии входного сигнала) выбирается на середине линейного участка нагрузочной характеристики. И при гармоническом входном сигнале изменения  $I_k$  и  $U_{кэ}$  происходят по гармоническому закону с минимальными искажениями. Ток в выходной цепи транзистора протекает в течение всего периода изменения напряжения входного сигнала.

Режим В—рабочая точка выбирается на границе между активным режимом и режимом отсечки. Ток в выходной цепи транзистора протекает только в течение половины периода изменения напряжения входного сигнала. Поэтому при гармоническом входном сигнале в коллекторной цепи БТ образуются импульсы напряжения и тока.

Режим АВ—режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала. Режим имеет более высокий КПД и небольшие искажения выходного сигнала.

Режим С—рабочая точка выбирается в области отсечки. Транзистор больше половины периода находится в состоянии отсечки (закрыт). Ток коллектора- импульсы полусинусоидальной формы, длительность которых меньше половины периода.

Режим D (ключевой)—транзистор может находиться только в состоянии включен (режим насыщения) и выключен (режим отсечки). Поэтому выходной ток может принимать только 2 значения макс или мин.

### Тема 1.5 Однокаскадные усилители

Типичная схема усилительного каскада на транзисторе с ОЭ показана на рисунке 3.

Входное усиливаемое переменное напряжение  $U_{вх}$  подводится ко входу усилителя через разделительный конденсатор  $C1$ . Конденсатор  $C1$  препятствует передаче постоянной составляющей напряжения входного сигнала на вход усилителя, которая может вызвать нарушение режима работы по постоянному току транзистора  $VT$ . Усиленное переменное напряжение, выделяемое на коллекторе транзистора  $VT$ , подводится к внешней нагрузке с сопротивлением  $R_n$  через разделительный конденсатор  $C2$ . Этот конденсатор служит для разделения выходной коллекторной цепи от внешней нагрузки по постоянной составляющей коллекторного тока  $I_{кр}$

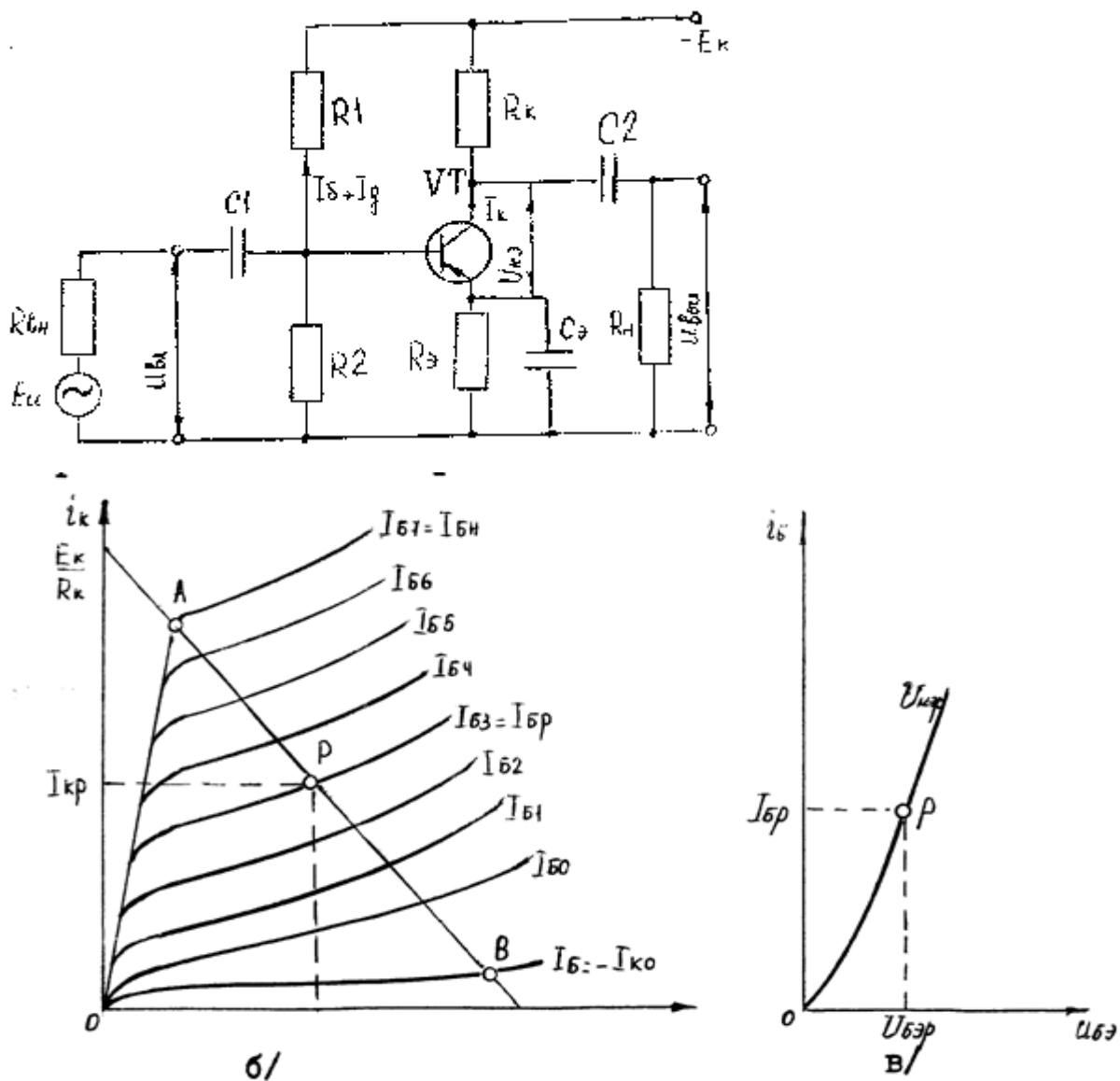


Рисунок 3-Однокаскадный усилитель

Значения  $I_{кр}$  и других постоянных составляющих тока и напряжения в цепях транзистора зависят от режима его работы (начального положения рабочей точки).

Рабочей точкой транзистора называют точку пересечения динамической характеристики (нагрузочной прямой) с одной из статических вольт-амперных характеристик. Режим работы транзистора определяется начальным положением рабочей точки (при отсутствии входного переменного сигнала). Это положение определяется на характеристиках совокупностью постоянных составляющих токов и напряжений в выходной  $I_{кр}$ ,  $U_{кэр}$  и входной  $I_{бр}$ ,  $U_{бэр}$  цепях (рисунок 3, б, в).

При работе транзистора в активном (усилительном) режиме (класса А) рабочая точка должна находиться примерно посередине отрезка АВ нагрузочной прямой. Предельные изменения входного тока базы должны быть такими, чтобы рабочая точка не выходила за пределы отрезка АВ.

Начальное положение рабочей точки обеспечивается делителем напряжения, состоящим из резисторов R1 и R2.

При обеспечении режима работы транзистора необходимо осуществить температурную стабилизацию положения рабочей точки (уменьшить влияние температуры на начальное положение рабочей точки). С этой целью в эмиттерную цепь введен резистор  $R_э$ , на котором создается напряжение ООС по постоянному току  $U_{R_э}$ .

Для устранения ООС по переменному току (при наличии входного переменного сигнала) резистор  $R_э$  шунтируют конденсатором  $C_э$ , сопротивление которого на частоте усиливаемого сигнала должно быть незначительным.

## Раздел 2 Многокаскадные усилители

### Тема 2.1 Общие сведения. Межкаскадные связи

В большинстве случаев одиночные каскады не обеспечивают необходимое усиление и заданные параметры усилителей. Поэтому усилители, которые применяют в аппаратуре связи и измерительной технике, многокаскадные. При анализе и расчете многокаскадного усилителя необходимо определить общий коэффициент усиления усилителя, искажения, вносимые им, распределять их по каскадам, определить требования к источникам, решить вопросы введения обратных связей и т.д.

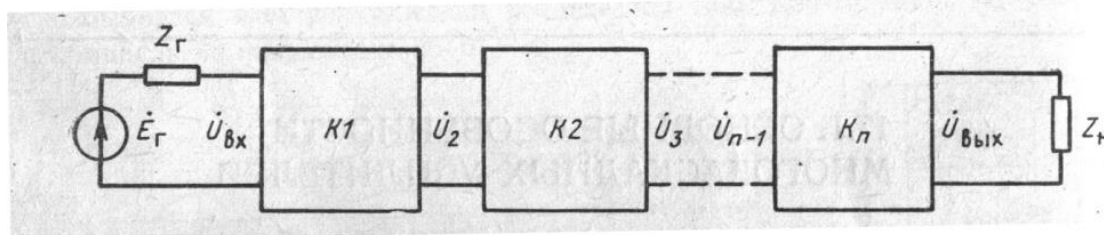


Рисунок 4- Структурная схема многокаскадного усилителя



Коэффициент усиления усилителя можно определить, исходя из структурной схемы (рисунок 4):

$$K_{\text{общ}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = (U_{\text{вых}}/U_{n-1}) \dots (U_3/U_2)(U_2/U_{\text{вх}}) = K_n K_{n-1} \dots K_2 K_1$$

или

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 \dots K_n e^{f(\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n)}$$

где  $K_1, \dots, K_n$  – коэффициенты усиления каскадов,  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  – фазовые сдвиги, вносимые каждым усилительным каскадом.

Таким образом, для многокаскадного усилителя общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления каждого каскада. Суммарный фазовый сдвиг, вносимый усилителем, равен сумме фазовых сдвигов каждого каскада. Сквозной коэффициент усиления

$$K_{\text{общ}} = k_{\text{вх}} K_{\text{общ}}$$

где  $k_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}}/(Z_{\Gamma} + Z_{\text{вх}})$  – коэффициент передачи входной цепи.

В аппаратуре связи для компенсации потери мощности на отдельных участках (затухания) необходимо, чтобы усилитель работал на согласованную нагрузку, т.е. его входное сопротивление должно быть равно сопротивлению источника (выходного сопротивления предыдущего тракта аппаратуры или линии), а выходное сопротивление должно равняться сопротивлению нагрузки. Для согласования усилителей по входу и выходу используют усилители с обратной связью и согласующие трансформаторы.

Основными видами межкаскадных связей являются: резистивно-емкостная, непосредственная и трансформаторная.

## Тема 2.2 Двухкаскадный усилитель с RC-связью

Приведенный усилитель напряжения состоит из 2-х идентичных каскадов, представляющих собой усилители на биполярных транзисторах с коллекторной нагрузкой. В качестве связующего элемента используется конденсатор связи  $C_2$ , предотвращающий появление уравнительного тока между каскадами. Для переменной составляющей этот конденсатор имеет низкое сопротивление.

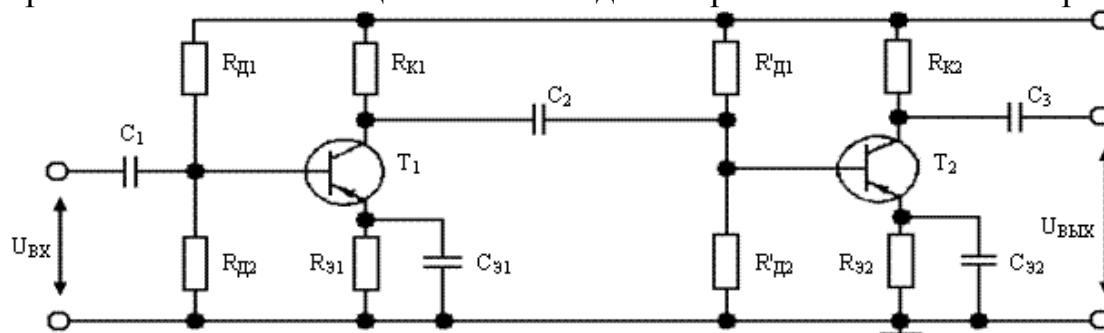


Рисунок 5- Двухкаскадный усилитель

Входное устройство служит для передачи сигнала от источника во входную цепь каскада предварительного усиления. В качестве входного устройства могут быть использованы конденсаторы, резисторы, трансформаторы. Конденсатор  $C_1$  включают, чтобы исключить прохождение постоянной составляющей тока и напряжения смещения первого активного элемента в источник сигнала, а также чтобы постоянная составляющая тока

от источника сигнала не поступала на вход активного элемента. Конденсатор С2 – входное устройство для второго каскада, он осуществляет связь каскадов.

Выходное устройство необходимо для передачи сигнала из выходной цепи последнего усилителя в нагрузку. В качестве выходного устройства используют трансформаторы, конденсаторы и резисторы. Конденсаторы и резисторы используют для разделения постоянных составляющих тока и напряжения выходной цепи усилителя и нагрузки.

### **Раздел 3 Усилители мощности**

#### **Тема 3.1 Назначение выходных каскадов и требования к ним**

Усилители мощности обычно являются выходными каскадами многокаскадного усилителя и предназначены для получения в низкоомной нагрузке требуемой мощности выходного сигнала.

В выходных усилителях мощности должны использоваться транзисторные каскады с малым входным сопротивлением, а цепи ООС должны быть только по напряжению.

Выходные каскады проектируют в одноклапном и двухклапном исполнении. Одноклапные каскады работают в режиме класса А, а двухклапные –В или АВ. Двухклапная схема в режиме класса В является самой экономичной и обеспечивает большой уровень выходной мощности. Одноклапную схему применяют при относительно малых выходных мощностях. Транзисторы в выходных каскадах могут работать по любой схеме включения (ОБ, ОК, ОЭ). Наиболее часто применяют схему с ОЭ, обладающую высоким усилением мощности.

#### **Тема 3.2 Одноклапные усилители мощности**

Одноклапные усилители обычно работают в режиме А и используются в предварительных каскадах УМ. При низкоомных нагрузках для увеличения КПД одноклапные УМ строятся по трансформаторной схеме. В одноклапных усилителях мощности применяется лишь один транзистор, который работает в активном режиме и усиливает как положительную, так и отрицательную полувольтны входного сигнала (класс усиления А). Такой режим работы называется одноклапным.

Кроме более высокого КПД достоинством трансформаторного УМ являются простота изменения фазы выходного напряжения и возможность использования низковольтного источника питания, так как вследствие малого падения напряжения на обмотке трансформатора в режиме покоя

#### **Тема 3.3 Двухклапные усилители мощности**

Двухклапные УМ могут быть трансформаторными и бес-трансформаторными. В двухклапных схемах входной сигнал усиливается за два такта. В первом такте полувольтна одной полярности усиливается первым транзистором, а во втором такте полувольтна другой полярности – вторым транзистором.

Двухтактный трансформаторный УМ представляет собой два однотактных каскада с общими цепями нулевого потенциала и с общим выходным трансформатором, имеющим выведенную среднюю точку первичной обмотки.

#### Раздел 4 Усилители постоянного тока

##### Тема 4.1 Общие сведения об усилителях постоянного тока (УПТ).

##### Простейшие УПТ. Дрейф нуля.

Усилителями постоянного тока называют такие устройства, которые могут усиливать медленно изменяющиеся электрические сигналы, то есть они способны усиливать и переменные и постоянные составляющие входного сигнала. Усилители постоянного тока имеют много разновидностей (дифференциальные, операционные, усилители с преобразованием входного сигнала и др.). Поскольку такие устройства пропускают наряду с переменной составляющей еще и постоянную, то отдельные каскады должны быть связаны между собой либо непосредственно, либо через резисторы, но не через разделительные конденсаторы или трансформаторы, которые не пропускают постоянную составляющую. Основную проблему усилителей постоянного тока представляет дрейф нуля – отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения при отсутствии входного сигнала.

Наибольшее влияние на дрейф нуля в УГС оказывает первый каскад, так как изменение тока или напряжения на его выходе усиливается последующими каскадами.

##### Тема 4.2 Дифференциальные усилители

В настоящее время наибольшее распространение получили УПТ на основе дифференциальных (параллельно-балансных или разностных) каскадов. Такие усилители просто реализуются в виде монолитных ИМС и широко выпускаются промышленностью. На рисунке 6 приведена принципиальная схема простейшего варианта дифференциального усилителя (ДУ) на БТ.

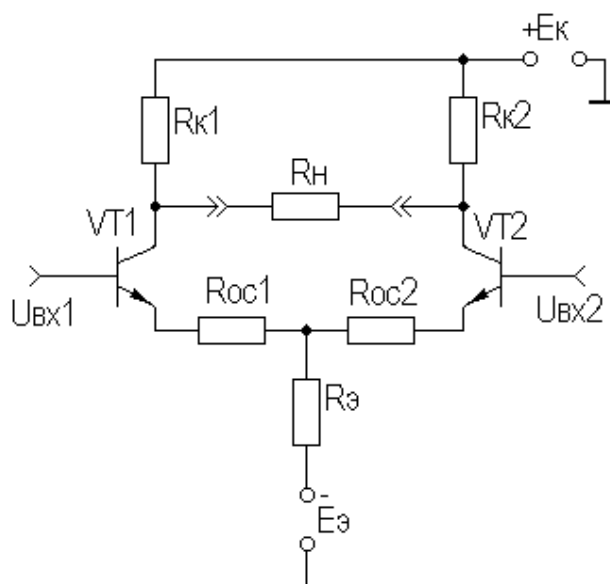


Рисунок 6- Схема ДУ

Любой ДУ выполняется по принципу сбалансированного моста, два плеча которого образованы резисторами  $R_{k1}$  и  $R_{k2}$ , а два других — транзисторами  $VT1$  и  $VT2$ . Сопротивление нагрузки  $R_n$  включено в диагональ моста. Сопротивления резисторов  $R_{oc1}$  и  $R_{oc2}$  цепи последовательной ООС по току обычно невелики или вообще отсутствуют, поэтому можно считать, что резистор  $R_э$  подключен к эмиттерам транзисторов.

## **Раздел 5 Операционные усилители (ОУ)**

### **Тема 5.1 Общие сведения об ОУ**

Операционный усилитель (ОУ) был создан для выполнения математических операций в аналоговых вычислительных машинах. Первый ламповый ОУ  $K2W$  был разработан в 1942 году Л. Джули (США). Он содержал два двойных электровакуумных триода. Первые ОУ представляли собой громоздкие и дорогие устройства. С заменой ламп транзисторами операционные усилители стали меньше, дешевле, надежнее и сфера их применения расширилась. Первые операционные усилители на транзисторах появились в продаже в 1959 году. Р. Малтер (США) разработал ОУ  $P2$ , включавший семь германиевых транзисторов и варикапный мостик. Требования к увеличению надежности, улучшению характеристик, снижению стоимости и размеров способствовали развитию интегральных микросхем. Первый интегральный ОУ (отечественный аналог —  $140УД1$ ), имевший рыночный успех, был разработан Робертом Видларом (R.J. Widlar) в 1963 году. Этот усилитель имел низкий коэффициент усиления, большие входные токи и несимметричный выход (разное выходное сопротивление для положительной и отрицательной полуволн выходного сигнала). Через два года Р. Видлар разработал усилитель трехкаскадный с большим коэффициентом усиления и симметричным выходом, но сложной схемой коррекции частотной характеристики (отечественный аналог —  $153УД1$ ). Усилитель нашел широкое распространение в массовой аналоговой аппаратуре обработки данных. Ежегодный мировой выпуск этой ИМС оценивался в 1970 г. на уровне 20...30 млн. шт. Решениями, примененными в этом ОУ, была в значительной мере подготовлена схемотехническая база для следующих поколений операционных усилителей. В 1967—1968 годах Р. Видлар разработал двухкаскадный  $LM101$  и его усовершенствованный вариант  $LM101A$  (отечественные аналоги соответственно  $153УД2$  и  $153УД6$ ). Эти усилители явились настоящим прорывом в аналоговой интегральной схемотехнике. Для них характерны простая схема частотной коррекции (всего один конденсатор), высокий коэффициент усиления (до 150000) и малые входные токи (особенно у  $LM101A$ ). Усилители  $LM101$  и  $LM101A$  не требовали внешних цепей защиты входа и выхода, что весьма упрощало их применение. Р. Видлар вышел за рамки привычных представлений о транзисторе как о трехэлектродном приборе. В его новых разработках

транзисторы имели по несколько коллекторов и эмиттеров, поэтому принципиальные схемы ОУ стали значительно отличаться от традиционных.

В настоящее время номенклатура ОУ насчитывает сотни наименований.

Операционные усилители выпускаются в малогабаритных корпусах и очень дешевы, что способствует их массовому распространению.

Операционные усилители представляют собой усилители постоянного тока с высоким коэффициентом усиления, дифференциальным входом и малыми значениями напряжения смещения нуля и входных токов.

### **Тема 5.2 Реализация ОУ на базе микросхем**

Большинство ОУ изготавливают на базе микросхем. Возможность реализации сложной структуры ОУ в интегральном исполнении на одном кристалле позволило достичь практически идеальных параметров и наладить массовый выпуск подобных устройств. По размерам и цене ОУ общего применения практически не отличаются от отдельного транзистора. В то же время преобразование сигнала схемой на ОУ почти исключительно определяется свойствами цепей внешних обратных связей и отличается высокой стабильностью и воспроизводимостью. Кроме того, благодаря практически идеальным характеристикам ОУ реализация различных функциональных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на дискретных транзисторах. Поэтому операционные усилители стали сегодня основой элементной базы (своего рода «кирпичиками») во многих областях аналоговой схемотехники. Входной каскад выполняется в виде дифференциального усилителя, так что в целом ОУ имеет два входа — инвертирующий и неинвертирующий. В дальнейшем будем, при необходимости, обозначать неинвертирующий вход знаком «+» или буквой «р» (positive — положительный), а инвертирующий — знаком «—» или буквой «п» (negative — отрицательный). На схемах инвертирующий вход дополнительно обозначается кружком. Выходное напряжение находится в одной фазе с разностью входных напряжений, причем для сохранения знака при вычислении этой разности принято вычитать напряжение на инвертирующем входе из напряжения на неинвертирующем.

Разность входных напряжений называется дифференциальным входным напряжением. Полусумма входных напряжений называется синфазным входным напряжением. Иногда синфазным называют также напряжение на неинвертирующем входе.

Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, следует использовать двухполярное напряжение питания. Для этого нужно предусмотреть два источника постоянного напряжения. Чаще всего интегральные операционные усилители рассчитаны на напряжение питания  $\pm 15$  В, хотя существует немало моделей, которые питаются от источников как существенно большего, так и заметно меньшего напряжения. В

дальнейшем, рассматривая схемы на ОУ, мы, как правило, не будем указывать выводы питания.

Наконец, очень важное обстоятельство: операционный усилитель почти всегда охвачен глубокой отрицательной обратной связью, свойства которой и определяют свойства схемы с ОУ.

### **Тема 5.3 Построение базовых схем на основе ОУ**

Требования к ОУ.

Для обеспечения достаточной устойчивости и выполнения математических операций над сигналами с высокой точностью реальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

- высоким коэффициентом усиления по напряжению, в том числе и в области нулевых частот;
- малым напряжением смещения нуля;
- малыми входными токами по обоим входам;
- высокими входными сопротивлениями по обоим входам;
- низким выходным сопротивлением;
- амплитудно-частотной характеристикой с наклоном в области высоких частот —20 дБ/дек вплоть до частоты единичного усиления.

Операционный усилитель должен быть усилителем постоянного тока (УПТ) с высоким коэффициентом усиления по напряжению и, следовательно, содержать несколько каскадов усиления. Однако, с ростом числа каскадов усиления увеличивается опасность нарушения устойчивости ОУ с обратными связями и усложняются цепи коррекции. Даже усилители всего лишь с тремя каскадами усиления напряжения (например, 140УД2, 153УД1, 551УД1) требуют столь сложных схем включения, что разработчики стараются избегать их применения. Чтобы уйти от многокаскадности, приходится использовать усилительные каскады с очень высоким коэффициентом усиления по напряжению. Большие трудности проектирования усилителей постоянного тока связаны также с обеспечением малого смещения нуля ОУ. Смещение нуля ОУ проявляется в том, что при входном дифференциальном напряжении, равном нулю, выходное напряжение принимает некоторое значение, не равное нулю. Обычно определяют смещение нуля через приведенное ко входу напряжение смещения (или входное напряжение сдвига), под которым понимают такое дифференциальное напряжение которое нужно приложить к входу усилителя, чтобы его выходное напряжение стало равным нулю.

Смещение нуля, по сути, является аддитивной погрешностью выполнения математических операций ОУ над входными сигналами. Смещение нуля может иметь существенные температурный и временной дрейфы. Операционные усилители на дискретных транзисторах имели значительное смещение нуля, связанное с неидентичностью транзисторов. Только применение и усовершенствование интегральной технологии, позволившей изготавливать парные транзисторы дифференциального каскада в едином производственном цикле и на расстоянии нескольких микрон друг

от друга, привело к существенному снижению смещения нуля и его временного и температурного дрейфов.

Как правило, ОУ, обладающий высокими характеристиками одного типа, например быстродействием, проигрывает в других отношениях. В результате разработчик электронных схем оказывается в ситуации Агафьи Тихоновны из гоголевской «Женитьбы»: «Если бы губы Никанора Ивановича да приставить к носу Ивана Кузьмича, да взять сколько-нибудь развязности, какая у Балтазара Балтазарыча, да пожалуй, прибавить к этому еще дородности Ивана Павловича...». Все же положение инженера лучше, поскольку он может скомбинировать из нескольких усилителей один, но с очень хорошими свойствами.

Усилители с периодической компенсацией дрейфа отличаются низким значением напряжения смещения нуля при сравнительно невысокой стоимости. Вместе с тем их быстродействие и шумовые параметры оставляют желать лучшего.

Многие электронные схемы (в частности, измерительные) работают в кратковременном или повторно-кратковременном режиме, когда короткий интервал приема и обработки входного сигнала сменяет продолжительная пауза, в течение которой выходной сигнал схемы игнорируется окончательным устройством (например, микроконтроллером). В этом случае основной усилитель может сам компенсировать свой дрейф.

Часто разработчик электронной аппаратуры попадает в ситуацию, когда вроде бы правильно спроектированная схема с ОУ и, даже больше того, схема, нормально работавшая на макетной плате, будучи перенесена на окончательную печатную плату, начинает возбуждаться. Скорее всего, здесь дело в неудачной топологии печатной платы, создающей повышенную входную емкость ОУ. При единичном производстве перепроектировать и изготовить заново печатную плату слишком накладно. Кроме того, нельзя поручиться, что после переделки ситуация улучшится. Какие же меры можно предпринять в этом случае?

Самый простой метод заключается в уменьшении петлевого усиления.

Во многих случаях (в интеграторах, усилителях сигналов пьезодатчиков и др.) требуются усилители с малыми входными токами. Для этого выпускается длинный ряд моделей ОУ с входными каскадами на супербета- и полевых транзисторах, входные токи которых составляют доли нА, а для некоторых типов — доли пА. Для успешного применения таких ОУ следует решить проблемы, связанные с утечкой токов по поверхности печатной платы. Если не принять никаких мер, то токи утечки могут легко стать больше входных токов ОУ, что вызовет дополнительное смещение входного напряжения. Для уменьшения возможности возникновения такого смещения необходимо тщательно очистить печатную плату после монтажа и покрыть ее эпоксидным или иным компаундом с целью предотвращения влияния влаги и дальнейшего ее загрязнения. Однако даже чистая печатная плата не обладает бесконечным сопротивлением. При температуре 125°C сопротивление между двумя параллельными проводниками длиной 20 мм и

расстоянием между ними 1 мм составляет около 1011 Ом. Если один из них —шина питания +15 В, а другой —инвертирующий вход с нулевым потенциалом, то нетрудно рассчитать, что при этом в суммирующую точку усилителя будет втекать ток 0.15 нА, не предусмотренный схемой, что намного больше входных токов многих типов ОУ. Это приведет к значительному смещению нуля усилителя. Проблема решается путем создания вокруг входных выводов ОУ проводящего, охранного, кольца, подключаемого к некоторой точке схемы с низким сопротивлением, находящимся практически под тем же потенциалом, что и входы ОУ. Это эффективно препятствует протеканию тока по плате к входам усилителя.

Охранные кольца должны полностью окружать входы ОУ и выводы резисторов, конденсаторов, диодов и других элементов схемы, подключенных к входам ОУ. Для достижения максимального эффекта при монтаже в отверстия, охранные кольца должны быть помещены как с верхней, так и с нижней стороны печатной платы. Имеется и другой способ борьбы с утечками, который дает даже лучшие результаты, чем защитные кольца на печатной плате. Он заключается в том, что выводы входов ОУ вообще не впаиваются в печатную плату и соединяются со всеми присоединяемыми к ним элементами в воздухе. Для большей жесткости вывод ОУ и точку соединения можно опереть на фторопластовую стойку

Другой потенциальный источник утечки, который может остаться незамеченным, —это корпус микросхемы. Дополнительные токи утечки могут протекать по пленке соли или жира, оставленной на поверхности корпуса после прикосновения к нему руками.

Многие ОУ имеют встроенную защиту от короткого замыкания, допускающую работу усилителя в этом режиме неограниченное время.

### **Тема 5.4 Компаратор на ОУ**

Компаратор (сравнивающее устройство) предназначен для сравнения двух напряжений, поступающих на его входы. Одно из сравниваемых напряжений, называемое опорным, может быть постоянным или медленно меняющимся. Другое—обычно имеет большую скорость изменения. В зависимости от знака разности входных напряжений на выходе компаратора устанавливается  $U_{\text{вых max}}$  или  $U_{\text{вых min}}$ .

Компараторы применяются в устройствах временной задержки импульсов, для получения перепадов напряжений (применяются в цифровой технике; 0 или 1) или импульсов малой длительности.

В качестве компараторов широко используют ОУ. Большой коэффициент усиления ОУ обеспечивает установление высокого или низкого уровня выходного напряжения при незначительном отличии входных напряжений.



## Раздел 6 Импульсные усилители

### Тема 6.1 Общие сведения об импульсных усилителях

Импульсные усилители нашли широкое применение в радиотехнических устройствах, в системах автоматики, в приборах экспериментальной физики, в измерительных приборах.

В зависимости от задач на импульсные усилители накладываются различные требования, которым они должны отвечать. Главное из них – сохранение формы усиливаемых сигналов. Поэтому усилители могут различаться между собой как по элементной базе, особенностям схемы, так и по конструкции.

Импульсные усилители имеют очень высокий КПД, малый вес и габариты, низкую стоимость, способны давать огромные мощности без особых проблем.

ИУ предназначены для усиления кратковременных импульсов или импульсных колебаний сложной формы, называемых видеосигналом. Поэтому часто их называют видеоусилителями.

### Тема 6.2 Коррекция АЧХ импульсных усилителей

Широкополосные тракты, предназначенные для усиления гармонических колебаний в широкой области частот с минимальными частотными искажениями, называются широкополосными усилителями (ШУ), а для усиления различного рода импульсных сигналов с минимальными искажениями формы импульсов, – импульсными усилителями (ИУ).

Т.к. от широкополосного тракта желательно иметь возможно большее усиление при достаточно широкой полосе равномерно усиливаемых частот, то для оценки его эффективности вводят понятие площади усиления  $\Pi$  для ШУ и импульсной добротности  $D$  для ИУ:

$$\begin{aligned}\Pi &= K_0 \cdot f_b, \\ D &= K_0 / t_y, \\ \Pi &= 0,35 \cdot D,\end{aligned}$$

где  $f_b$  – верхняя граничная частота, на которой усиление уменьшается по сравнению с усилением на средних частотах  $K_0$  в  $\sqrt{2}$  раз (на 3 дБ);  $t_y$  – время установления амплитуды импульса.

Получить необходимую площадь усиления или импульсную добротность путем перерасчета элементов схемы усилительных каскадов не всегда удается. Для усиления гармонических колебаний или импульсных сигналов в широком спектре частот (от 20 Гц до нескольких десятков МГц), обычно оказывается необходимым применение частотной коррекции как в области ВЧ, так и в области НЧ.

В широкополосных трактах в основном применяются усилительные каскады с резистивно-емкостной связью с ОЭ (на БТ), с ОИ (на ПТ). Специфической особенностью этих каскадов в ШУ и ИУ является наличие дополнительных цепей коррекции, служащих для расширения полосы

равномерно усиливаемых частот или уменьшения искажений формы усиливаемых импульсов.

При наличии ВЧ коррекции площадь усиления  $\Pi_{кор} = K_0 f_{вкор}$  за счет значительного увеличения  $f_{вкор}$  по сравнению с  $f_v$  оказывается больше  $\Pi$ . Отношение  $\Pi_{кор}/\Pi$  характеризует выигрыш, полученный за счет применения коррекции.

Коррекция искажений в области НЧ и ВЧ осуществляется с помощью различных цепей, расчет которых производится независимо. Применение НЧ коррекции позволяет понизить нижнюю граничную частоту  $f_n$  при заданных нормах на частотные искажения в 5-30 раз или во столько же раз уменьшить необходимую емкость разделительного конденсатора в цепи межкаскадной связи. Введение цепей ВЧ коррекции позволяет увеличить усиление каскада в 2-3 раза при заданной высшей граничной частоте  $f_v$  по сравнению с некорректированным усилителем или во столько же раз расширить полосу усиливаемых частот при неизменном усилении. Условия наилучшей коррекции АЧХ, ФЧХ и ПХ не совпадают. Поэтому при расчете усилителей того или иного класса оптимальные параметры корректирующих цепей могут в некоторых пределах варьироваться.

Применяются два, в принципе эквивалентных, метода анализа цепей частотной коррекции: частотный и временной. Частотный метод связан с изучением АЧХ и ФЧХ и удобен при расчете ШУ, предназначенных для усиления гармонических колебаний. При расчете видеоусилителей и в особенности ИУ, предназначенных для усиления прямоугольных импульсов, известные удобства представляет временной метод, поскольку он оперирует величинами, непосредственно описывающими искажения формы прямоугольного импульса. С другой стороны, при достаточно сложных схемах временной метод требует более трудоемких расчетов.

ИУ предназначены для усиления импульсных сигналов. Импульсные сигналы любой формы – сумма постоянной составляющей и гармонических колебаний различных частот. Импульс на выходе усилителя не будет искажаться, только при достаточно широкой полосе пропускания усилителя. Удлинение фронта и выброс является следствием завала частотной характеристики в области верхних частот, а скос вершины – завала в области низких частот. Для устранения искажения импульса вводят корректирующие цепи:

а) низкочастотная коррекция (рисунок 7)- коррекция плоской вершины импульса.

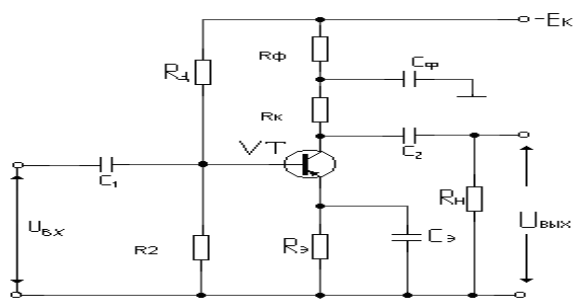


Рисунок 7-Низкочастотная коррекция

Искажение плоской вершины импульса происходит из-за наличия  $C_2$ . При зарядке  $C_2$  на низких частотах ее сопротивление увеличивается

$$X_{C_2} = \frac{1}{2\pi\nu C_2},$$

а следовательно увеличивается падение напряжения на нем, что приводит к снижению  $U_{\text{вых}}$ .

Целью коррекции является увеличение  $K_{\text{ус}}$  по мере уменьшения частоты. Для этого в цепь коллектора включается цепочка  $R_{\phi}C_{\phi}$  и  $C_{\phi}$  выбирается большой для того, чтобы на верхних частотах его сопротивление было маленьким, и оно шунтировало бы  $R_{\phi}$ . В этом случае цепь не оказывает влияние на работу усилителя.

С уменьшением частоты  $X_{C_{\phi}}$  увеличивается и  $C_{\phi}$  уже не шунтирует  $R_{\phi}$  и общее сопротивление  $R_{\phi}X_{C_{\phi}}$  возрастает, а, следовательно, возрастает общее сопротивление коллекторной нагрузки  $(R_k + R_{\phi})$ , а вместе с тем увеличивается и напряжение  $U_{\text{вых}}$ , что приводит к увеличению  $K_{\text{ус}}$ .

В этом случае увеличивается полоса пропускания за счет низких частот и устраняется скос плоской вершины импульса.

б) Высокочастотная коррекция (рисунок 8) – коррекция фронта импульса.

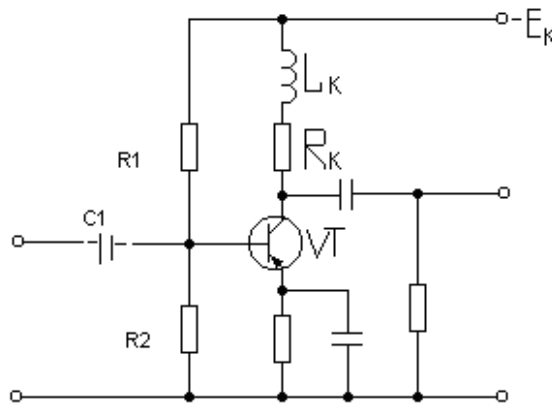


Рисунок 8-. Высокочастотная коррекция

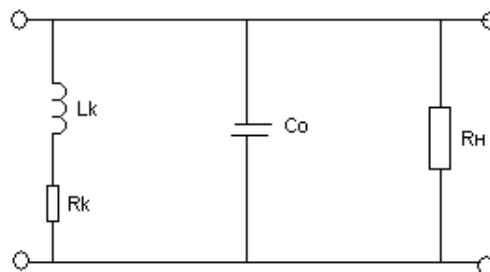


Рисунок 9- Схема замещения высокочастотной коррекции

Корректирующая индуктивность  $L_k$  выбирается маленькой, чтобы на НЧ и СЧ

$$Lk = 2\pi\nu L_k$$

было мало и не оказывало влияния на работу цепи. Емкость

$$C_0 = C_n + C_m + C_{вых}$$

образует с  $R_k$  и  $L_k$  параллельный резонансный контур, где  $C_n$  - емкость нагрузки;  $C_m$  - емкость монтажа;  $C_{вых}$  - выходная емкость транзистора (рисунок 9).

При высокой частоте контур находится вблизи резонанса и сопротивление его возрастает. Возрастает  $U_{вых}$  и  $K_{ус}$ , расширяется полоса пропускания за счет  $V_{вч}$ .

Усилители постоянного тока (УПТ). УПТ называют усилитель, предназначенный для усиления постоянных и медленно изменяющихся электрических сигналов. Схема УПТ представлена на рисунке 10.

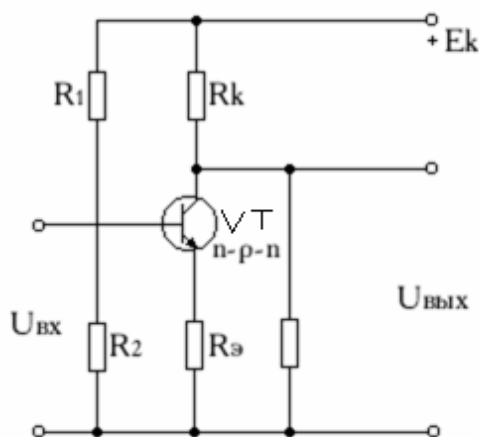


Рисунок 10-Схема УПТ

АЧХ усилителя постоянного тока представлена на рисунке 11.

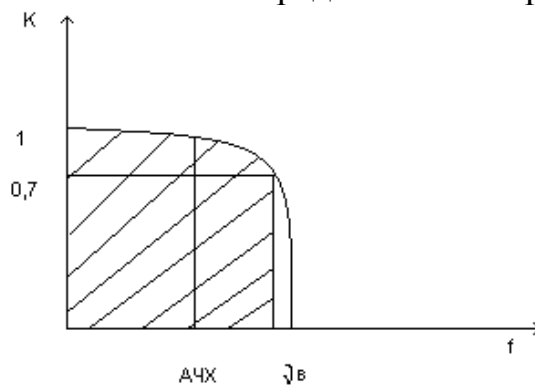


Рисунок 11- АЧХ для УПТ

Полоса пропускания частот УПТ должна иметь нижнюю границу  $\nu_n = 0$ . В схеме УПТ не должно быть конденсаторов (между каскадами, а также блокировочных и разделительных). При  $U_{вх} = 0, U_{вых} = 0$ . В УПТ  $U_{вых}$  может самопроизвольно изменяться независимо. Это называют дрейфом нуля усилителя. Дрейф нуля искажает усиливаемые сигналы и нарушает работу цепи. Причиной является температурная и временная нестабильность элементов.

## Раздел 7 Генераторы гармонических колебаний

### Тема 7.1 Общие сведения о генераторах

Электронным генератором называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию незатухающих колебаний требуемой формы частоты и мощности.

Различают RC и LC-генераторы гармонических колебаний. В зависимости от генерируемых частот:

- низкочастотные  $0,01 \dots 100 \text{ кГц}$
- высокочастотные  $0,1 \dots 100 \text{ МГц}$
- сверхвысокочастотные выше  $100 \text{ МГц}$ .

Применяются в измерительных и регулирующих устройствах, устройствах питания технологических установок, в качестве задающих генераторов.

### Тема 7.2 LC-генераторы

Колебательный LC-контур включается между выходом ОУ и неинвертирующим входом, обеспечивая нужную ПОС. В цепь ООС для стабилизации амплитуды генерируемых колебаний включают терморезистор R с отрицательным ТКР.

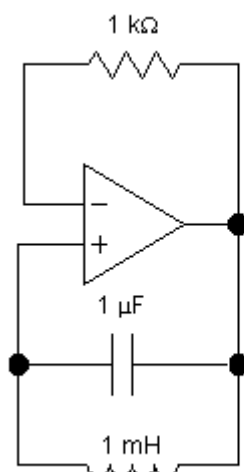


Рисунок 12-LC-автогенератор синусоидальных напряжений на ОУ

Увеличение амплитуды колебаний вызывает уменьшение сопротивления терморезистора. При этом увеличивается глубина ООС, приводящая к уменьшению амплитуды колебаний.

### Тема 7.3 RC-генераторы

RC-генераторы применяют на НЧ ( $< 50 \text{ кГц}$ ). LC-генераторы не используют так как увеличиваются размеры катушек и конденсаторов и уменьшается стабильность их параметров.

Частотно-зависимыми четырехполюсниками, используемыми в RC-генераторах, являются Г-образные RC-цепи, двойная Г-образная цепь, мост

Вина, Т-образные мосты RC и двойной Т-образный мост. Наибольшее применение в RC-генераторах нашел мост Вина.

На рисунке 13 приведена простейшая схема RC-генератора. В точке А выходное напряжения является противофазным входному напряжению. Поэтому для организации ПОС необходимо фазу выходного напряжения повернуть на  $180^\circ$ . Одна RC-цепочка поворачивает фазу не более чем на  $90^\circ$  (чаще на  $60^\circ$ ). Т. о. 3 RC-цепочки поворачивают фазу на  $180^\circ$ .

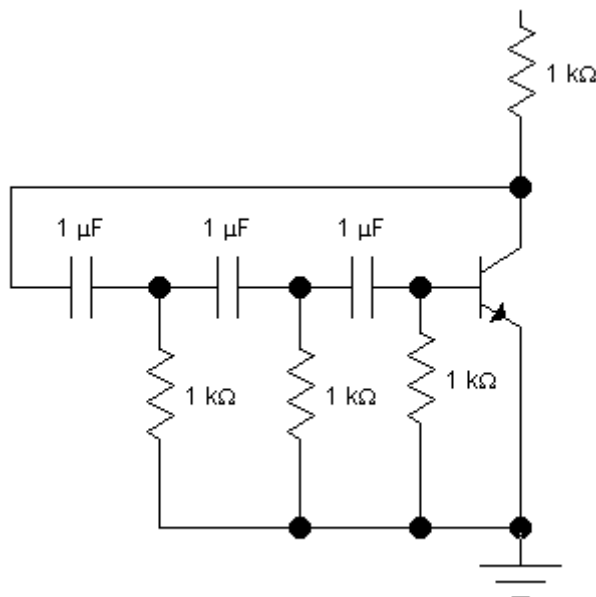


Рисунок 13- Схема транзисторного RC-генератора.

#### **Тема 7.4 Стабилизация частоты автогенераторов гармонических колебаний**

На частоту генерируемых колебаний автогенератора существенное влияние оказывают зависимости емкости конденсатора и индуктивности катушки колебательного контура и параметров усилителя от температуры окружающей среды, напряжения источника питания, атмосферного давления, влажности, нагрузки, а также зависимость емкости конденсатора и индуктивности катушки колебательного контура.

## **Практический материал**

Методические указания  
для проведения лабораторных и практических работ

# Лабораторная работа №1

## Исследование усилительного каскада с общим эмиттером

**Цель работы:** Исследование характеристик и параметров усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схемах: с общим эмиттером (ОЭ) и отрицательной обратной связью по току (ООС). Анализ усилительных свойств каскада

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### *1 Краткие теоретические сведения*

#### Основные характеристики усилителей

Усилитель - это устройство, предназначенное для усиления мощности входного сигнала за счет потребления энергии источников питания.

В зависимости от схемы включения биполярного транзистора усилители делятся на: усилители с ОЭ, ОК, ОБ. К основным параметрам усилителей относятся:

- коэффициент усиления по:

напряжению 
$$K_u = U_{вых}/U_{вх}, \quad (1.1)$$

току 
$$K_i = I_{вых}/I_{вх}, \quad (1.2)$$

мощности 
$$K_p = P_{вых}/P_{вх}, \quad (1.3)$$

-входное сопротивление между входными зажимами усилителя для переменного входного тока

$$R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}, \quad (1.4)$$

-выходное сопротивление - сопротивление между выходными зажимами усилителя для переменного тока при отключенном сопротивлении нагрузки

$$R_{вых} = U_{вых}/I_{вых},$$

-коэффициент полезного действия усилителя - отношение мощности, поступающей в нагрузку, к мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = P_n/P_p. \quad (1.5)$$



К основным характеристикам усилителя также относятся амплитуднофазочастотная (АФЧХ) и амплитудная (АХ) характеристики. В общем случае коэффициент усиления по напряжению и току является величиной комплексной, характеризующейся модулем и фазой, которые зависят от частоты усиливаемого сигнала.

Из-за наличия в схеме усилителя реактивных элементов и зависимости свойств транзистора от частоты коэффициент усиления усилителя имеет различные значения на различных частотах. Это явление называется частотными искажениями усилителя. Для их оценки вводится параметр, называемый коэффициентом частотных искажений  $M(\omega)$ , равный отношению коэффициента усиления на данной частоте  $K_u(\omega)$  к коэффициенту усиления на средних частотах  $K_{uo}$ :

$$M(\omega) = K_u(\omega)/K_{uo}. \quad (1.6)$$

Частоты, на которых коэффициент усиления достигает предельно допустимого (граничного) значения

$$K_u(\omega)_{gr} = K_{uo}/\sqrt{2} = 0,707 * K_{uo}, \quad (1.7)$$

называется верхней  $\omega_{в.гр}$  и нижней  $\omega_{н.гр}$  граничными частотами (частотами среза), а разность  $\omega = \omega_{в.гр} - \omega_{н.гр}$  – полосой пропускания усилителя.

Амплитудная характеристика усилителя - это зависимость амплитуды выходного сигнала  $U_{выхm}$  от амплитуды входного сигнала  $U_{вхm}$  на некоторой постоянной частоте.

Амплитудная характеристика идеального усилителя представляет прямую линию, проходящую через начало координат, а амплитудная характеристика реального усилителя совпадает с характеристикой идеального только на некотором участке. При больших входных сигналах  $U_{вхm} > U_{вхmmax}$  выходное напряжение усилителя перестает возрастать. Это связано с тем, что рабочая точка транзистора попадает в область насыщения или отсечки. При этом выходной сигнал искажается. Это явление называется нелинейными искажениями и оценивается коэффициентом гармоник:

$$K_g = \sqrt{EP_n / P}, \quad (1.8)$$

где  $P_n$  - мощность n-й гармонической составляющей выходного сигнала,  
 $P_1$  - мощность первой гармоники.

Если нагрузка усилителя активная, то коэффициент гармоник принимает вид:

$$K_g = \sqrt{EU^2_{nm} / U^2_{1m}} = \sqrt{EI^2_{nm} / I^2_{1m}} \quad (1.9)$$

При малых входных сигналах

$$U_{вхт} < U_{вхтmin} \quad (1.10)$$

выходное напряжение усилителя остается практически постоянным и равным  $U_{выхтmin}$ . Напряжение  $U_{вхтmin}$  называется напряжением собственных шумов усилителя. Собственные шумы усилителя обусловлены различными помехами и наводками, а также непостоянством электрических процессов во времени. Отношение

$$U_{вхтmax}/U_{вхтmin} = D \quad (1.11)$$

называется динамическим диапазоном усилителя.

### Усилительный каскад на БТ с ОЭ.

Наиболее распространенная схема усилительного каскада на транзисторе с ОЭ показана на рисунке 1.

Входное усиливаемое переменное напряжение  $u_{вх}$  подводится ко входу усилителя через разделительный конденсатор  $C_{p1}$ . Конденсатор  $C_{p1}$  разделяет источник входного сигнала и базовый вход усилителя по постоянному току, чтобы исключить нарушение начального режима работы транзистора  $V_1$ . Усиленное переменное напряжение, выделяемое на коллекторе транзистора  $V_1$ , подводится к внешней нагрузке с сопротивлением  $R_n$  через разделительный конденсатор  $C_{p2}$ . Этот конденсатор служит для разделения выходной (коллекторной) цепи транзистора и внешней нагрузки по постоянной составляющей коллекторного тока  $I_{ок}$ . Значение  $I_{ок}$  и других постоянных составляющих токов и напряжений в цепях транзистора зависят от режима работы по постоянному току (положения рабочей точки на нагрузочной прямой).

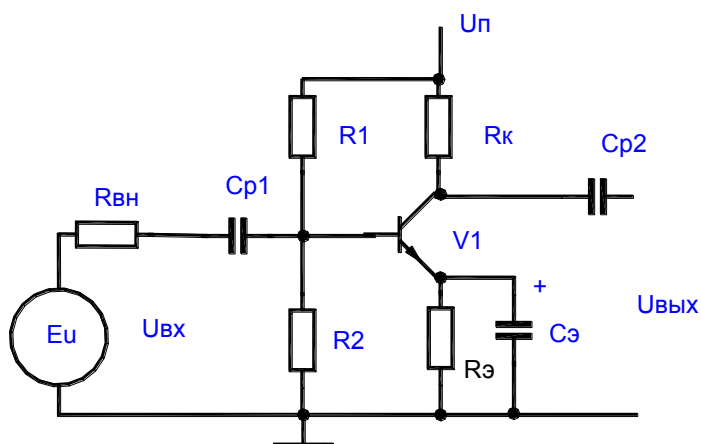


Рисунок 1- Схема усилителя на БТ с ОЭ

Положение рабочей точки, т.е. значение начального тока базы  $I_{об}$  задается делителем  $R_1$ ,  $R_2$ . При отсутствии входного переменного сигнала в цепи коллектора протекает постоянный ток  $I_{ок}$ , значение которого определяется из выражения:

$$U_{окэ} + I_{ок} * R_k + I_{оэ} * R_э = U_{окэ} + I_{ок}(R_k + R_э) = E_k, \quad (1.12)$$

где  $R_k$  - сопротивление в цепи коллектора,

$R_э$  - сопротивление в цепи эмиттера.

Решив это уравнение относительно тока  $I_{ок}$ , получим динамическую характеристику транзистора по постоянному току

$$I_{ок} = E_k / (R_k + R_э) - U_{окэ} / (R_k + R_э). \quad (1.13)$$

Это выражение представляет собой уравнение прямой линии, проходящей через точки с координатами:  $E_k, 0$ ;  $0, E_k / R_{кэ}$ , изображенными на выходных характеристиках транзистора.

Усилительные каскады могут работать в одном из режимов: А, В, С, АВ, определяемых начальным положением рабочей точки при отсутствии входного переменного сигнала. При работе транзистора в активном (усилительном) режиме (класс А) начальное положение рабочей точки должно быть таким, чтобы ток через активный элемент транзистора протекал в течение всего периода изменения входного сигнала, а амплитудное значение выходного тока  $I_{км}$  не превышало начального тока  $I_{ок}$ . Начальное положение рабочей точки обеспечивается делителем напряжения  $R_1$ ,  $R_2$ , значения которых определяется соотношениями:

$$R_1 = (E_k - U_{обэ} - U_{рэ}) / (I_{дел} + I_{об}); \quad (1.14)$$

$$R_2 = (U_{обэ} + U_{рэ}) / I_{дел}, \quad (1.15)$$

где  $I_{дел} = (2...5)I_{об}$  - ток в цепи делителя,

$U_{рэ} = (0,1...0,25)E_k$  - для каскадов предварительного усиления.

При обеспечении режима работы транзистора необходимо осуществить температурную стабилизацию положения рабочей точки. С этой целью в эмиттерную цепь введен резистор  $R_э$ , на котором создается напряжение отрицательной обратной связи ООС по постоянному току  $U_{рэ}$ . Для устранения ООС по переменному току при наличии входного переменного сигнала резистор  $R_э$  шунтируют конденсатором  $C_э$ , сопротивление которого на частоте усиливаемого сигнала должно быть незначительным.

Аналитический расчет коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности, а также входного и выходного сопротивлений производится по эквивалентным схемам усилительного каскада для различных диапазонов частоты входного сигнала.

## 2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить принцип работы схем усилительных каскадов на БТ с ОЭ.
- 2 Изучить порядок расчета схем усилительных каскадов БТ с ОЭ.
- 3 По известным элементам схемы усилителей рассчитать величину сопротивления  $R_{23}$  с учетом наименьших нелинейных искажений.
- 4 Рассчитать значения основных параметров для названных схем включения усилителей  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ , работающих в области средних частот ( $f = 1000 \text{ Гц}$ ).
- 5 Нарисовать схемы исследуемых усилительных каскадов.
- 6 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.
- 7 Собрать схемы источника питания и генератора синусоидальных колебаний (см. рисунок 2). Выставить заданное преподавателем напряжение питания усилительных каскадов.

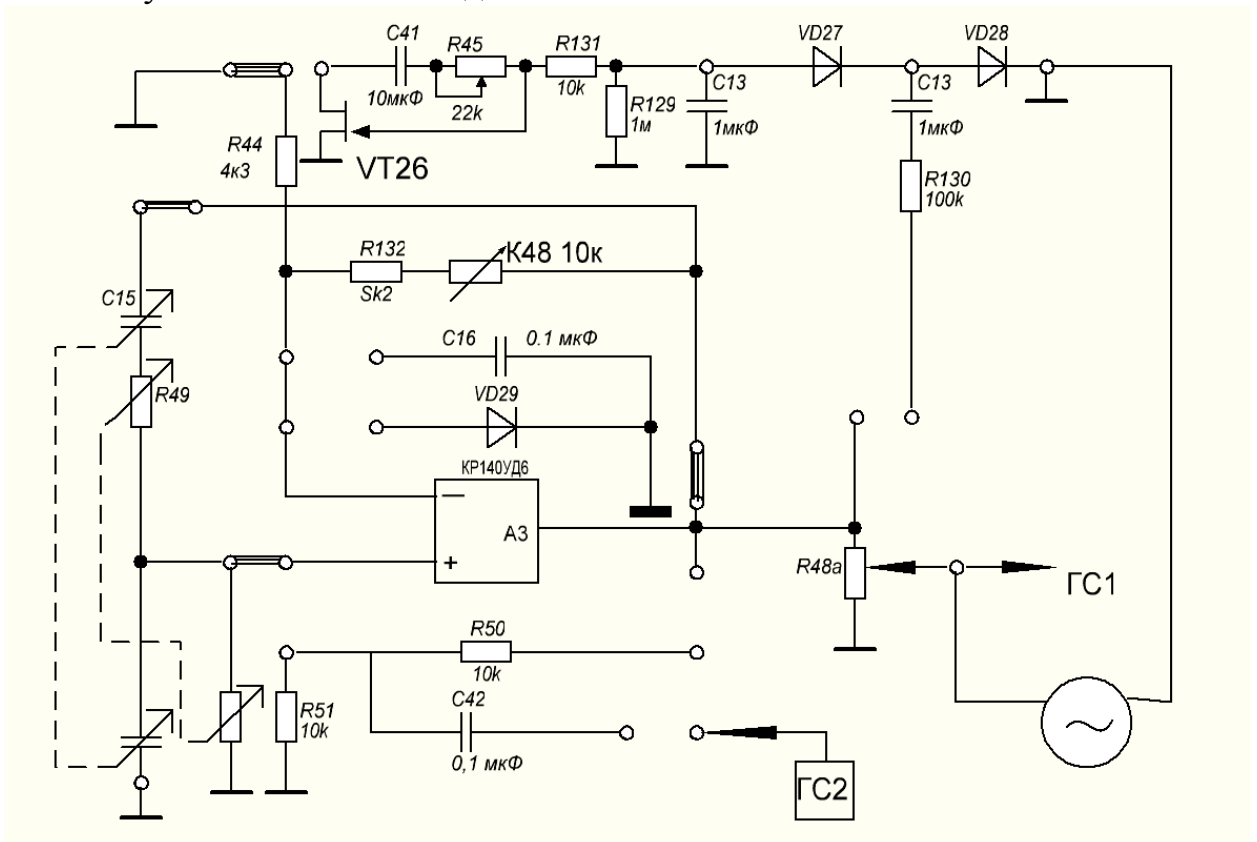


Рисунок 2- Схема генератора синусоидальных колебаний

8 Собрать схему усилителя без шунтирующего конденсатора в цепи эмиттера, на основе схемы на рисунке 3, установив рассчитанное значение резистора  $R_{23}$ .

9 Подать на вход усилителя от генератора  $ГС1$  синусоидальный сигнал частотой  $f = 1 \text{ кГц}$  и амплитудой  $U_{вхт} = 0,05 \text{ В}$ . Замерить с помощью осциллографа амплитуду выходного сигнала  $U_{выхт}$  и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.

Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению, току и мощности.

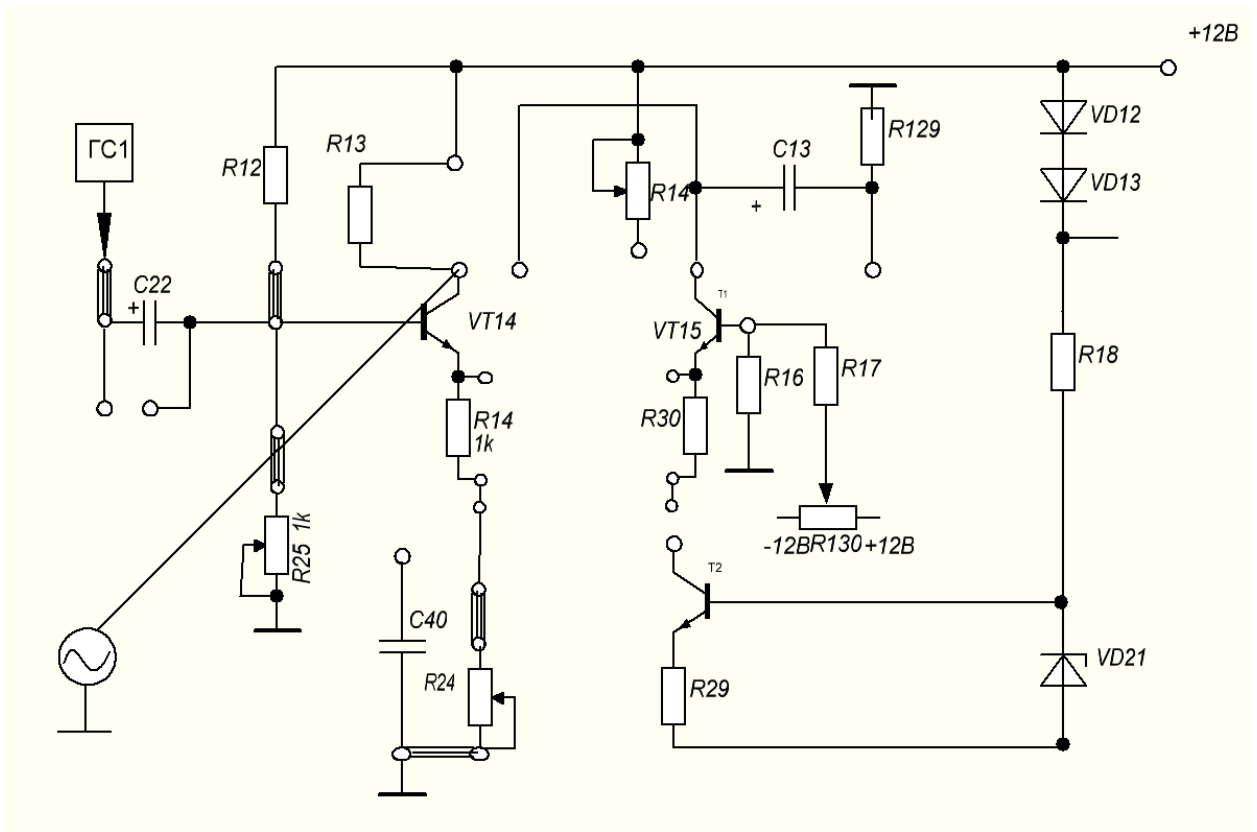


Рисунок 3- Схема усилителя без шунтирующего конденсатора в цепи эмиттера

10 Изменяя величину сопротивления R23 по осциллографу определить момент появления в выходном сигнале больших нелинейных искажений и зарисовать осциллограмму этого напряжения.

11 Изменяя амплитуду входного сигнала снять амплитудную характеристику усилителя и построить ее. Данные занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1- Результаты эксперимента

$U_{вх}, В$

$U_{вых}, В$

12 Включить емкость в цепь эмиттера и выполнить операции п.п. 9 и 10.

### **3 Содержание отчета**

1 Тема, цель работы, схема усилителя без шунтирующего конденсатора в цепи эмиттера (рисунок 3).

2 Осциллограммы входного и выходного напряжений.

3 Расчет коэффициента усиления каскада по напряжению, току и мощности.

4 Осциллограммы выходного сигнала с большими нелинейными искажениями.

5 Таблица 1.1

6 Осциллограммы входного и выходного напряжений для схемы с емкостью в цепи эмиттера.

7 Расчет коэффициента усиления каскада по напряжению, току и мощности для схемы с емкостью в цепи эмиттера.

8 Осциллограммы выходного сигнала с большими нелинейными искажениями для схемы с емкостью в цепи эмиттера.

9 Выводы по работе.

#### **4 Контрольные вопросы**

1 Определить по принципиальной схеме усилительного каскада способ включения транзистора.

2 Сравните усилители с ОЭ, ОК, ОБ по коэффициентам усиления  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_p$ .

3 Поясните, в каком усилителе осуществляется усиление по напряжению и по мощности.

4 Поясните, в каком усилителе осуществляется усиление по току и по мощности.

5 Поясните, какой усилитель обеспечивает максимальное усиление по мощности и почему.

6 Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК по значениям  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ . Чем обусловлено их различие?

7 Сравните частотные свойства каскадов с ОЭ, ОБ, ОК и объясните причины различия.

8 Объясните назначения отдельных компонентов схем усилителей с ОЭ, ОБ, ОК.

9 Поясните как зависит  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ ,  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$  усилителя с ОЭ от значений электрических параметров отдельных компонентов схемы.

10 Поясните когда следует применять усилительные каскады, включенные по схеме с ОЭ, ОБ, ОК.

11 Назовите способы задания режима работы транзистора в усилительных каскадах.

12 Поясните как построить нагрузочную линию транзистора по постоянному и переменному току

13 Объясните влияние температуры на режим работы усилительных каскадов.

14 Назовите способы температурной стабилизации режима работы усилительных каскадов?

## Лабораторная работа №2

### Исследование усилительного каскада с общим коллектором

**Цель работы:** Исследование характеристик и параметров усилительных каскадов на биполярных транзисторах в схеме с общим коллектором (ОК). Анализ усилительных свойств каскада.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

#### 1 Краткие теоретические сведения

Эмиттерный повторитель (ЭП) представляет собой усилитель тока и мощности, выполненный на транзисторе по схеме с ОК. Его схема представлена на рисунке 1.

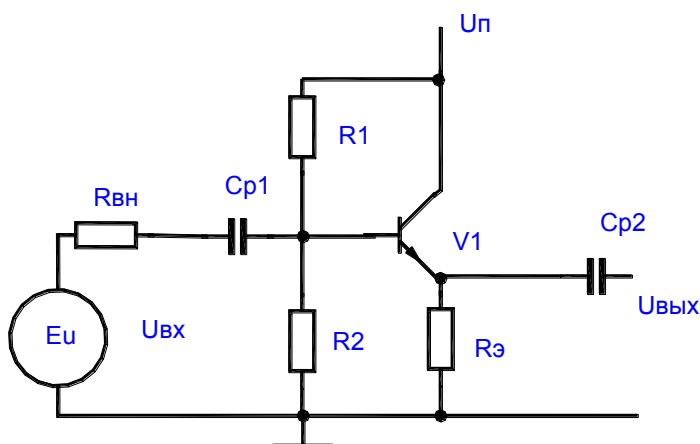


Рисунок 1- Усилительный каскад на БТ с общим коллектором (эмиттерный повторитель)

Сопротивление нагрузки включается в эмиттерную цепь транзистора. ЭП обладает повышенным входным и пониженным выходным сопротивлениями. Его входное и выходное напряжения совпадают по фазе и незначительно отличаются по величине. Отмеченные свойства ЭП позволяют использовать его для согласования высокоомного источника напряжения с низкоомной нагрузкой.

ЭП можно рассматривать как усилительный каскад с ОЭ, у которого  $R_k = 0$ , а резистор в цепи эмиттера не зашунтирован конденсатором Сэ. В этом случае все выходное напряжение, выделяемое на сопротивлении в цепи эмиттера, последовательно вводится во входную цепь усилителя, где вычитается из напряжения входного сигнала  $u_{вх}$ , снижая его. В схеме действует 100% последовательная отрицательная обратная связь по напряжению.

Коэффициент усиления по напряжению ЭП

$$K_u = u_{вых}/u_{вх} = (I_э * R_э)/(I_б * R_{вх}). \quad (2.1)$$

Коэффициент усиления по току в схеме ЭП без учета  $R_H$  (холостой ход)

$$K_i = I_э/I_б = 1 + \beta. \quad (2.2)$$

## 2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить принцип работы схем усилительных каскадов на БТ с ОК.
- 2 Изучить порядок расчета схем усилительных каскадов БТ с ОК.
- 3 По известным элементам схемы усилителей рассчитать величину сопротивления  $R_{23}$  с учетом наименьших нелинейных искажений.
- 4 Рассчитать значения параметров  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$  для эмиттерного повторителя, работающего в области средних частот ( $f = 1000 \text{ Гц}$ ).
- 5 Нарисовать схему ЭП.
- 6 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.
- 7 Собрать схемы источника питания и генератора синусоидальных колебаний (рисунок 2). Выставить заданное преподавателем напряжение питания усилительных каскадов.

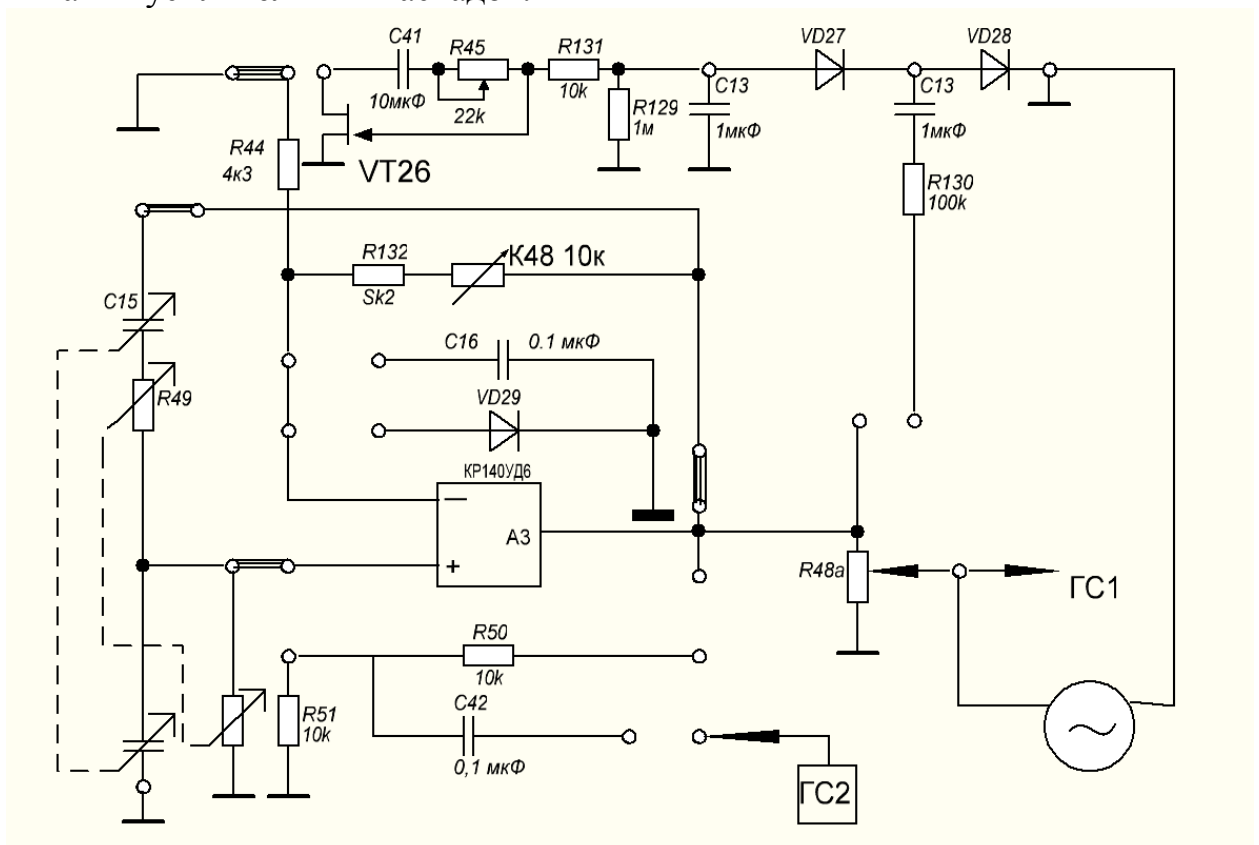


Рисунок 2- Схема генератора синусоидальных колебаний

- 8 Собрать схему ЭП (рисунок 3).



9 Подать на вход усилителя от генератора ГС1 синусоидальный сигнал частой  $f = 1кГц$  и амплитудой  $U_{вхт} = 0,05В$ . Замерить с помощью осциллографа амплитуду выходного сигнала  $U_{выхт}$  и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.

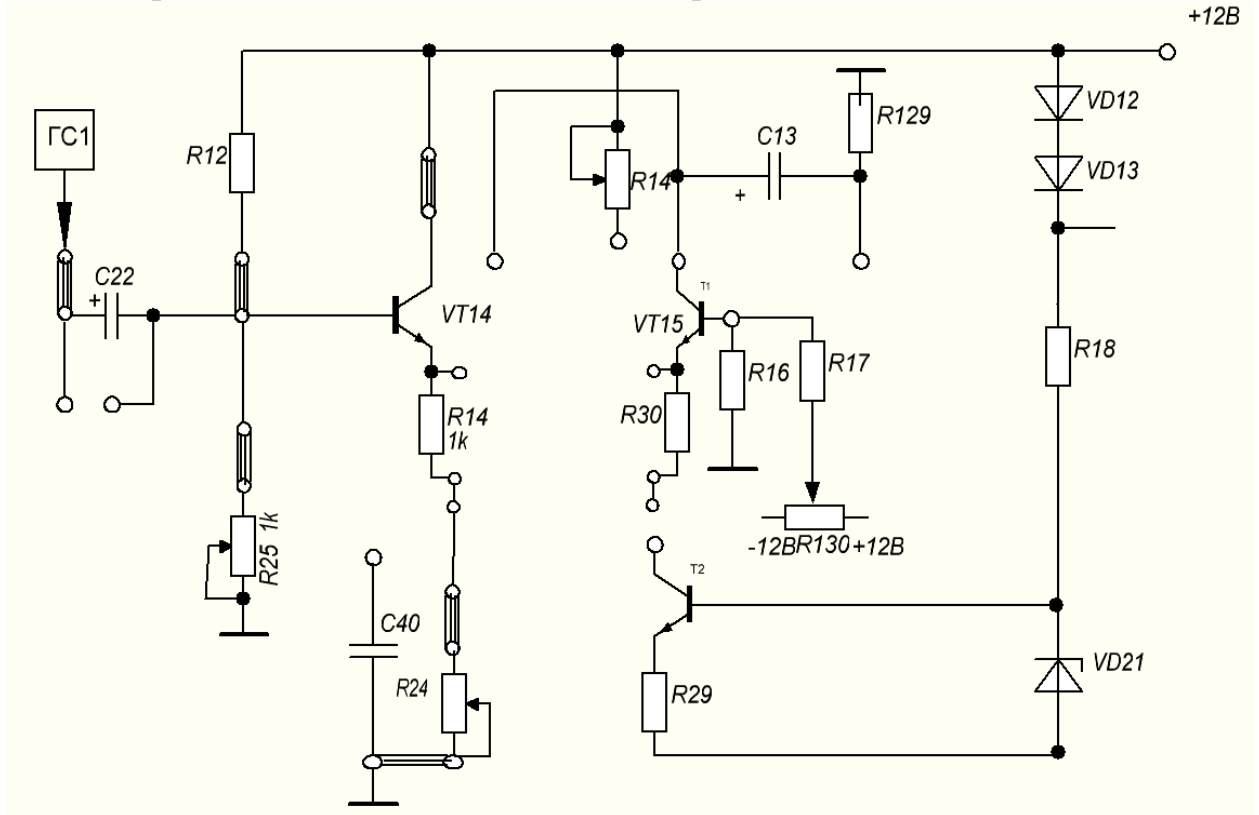


Рисунок 3- Схема эмиттерного повторителя

10 Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению, току и мощности.

11 Определить  $U_{вых\max}$  в момент появления существенных нелинейных искажений и зарисовать осциллограмму этого напряжения.

12 Сравнить результаты теоретических расчетов и практических исследований, сформулировать выводы по каждому пункту рабочего задания.

### 3 Содержание отчета

1 Тема, цель работы, расчет сопротивления R23 с учетом наименьших нелинейных искажений.

2 Расчет значений основных параметров  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$  ЭП, работающего в области средних частот ( $f = 1000 Гц$ ).

3 Схема ЭП.

4 Осциллограммы входного и выходного напряжений ЭП.

5 Расчет коэффициентов усиления ЭП по напряжению, току и мощности.

6 Осциллограмма выходного напряжения ЭП в момент появления существенных нелинейных искажений.

7 Выводы по каждому пункту рабочего задания.

#### **4 Контрольные вопросы**

- 1 Определить по принципиальной схеме усилительного каскада способ включения транзистора.
- 2 Сравните усилители с ОЭ, ОК, ОБ по коэффициентам усиления  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_p$ .
- 3 Поясните, в каком усилителе осуществляется усиление по напряжению и по мощности.
- 4 Поясните, в каком усилителе осуществляется усиление по току и по мощности.
- 5 Поясните, какой усилитель обеспечивает максимальное усиление по мощности и почему.
- 6 Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК по значениям  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ . Объясните, чем обусловлено их различие.
- 7 Сравните частотные свойства каскадов с ОЭ, ОБ, ОК и объясните причины различия.
- 8 Объясните назначения отдельных компонентов схем усилителей с ОЭ, ОБ, ОК.
- 9 Поясните как зависят  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ ,  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $K_p$  усилителя с ОЭ от значений электрических параметров. Рисунок 2- Схема источника питания и генератора
- 10 Поясните ко синусоидальных колебаний включенные по схеме с ОЭ, ОБ, ОК?
- 11 Назовите способы задания режима работы транзистора в усилительных каскадах.
- 12 Поясните как построить нагрузочную линию транзистора по постоянному и переменному току
- 13 Объясните влияние температуры на режим работы усилительных каскадов.
- 14 Назовите способы температурной стабилизации режима работы усилительных каскадов.

## Лабораторная работа №3 Исследование двухкаскадного усилителя с RC-связью

**Цель работы:** Исследование характеристик и параметров двухкаскадного усилителя с RC-связью.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### **1 Краткие теоретические сведения**

Однокаскадные усилители имеют, как правило, коэффициент усиления порядка нескольких десятков или сотен единиц. Однако, в реальных устройствах промышленной электроники требуются гораздо большее усиление входного сигнала. В этих случаях используются многокаскадные усилители. Как правило, на выходе усилительного устройства монтируется усилитель мощности. Первый каскад является эмиттерным (или истоковым) повторителем, позволяющим согласовать источник сигнала с входным сопротивлением усилителя напряжения.

Приведенный на рисунке 1 усилитель напряжения состоит из 2-х идентичных каскадов, представляющих собой усилители на биполярных транзисторах с коллекторной нагрузкой. В качестве связующего элемента используется конденсатор связи  $C_2$ , предотвращающий появление уравнивающего тока между каскадами. Для переменной составляющей этот конденсатор имеет низкое сопротивление.

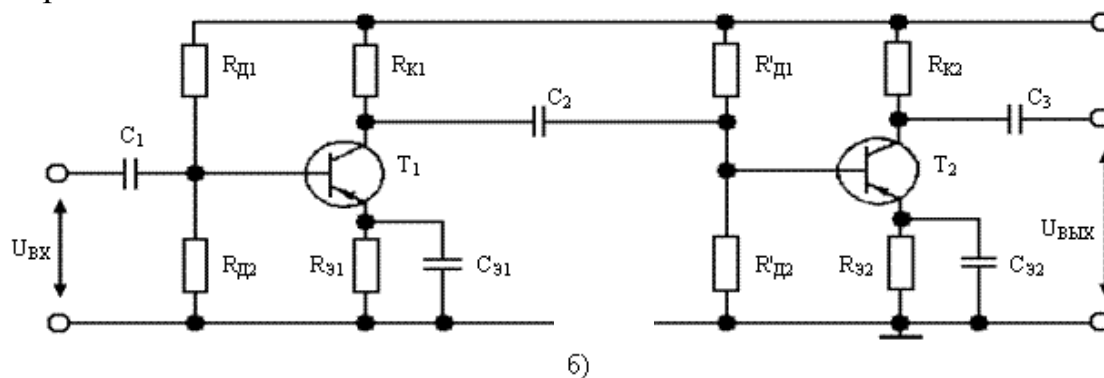


Рисунок 1- Двухкаскадный усилитель

Входное устройство служит для передачи сигнала от источника во входную цепь каскада предварительного усиления. В качестве входного устройства могут быть использованы конденсаторы, резисторы, трансформаторы. Так, например, входными устройствами на рис. 2.20, б являются конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ . Конденсатор  $C_1$  включают, чтобы исключить прохождение постоянной составляющей тока и напряжения

смещения первого активного элемента в источник сигнала, а также чтобы постоянная составляющая тока от источника сигнала не поступала на вход активного элемента. Конденсатор  $C2$  – входное устройство для второго каскада, он осуществляет связь каскадов.

Напряжение, усиленное первым каскадом на  $VT1$  снимается с коллектора этого транзистора и передается через разделительный конденсатор (конденсатор связи)  $Cp2$  на вход второго каскада на  $VT2$ . Нагрузкой первого каскада является входное сопротивление второго каскада.

Выходное устройство необходимо для передачи сигнала из выходной цепи последнего усилителя в нагрузку. В качестве выходного устройства используют трансформаторы, конденсаторы и резисторы. На рис. 2.20, б выходным устройством является конденсатор  $C3$ . Конденсаторы и резисторы используют для разделения постоянных составляющих тока и напряжения выходной цепи усилителя и нагрузки.

Межкаскадные связи служат для передачи сигнала от источника сигнала на вход первого усилителя, от выхода одного каскада на вход другого и от выходной цепи последнего усилителя на нагрузку, осуществляя функции разделительных элементов.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Исследование усилителя без ОС ( $SA2$  ниже,  $SA1$  ниже). Зарисовать схему усилителя (рисунок 2).

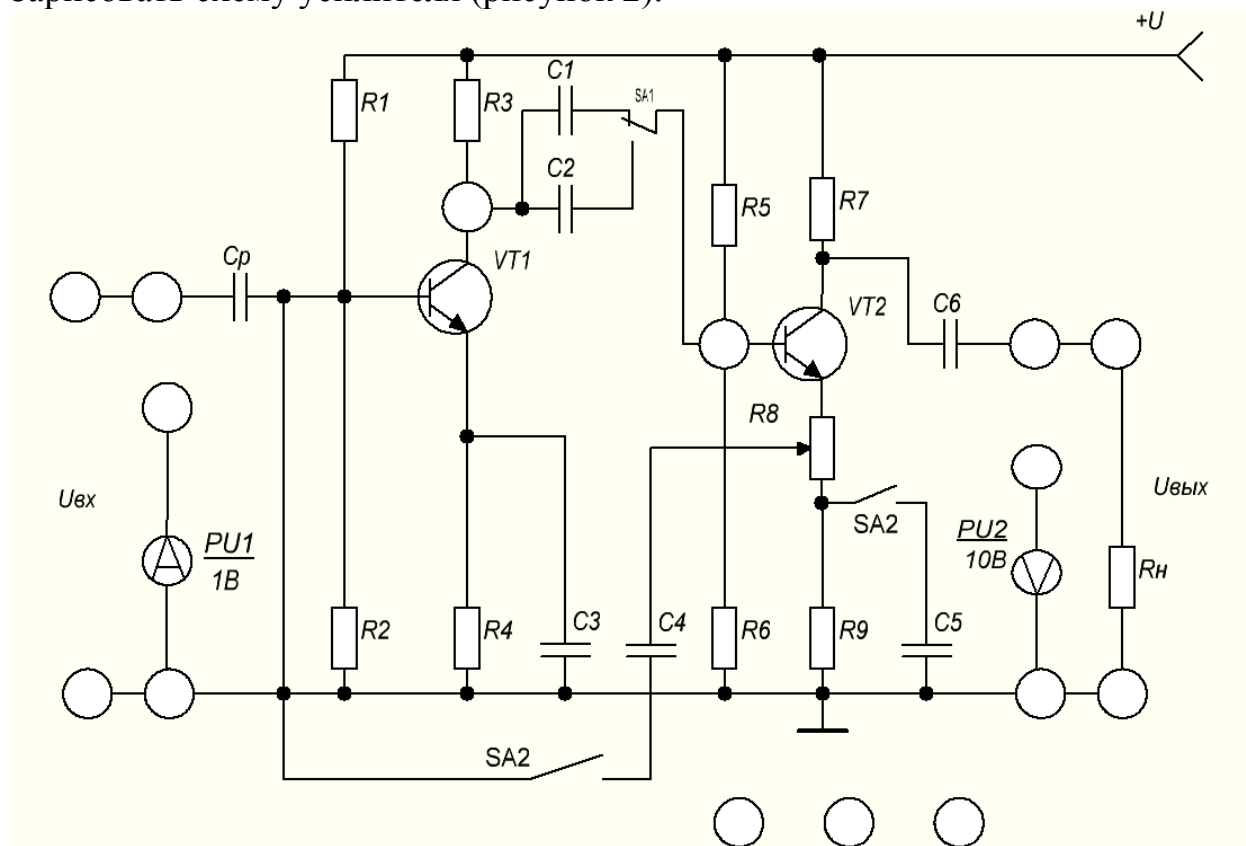


Рисунок 2-Двухкаскадный усилитель

2 Подать на вход усилителя  $U_{ген}=10\text{мВ}$ ,  $f=5\text{кГц}$ .

3 Изменяя напряжение на генераторе измерить с помощью осциллографа  $U_{вых1}$ ,  $U_{вых2}$  и  $U_{общ}$ . Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1- Измеренные данные

№	$U_{вх}$ , мВ	Без обратной связи						С обратной связью					
		$U_{вых1}$ мВ	$U_{вх2}$ мВ	$U_{вых2}$ мВ	$K_1$	$K_2$	$K_{общ}$	$U_{вых1}$ мВ	$U_{вх2}$ мВ	$U_{вых2}$ мВ	$K_1$	$K_2$	$K_{общ}$
1													
2													
3													
4													
5													

4 По полученным результатам построить графики:  $U_{вых1}=f(U_{вх1})$ ,  $U_{вых2}=f(U_{вх2})$ ,  $U_{общ}=f(U_{вх})$ .

5 По графикам рассчитать коэффициенты усиления и результаты записать в таблицу 1.

Коэффициент усиления первого каскада:

$$K_1 = \Delta U_{вых1} / \Delta U_{вх} \quad (3.1)$$

Коэффициент усиления второго каскада:

$$K_2 = \Delta U_{вых2} / \Delta U_{вх} \quad (3.2)$$

Общий коэффициент усиления:

$$K_{общ} = \Delta U_{общ} / \Delta U_{вх} \quad (3.3)$$

6 Исследование усилителя с ОС (SA2 верхнее, SA1 нижнее).

7 Исследование проводить аналогично пунктам 2-5.

### 3 Содержание отчета

1 Тема, цель работы, схема (рисунок 2).

2 Таблица 1.

3 Расчет  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_{общ}$  для усилителя без ОС.

4 Амплитудные характеристики для усилителя без ОС.

5 Расчет  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_{общ}$  для усилителя с ОС.

6 Амплитудные характеристики для усилителя с ОС.

7 Выводы по работе.

### 4 Контрольные вопросы

1 Поясните как определить общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя.

2 Поясните, что представляет собой обратная связь. Назовите виды обратных связей, применяемых в усилителях.

3 Поясните, как влияет обратная связь на параметры усилителя.

4 Объясните назначение разделительного конденсатора.

## **Лабораторная работа №4**

### **Исследование двухтактного усилителя мощности**

**Цель работы:** исследование основных параметров и характеристики двухтактных усилителей мощности.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

#### ***1 Краткие теоретические сведения***

Усилителями мощности называют выходные (оконечные) усилительные каскады, предназначенные для передачи потребителю указанной или максимально возможной мощности при заданных сопротивлениях нагрузки  $R_n$ , высоком к.п.д. и допустимых уровнях частотных и нелинейных искажений. Выходные каскады, как правило, работают в режиме усиления больших сигналов и их важнейшими показателями являются: отдаваемая в нагрузку мощность, к.п.д., уровень нелинейных искажений. Уровень нелинейных искажений и к.п.д. усилителя существенно зависят от начального положения рабочей точки, поэтому необходимо строго соблюдать режим работы усилителя по постоянному току. Уровень нелинейных искажений оценивается коэффициентом гармоник  $K_g$ .

Выходные каскады проектируют в одно- и двухтактном исполнении. Однотактные каскады обычно работают в режиме класса А, двухтактные - в режиме класса В или АВ.

На практике наибольшее распространение получили двухтактные бестрансформаторные усилительные каскады, работающие в режиме В. Их достоинством является высокий к.п.д. и возможность получения большого коэффициента усиления по мощности. Существенное уменьшение нелинейных искажений в этих усилителях обеспечивается путем исключения начального участка входной характеристики. Поэтому усилитель работает в режиме класса АВ, близкого к классу В.

В этих усилителях используют сочетание в одном каскаде либо однотипных, либо разнотипных транзисторов р-п-р и п-р-п типов, включенных по схеме с ОК. Каскады, в которых использованы транзисторы р-п-р и п-р-п типов, носят название каскадов с дополнительной симметрией. Одна из возможных схем усилительного каскада с дополнительной симметрией показана на рисунке 1.

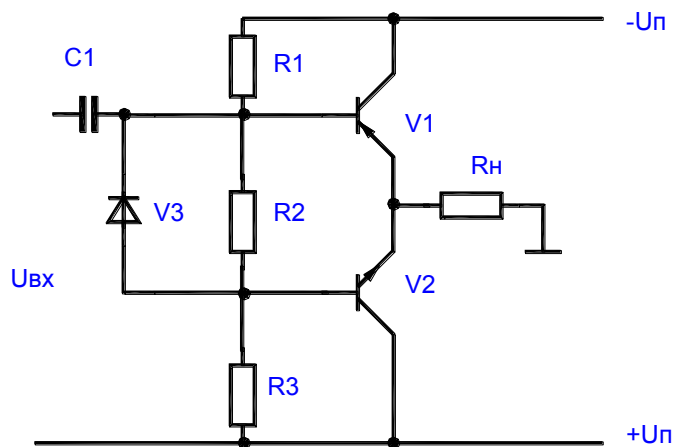


Рисунок 1-Каскад с дополнительной симметрией

Как видно из рисунка, такие выходные каскады имеют последовательное питание и параллельное включение нагрузки. При отсутствии входного сигнала ток в сопротивлении  $R_n$  практически отсутствует, поскольку небольшие начальные токи, протекавшие через транзисторы  $V_1$  и  $V_2$ , в нем взаимно вычитаются. Эти токи обусловлены смещением, созданным падением напряжения на  $R_2$ :

$$U_{R2} = I_{дел} * R_2, \quad (4.1)$$

$$I_{дел} = 2 * U_n / (R_1 + R_2 + R_3). \quad (4.2)$$

Если транзисторы  $V_1$  и  $V_2$  идентичны по параметрам то потенциалы баз транзисторов относительно эмиттеров равны  $-(U_{R2}/2)$  и  $+(U_{R2}/2)$ . В этом случае через транзисторы протекает одинаковый ток, а в сопротивлении нагрузки ток отсутствует. При этом ток делителя напряжений выбирают 5-10 раз больше начальных базовых токов транзисторов. Это обеспечивает малое изменение потенциалов баз при температурных изменениях их токов.

Поскольку  $R_2$  мало, можно считать, что базы транзисторов по переменному току непосредственно соединены между собой. Вместо резистора  $R_2$  может быть включен диод  $V_3$  или несколько последовательно соединенных диодов, которые обеспечивают требуемое падение напряжения между базами транзисторов при заданном токе делителя и в тоже время имеют малое дифференциальное сопротивление. Замена  $R_2$  диодами повышает температурную стабильность усилителя.

При подаче входного переменного усиливаемого сигнала один из транзисторов в зависимости от фазы сигнала закрывается, а открытый транзистор работает, как усилительный каскад, собранный по схеме с ОК, т.е. как обычный эмиттерный повторитель. Во время другого полупериода входного сигнала открытый и закрытый транзисторы меняются местами. Выходное сопротивление ЭП мало, что облегчает согласование усилителя с



низкоомной нагрузкой и к.п.д. схемы может быть достаточно большим. Поскольку выходное напряжение схемы с ОК почти равно входному, усиление мощности в таком усилителе достигается за счет усиления тока.

Для получения одинакового входного сопротивления в разные полупериоды и одинакового усиления по мощности транзисторы усилителя рекомендуется подбирать с идентичными параметрами.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы схем двухтактных усилителей мощности на биполярных транзисторах.

2 Изучить порядок расчета схем двухтактных усилителей.

3 Нарисовать схемы исследуемых двухтактных усилителей мощности.

4 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

5 Собрать схему генератора синусоидальных колебаний (рисунок 2). Выставить заданное преподавателем напряжение питания усилителей мощности.

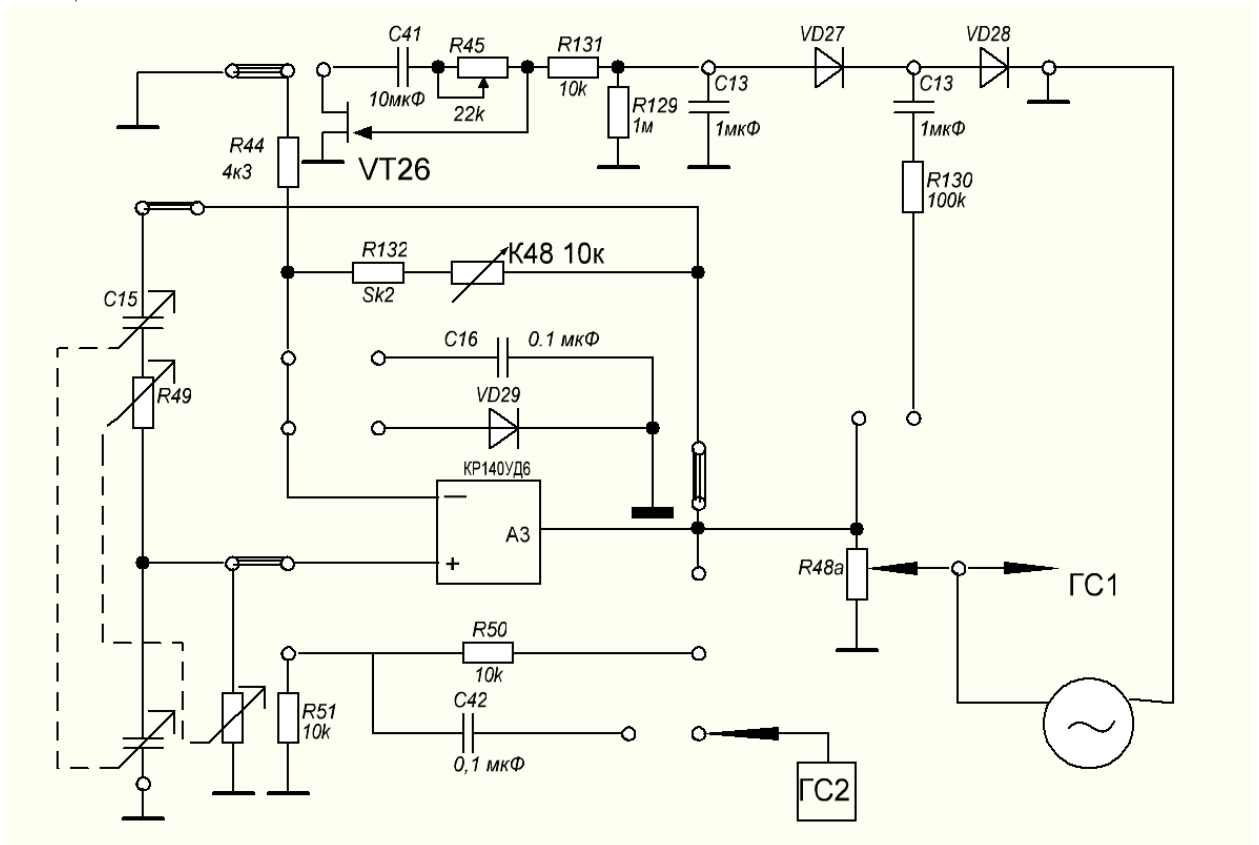


Рисунок 2- Схема генератора синусоидальных колебаний

6 Собрать схему двухтактного усилителя мощности, представленную на рисунке 3.

7 Замерить с помощью амперметра ток через нагрузку при  $R_n=1\text{кОм}$  и  $R_n=200\text{ Ом}$ . Пояснить полученное значение.

8 Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$  и амплитудой не более 3В. Снять и зарисовать осциллограммы входного напряжения и напряжения на нагрузке. Пояснить наличие в выходном напряжении переходных искажений.

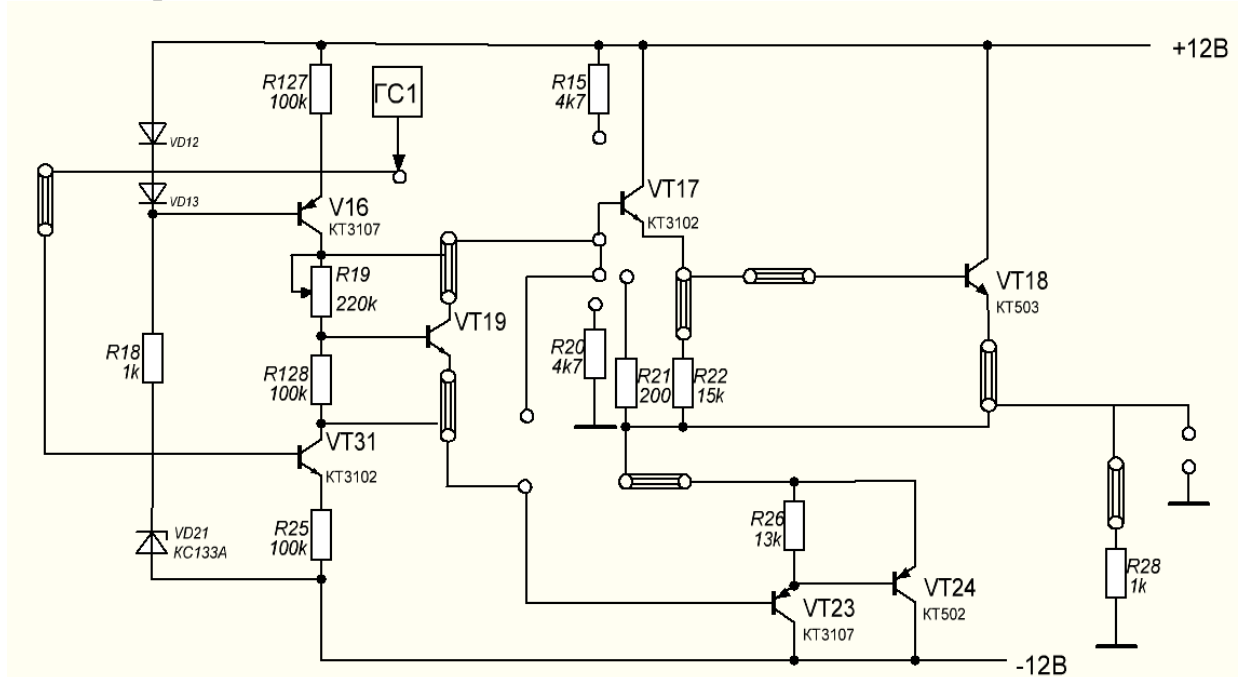


Рисунок 3- Схема двухтактного усилителя мощности

9 Снять и зарисовать осциллограммы напряжения для каждого такта работы.

10 Определить коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности. Определить мощность на нагрузке при  $R_n=1\text{кОм}$  и  $R_n=200\text{ Ом}$ .

### 3 Содержание отчета

- 1 Тема, цель работы, схема (рисунок 3).
- 2 Результаты измерений.
- 3 Осциллограммы входного, выходного напряжений без искажений и с искажениями, осциллограммы работы усилителя в каждом такте работы
- 4 Расчет коэффициентов усиления по току, напряжению, мощности.
- 5 Выводы по работе.

### 4 Контрольные вопросы

- 1 Объясните положение рабочей точки транзистора усилителя мощности, работающего в режимах класса А, АВ, В.
- 2 Сравните каскады усилителей мощности классов А, АВ, В по экономичности и уровню нелинейных искажений.
- 3 Объясните причины нелинейных искажений в каскадах усиления мощности на БТ.
- 4 Опишите принцип работы исследуемых схем.
- 5 Объясните назначение элементов исследуемых схем.

## Лабораторная работа №5 Исследование дифференциального усилителя

**Цель работы:** исследование основных параметров и характеристик дифференциальных усилительных каскадов на биполярных транзисторах.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### 1 Краткие теоретические сведения

Простейшие усилительные каскады на БТ с ОЭ и ОК имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение на практике. Во-первых, стабилизация режима покоя с помощью ООС приводит к уменьшению коэффициента усиления. Во-вторых, при связи каскадов друг с другом коэффициент усиления уменьшается за счет потерь на резистивных элементах. В-третьих, в этих усилителях имеется дрейф нуля. Эти серьезные недостатки частично или полностью исключены в дифференциальном каскаде, который поэтому находит чрезвычайно широкое применение особенно при создании операционных усилителей. Простейшая схема дифференциального каскада приведена на рисунке 1.

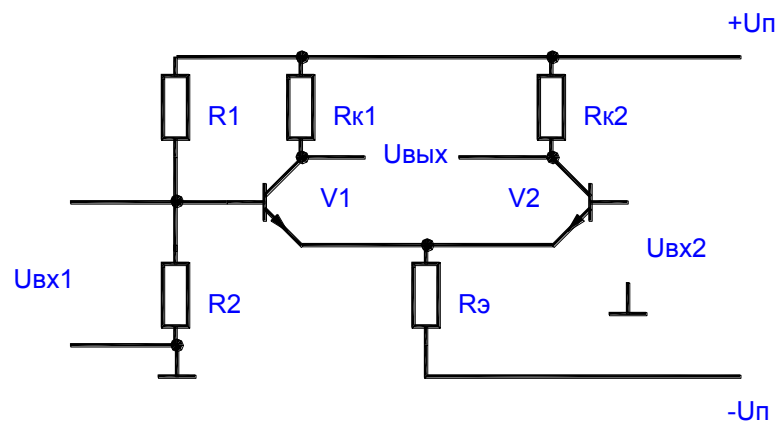


Рисунок 1- Схема дифференциального усилителя

Транзисторы  $V1$ ,  $V2$  и резисторы  $Rк1$  и  $Rк2$  образуют мост, в одну диагональ которого включаются источники питания  $+Uп$  и  $-Uп$ , а в другую - нагрузка. Дифференциальный каскад нередко называют также параллельно-балансным каскадом. Высокие показатели каскада могут быть достигнуты только при высокой симметрии моста. В симметричном каскаде  $Rк1 = Rк2$  транзисторы должны быть идентичны по своим параметрам.

В режиме покоя ( $Uвх = 0$ ) при полной симметрии схемы потенциалы коллекторов транзисторов  $V1$  и  $V2$  одинаковы и выходное напряжение равно нулю:  $Uк1 = Uк2$ ;  $Uвых = Uк1 - Uк2 = 0$ .

Высокая стабильность схемы объясняется тем, что при изменении напряжения источника питания или при одинаковых изменениях параметров транзисторов вследствие их нагрева потенциалы обоих коллекторов получают равные приращения, т.е.  $U_{вых} = \Delta U_{к1} - \Delta U_{к2} = 0$ .

Входной сигнал к этой схеме может подаваться либо между двумя базами либо на одну из баз при фиксированном потенциале второй базы.

Если источник сигнала включен между двумя базами, то это приводит к тому, что при одинаковых входных сопротивлениях транзисторов на обеих базах появляются сигналы, равные  $U_{вх}/2$  и противоположные по знаку. Это приводит к снижению тока коллектора одного транзистора и увеличению коллекторного тока другого транзистора.

Изменение коллекторных токов вызовет, в свою очередь, противоположные по знаку изменения потенциалов обоих коллекторов. При полной симметрии схемы

$$\begin{aligned} |\Delta I_{к1}| &= |\Delta I_{к2}|; \\ |\Delta U_{к1}| &= |\Delta U_{к2}|; \\ u_{вых} &= \Delta U_{к1} - \Delta U_{к2} = 2 * \Delta U_{к1}. \end{aligned}$$

Обращает на себя внимание, что при  $U_{вх1} = - U_{вх2}$ ,

$$\begin{aligned} |\Delta I_{э1}| &= |\Delta I_{э2}|; \\ i_{э1} + i_{э2} &= const \end{aligned}$$

т.е. сигнал ООС  $\Delta U_{э} = 0$  и падение напряжения на  $R_{э}$  не оказывает влияния на коэффициент усиления. А наличие общего эмиттерного сопротивления повышает стабильность схемы. Стабилизирующее действие резистора  $R_{э}$  тем больше, чем больше сопротивление этого резистора.

Если входной сигнал подается на базу  $V1$ , то при фиксированном потенциале второй базы (обычно  $u_{вх2} = 0$ ) выходное напряжение по модулю будет таким же, как и в предыдущем случае благодаря стабилизации тока  $I_{э1} + I_{э2} = const$ . Аналогично можно рассмотреть подачу сигнала на вход  $V2$ . При подаче сигнала на вход  $V1$  полярность выходного сигнала совпадает с полярностью входного (вход  $V1$  называется прямым входом), при подаче на вход  $V2$  полярность  $U_{вых}$  и  $U_{вх}$  противоположны (вход  $V2$  - инвертирующий). При этом нужно отметить, что схема дифференциального каскада симметрична знак  $U_{вых}$  зависит только от того, какое направление  $U_{вх}$  принято положительным.

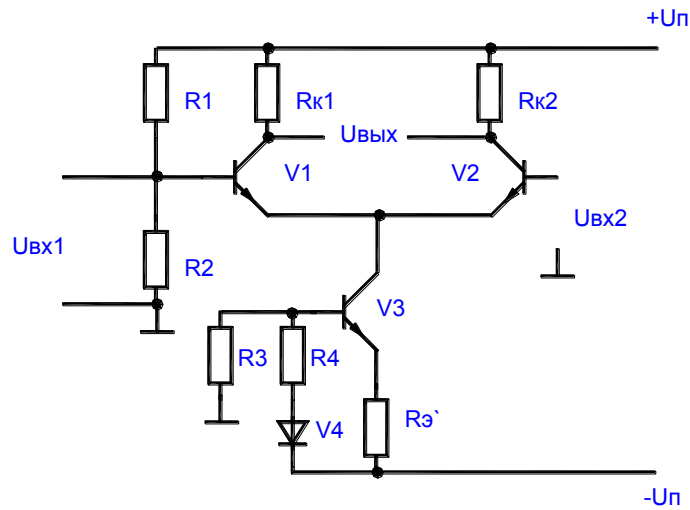


Рисунок 2- Схема ДУ с источником тока

Коэффициент усиления ненагруженного каскада можно определить из выражения:

$$K_u = U_{вых} / (U_{вх1} - U_{вх2}), \quad (5.1)$$

$$K_u = (\Delta U_{к1} - \Delta U_{к2}) / (U_{вх1} - U_{вх2}), \quad (5.2)$$

$$K_u = h_{21Э} * R_k / h_{11Э}, \quad (5.3)$$

где  $h_{21Э}$  и  $h_{11Э}$  - h параметры транзисторов.

Входное и выходное сопротивления дифференциального каскада соответственно равны:

$$R_{вх} = (U_{вх1} - U_{вх2}) / \Delta I_{вх} = 2 h_{11Э}, \quad (5.4)$$

где  $\Delta I_{вх} = \Delta I_{б1}$ ,  $R_{вых} = 2R_k$ .

Для нагруженного каскада

$$K_{ин} = K_u * R_n / (R_{вых} + R_n). \quad (5.5)$$

При изготовлении интегральных схем высокоомный резистор  $R_{э}$  заменяют на источник тока. Схема такого каскада приведена на рисунке 2.

Источник тока выполнен на транзисторе V3. Небольшое по величине сопротивление  $R_{э'}$  и диод V4 служат для стабилизации коллекторного тока транзистора V3. Недостатком дифференциального каскада является отсутствие общей точки между источниками сигнала и нагрузкой.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы схем дифференциальных усилительных каскадов на БТ.

2 Изучить порядок расчета схем дифференциальных усилительных каскадов БТ.

3 Рассчитать значения основных параметров для названных схем усилителей  $K_u$ ,  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ , работающих в области средних частот ( $f=1000 \text{ Гц}$ ).

4 Нарисовать схемы исследуемых дифференциальных усилительных каскадов.

5 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

6 Собрать схемы двух источников питания и генератора синусоидальных колебаний (см. рисунки 3 и 4). Выставить заданное преподавателем напряжение питания усилительных каскадов.

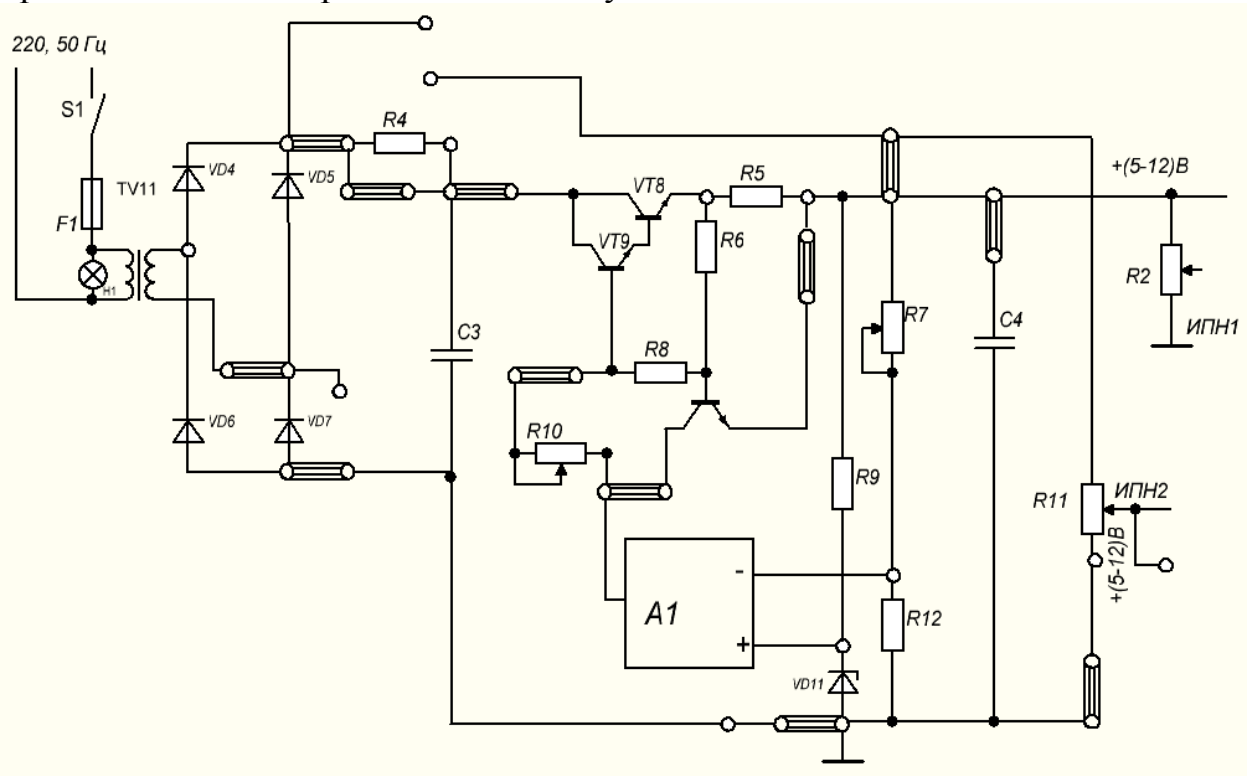


Рисунок 3- Схемы ИПН1, ИПН2

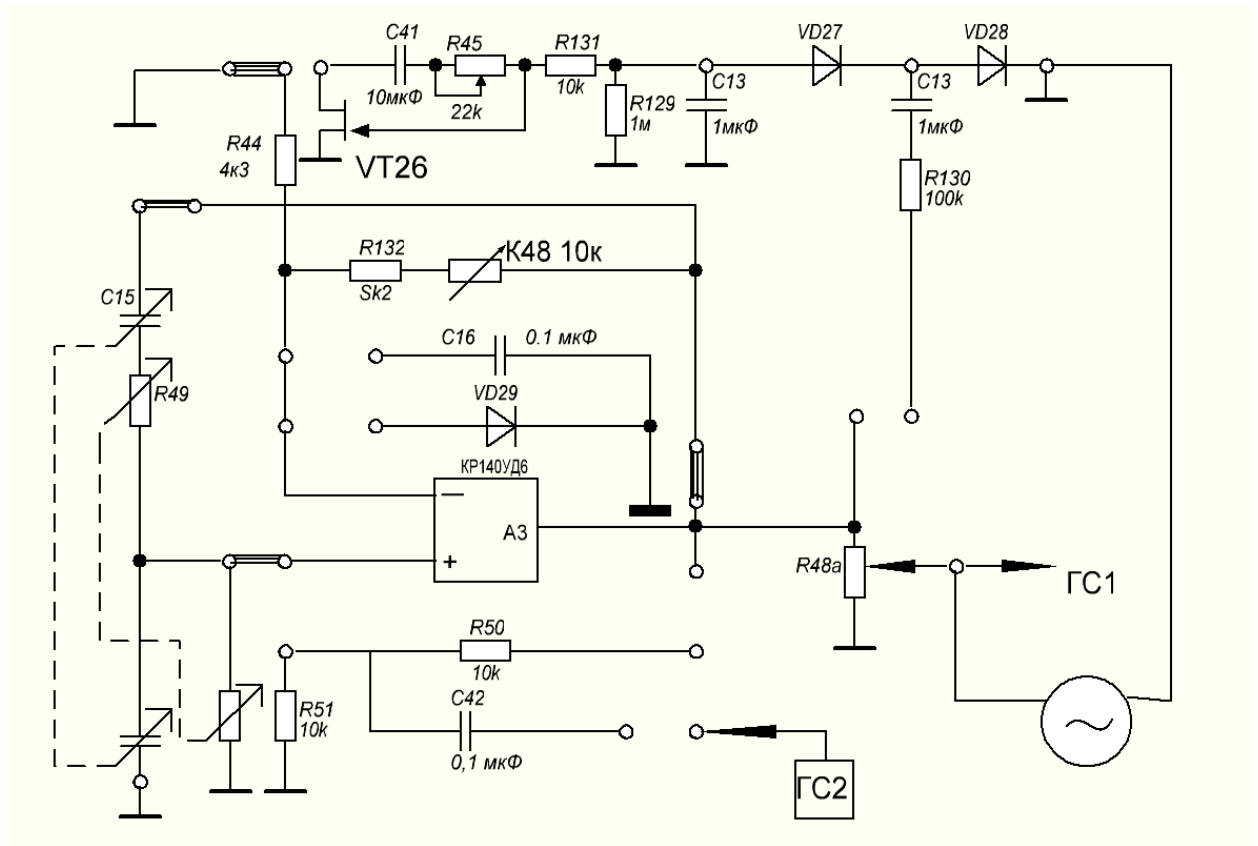
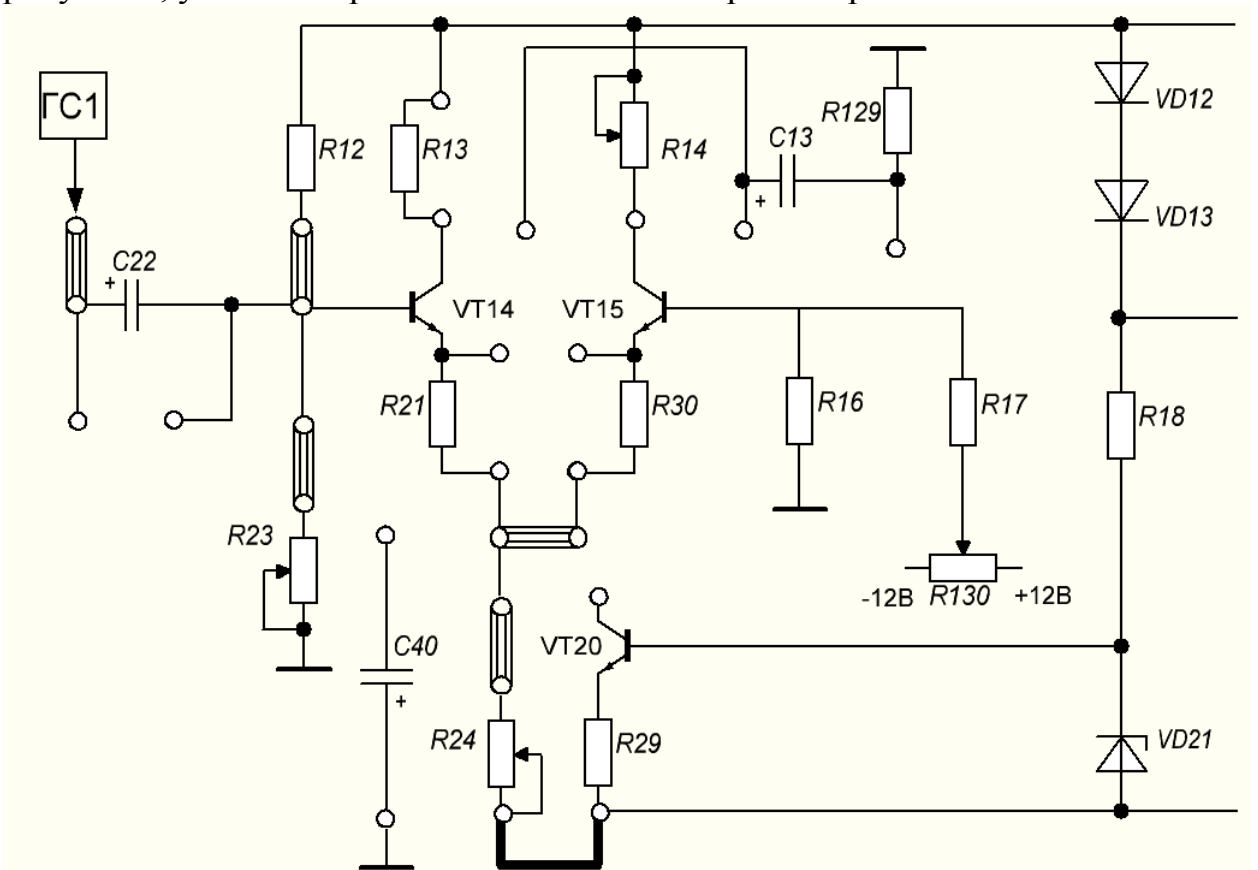


Рисунок 4- Схема генератора синусоидальных колебаний

7 Собрать схему дифференциального усилителя, представленную на рисунке 5, установив рассчитанное значение резистора R23.



### Рисунок 5 - Схема дифференциального усилителя

8 Подать на вход усилителя от генератора ГС1 синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$  и амплитудой  $U_{вхт} = 0,05\text{В}$ . Замерить с помощью осциллографа амплитуду выходного сигнала  $U_{выхт}$  и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжения. Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению.

9 Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$ . Изменяя амплитуду входного сигнала  $U_{вхт}$  от 0 до 0,5В (порядка 10 значений) построить амплитудную характеристику усилителя. Определить  $U_{вых\text{мах}}$  в момент появления существенных нелинейных искажений. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1- Результаты измерений

$U_{вх}, \text{В}$

$U_{вых}, \text{В}$

10 Сравнить результаты теоретических расчетов и практических исследований, сформулировать выводы по каждому пункту рабочего задания.

### **3 Содержание отчета**

1 Тема, цель работы, схема (рисунок 5).

2 Таблица 1.

3 Осциллограммы входного, выходного напряжений без искажений и с искажениями.

4 Расчет коэффициентов усиления.

5 Амплитудная характеристика

6 Выводы по работе.

### **4 Контрольные вопросы**

1Сравните усилители с ОЭ и дифференциальные по коэффициентам усиления  $K_i, K_u, K_p$ .

2Поясните, чем обусловлена высокая термостабильность дифференциального каскада.

3Назовите основные достоинства дифференциального каскада.

4Сравните усилители с ОЭ и дифференциального по значениям  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ . Поясните чем обусловлено их различие.

5Объясните назначения отдельных компонентов схем дифференциальных усилителей.

6Поясните, как зависит  $R_{вх}, R_{вых}, K_u$  усилителей от значений электрических параметров отдельных компонентов схемы.

7Поясните, когда следует применять дифференциальные усилительные каскады.

8Назовите способы задания режима работы транзисторов в дифференциальных усилительных каскадах.



## Лабораторная работа №6

### Исследование схем инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ

**Цель работы:** исследование принципа работы схем инвертирующего и неинвертирующего усилителя, основных параметров и характеристик.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

#### **1 Краткие теоретические сведения**

Исследуемый усилитель называется операционным потому, что он может использоваться для выполнения различных математических операций над сигналами: алгебраического сложения, вычитания, умножения на постоянный коэффициент, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования и т.д. Современный ОУ выполняется на базе интегральной микросхемы операционного усилителя, к выводам которой присоединяются источники питания, входных сигналов, сопротивление нагрузки, цепи обратной связи (ОС), коррекции частотных характеристик ОУ и другие цепи.

ОУ - это усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления по напряжению. Для получения возможности усиливать разнополярные сигналы ОУ запитывают, обычно симметричным, двухполярным источником питания.

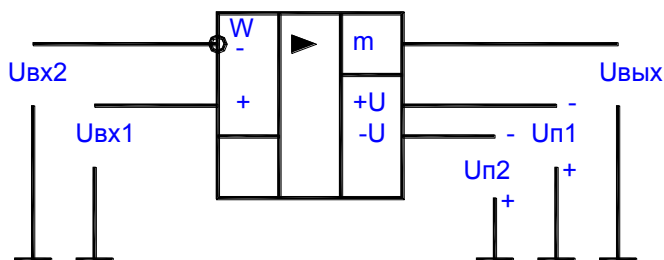


Рисунок 1- Условное графическое обозначение ОУ

На рисунке 1 условное обозначение ОУ с одним выходом и двумя входами: прямым и инверсным. Инверсный вход обозначают знаком инверсии (кружком) или помечают знаком "-". Прямой вход не имеет знака инверсии или его помечают знаком "+".

В общем случае на входные выводы ОУ подаются либо синфазный

$$U_{сф} = (U_{вх1} + U_{вх2})/2, \quad (6.1)$$

либо дифференциальный сигналы.

$$U_{диф} = (U_{вх1} - U_{вх2}) \quad (6.2)$$

ОУ предназначен для усиления небольшого разностного (дифференциального) сигнала. Синфазный сигнал схемой ОУ должен быть максимально ослаблен. Выходное напряжение  $U_{вых}$  находится в фазе (синфазно) с напряжением на входе "+"  $U_{вх1}$  и противофазно напряжению на входе "-"  $U_{вх2}$ .

На рисунке 2 приведены амплитудные характеристики ОУ.

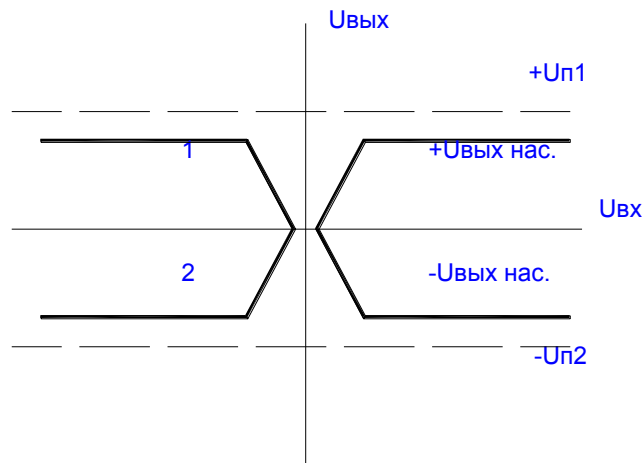


Рисунок 2- Амплитудные характеристики ОУ

### Инвертирующий усилитель

В этой схеме входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а его не инвертирующий вход заземлен (см. рисунок 3).

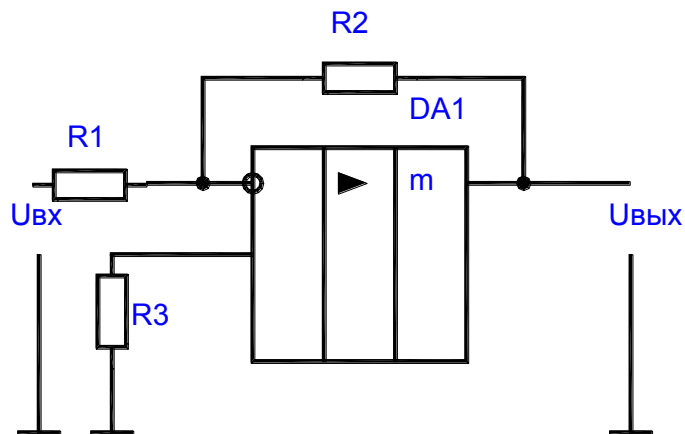


Рисунок 3 - Инвертирующий усилитель

Усилитель называется инвертирующим, так как выходное напряжение  $U_{вых}$  инвертировано по отношению к выходному напряжению  $U_{вх}$ . Отрицательная обратная связь создается с помощью резисторов  $R_2, R_1$  (параллельная ООС по напряжению).

Коэффициент усиления напряжения схемой инвертирующего ОУ определяется выражением:

$$K_u = -R_2/R_1. \quad (6.2)$$

Если  $R_2 = R_1$ , то  $K_u = -1$  и ОУ становится инвертирующим повторителем напряжения, у которого  $U_{вых} = -U_{вх}$ . Входное сопротивление инвертирующего ОУ  $R_{вх} = R_1$ , а выходное сопротивление

$$R_{вых} = R_{вых\ оу} / (1 + K_{оу}/K_u). \quad (6.3)$$

Для компенсации различия входных токов в схему введен резистор

$$R_3 = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2). \quad (6.4)$$

### Неинвертирующий усилитель

В этой схеме (см. рисунок 4) входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах  $R_1, R_2$ , подается напряжение ООС.

$$U_{оос} = U_{вых} * R_2 / (R_1 + R_2). \quad (6.5)$$

В схеме действует последовательная ООС по напряжению.

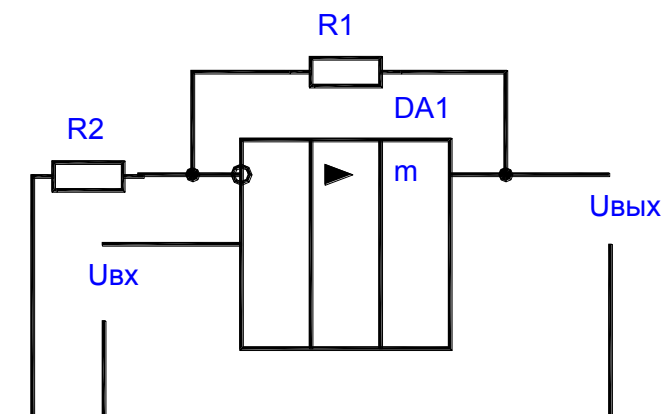


Рисунок 4- Неинвертирующий усилитель

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя.

$$K_u = 1 + R1/R2. \quad (6.6)$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя

$$R_{вх} = R_{вх\ оу} * (1 + K_{оу}/K_u), \quad (6.7)$$

а выходное сопротивление

$$R_{вых} = R_{вых\ оу} / (1 + K_{оу}/K_u). \quad (6.8)$$

При выполнении условия  $R1 = 0$ ,  $R2 = \infty$  ОУ будет выполнять функцию практически идеального повторителя напряжения, у которого  $K_u = 1$ , а  $U_{вых} = U_{вх}$ .

## 2 Порядок выполнения работы

- 1 Изучить принцип работы, параметры, характеристики, схемы включения и возможности применения ОУ.
- 2 Определить входное, выходное сопротивления и коэффициент усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей для заданных преподавателем значений параметров исследуемых схем.
- 3 Нарисовать схемы исследуемых усилителей.
- 4 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.
- 5 Собрать схему генератора синусоидальных колебаний (рисунок 5).  
Выставить заданное преподавателем напряжение питания схем усилителей.

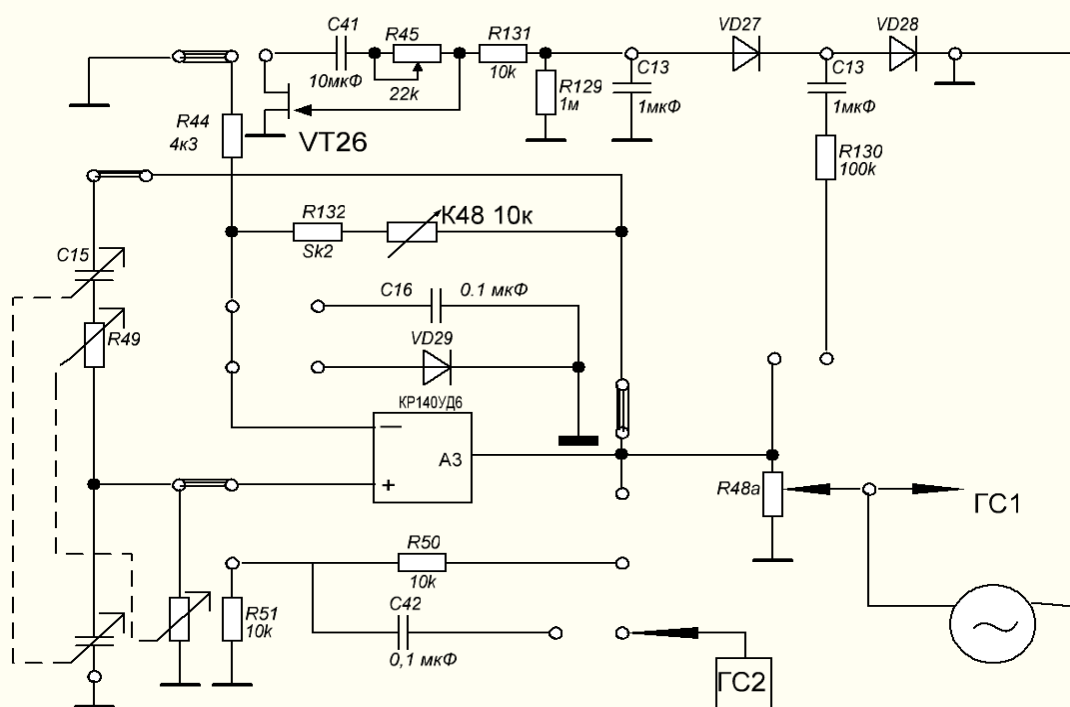


Рисунок 5- Схема генератора синусоидальных колебаний

6 Собрать схему инвертирующего усилителя, представленную на рисунке 6.

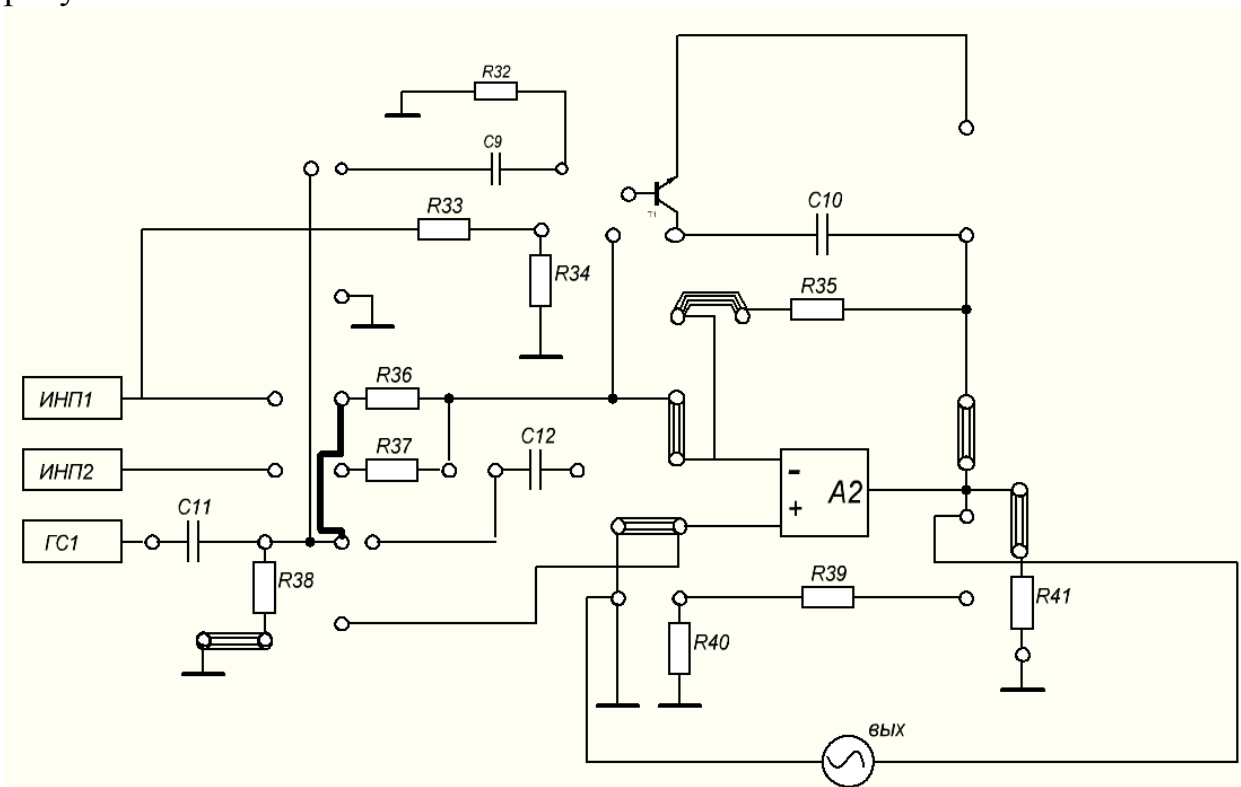


Рисунок 6 –Схема инвертирующего усилителя, работающего от генератора синусоидальных колебаний

7 Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1\text{кГц}$  и амплитудой не более 1В от генератора ГС1. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.

8 Подать на вход усилителя сигнал с амплитудой более  $U_{вх\text{ max}}$  и зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Пояснить полученный результат.

9 Изменяя амплитуду входного сигнала построить амплитудную характеристику усилителя. Определить  $U_{вых\text{ max}}$  в момент появления существенных нелинейных искажений. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1- Результаты измерений

$U_{вх}, \text{В}$

$U_{вых}, \text{В}$

10 Сравнить результаты теоретических расчетов и практических исследований, сформулировать выводы по каждому пункту рабочего задания.

### ***3 Содержание отчета***

- 1 Тема, цель работы, схема (рисунок 6).
- 2 Таблица 1.
- 3 Осциллограммы входного, выходного напряжений без искажений и с искажениями.
- 4 Расчет коэффициентов усиления.
- 5 Амплитудная характеристика
- 6 Выводы по работе.

### ***4 Контрольные вопросы***

1. Охарактеризуйте назначение, параметры, характеристики и особенности применения ОУ.
2. Сравните схемы усилителей на ОУ по основным параметрам.
3. Охарактеризуйте неинвертирующий и инвертирующий повторители напряжения и приведите их схемную реализацию.
4. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику ОУ и поясните ее.
5. Поясните, как осуществляется и для чего предназначена коррекция частотных характеристик ОУ.
6. Поясните, чем определяется максимальное выходное напряжение  $U_{вых}$  ОУ.

## Лабораторная работа №7

### Исследование схем интегратора, дифференциатора, суммирующего устройства на базе ОУ

**Цель работы:** исследование принципа действия схем интегратора, дифференциатора, суммирующего устройства, их параметров и характеристик.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

#### 1 Краткие теоретические сведения

##### Схема суммирования

Для суммирования нескольких напряжений можно применить ОУ в инвертирующем включении. Входное напряжение через добавочные резисторы подаются на инвертирующий вход усилителя (рисунок 1).

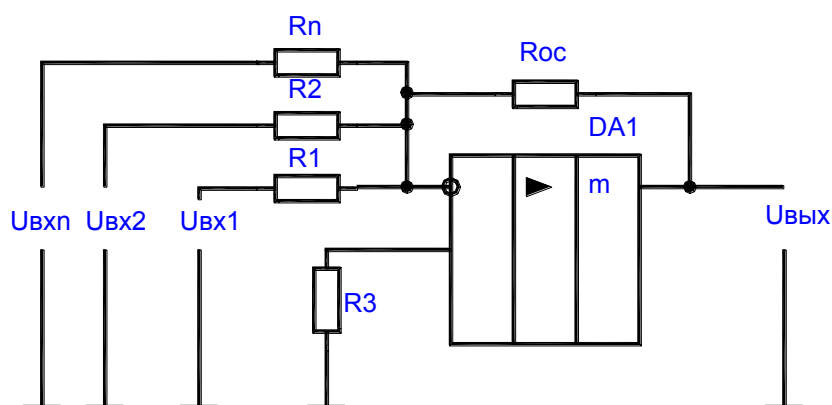


Рисунок 1 - Схема суммирования

Поскольку эта точка является виртуальным нулем, то на основании правила узлов получим следующее соотношение для выходного напряжения схемы:

$$U_{vx1}/R1 + U_{vx2}/R2 + \dots + U_{vxn}/Rn + U_{vвых}/Roc = 0 \quad (7.1)$$

##### Схема интегрирования

Интегратор (см. рисунок 2) построен на основе инвертирующего усилителя, в котором резистор обратной связи заменен конденсатором С. В этом случае выходное напряжение описывается выражением:

$$U_{вых}(t) = - 1/(R*C) * \int U_{вх}(t) dt + U_{вых}(0), \quad (7.2)$$

где  $U_{вых}(0)$  - начальное условие интегрирования при  $t = 0$ .

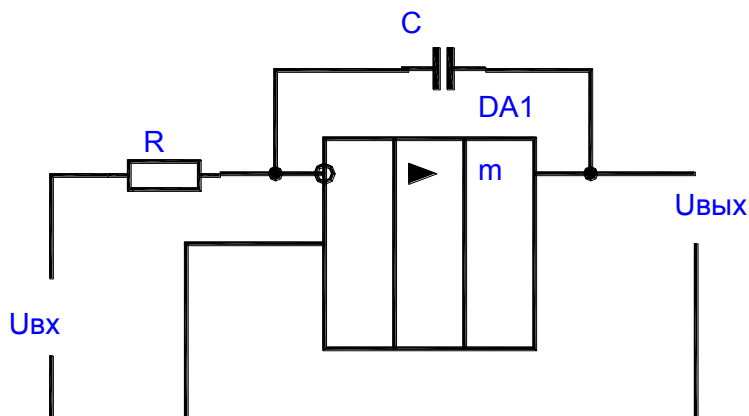


Рисунок 2- Схема интегрирования

Рассмотрим два особых случая. Если входное напряжение постоянно, то изменение выходного сигнала описывается формулой:

$$U_{вых}(t) = - 1/(R*C) * U_{вх} * t + U_{вых}(0), \quad (7.3)$$

т.е. выходной сигнал линейно возрастает со временем и поэтому данная схема пригодна для формирования пилообразного напряжения.

Если входной сигнал представляет собой переменное напряжение, изменяющееся по косинусоидальному закону, то формула для выходного напряжения будет иметь следующий вид:

$$U_{вых}(t) = - 1/(\omega*R*C) * U_{вх} * \sin(\omega t) + U_{вых}(0). \quad (7.4)$$

Как видно из этого выражения, амплитуда выходного сигнала обратно пропорциональна круговой частоте. Таким образом, амплитудно-частотная характеристика интегратора в логарифмическом масштабе имеет вид прямой с наклоном 20Дб на декаду. Это является простым критерием, с помощью которого можно определить, является ли схема интегратором.

В символическом виде зависимость коэффициента передачи интегратора от параметров схемы описывается выражением вида:

$$\dots \dots \dots \quad K_{и} = U_{вых}/U_{вх} = - (Z_c/R) = - 1/(j*\omega*R*C). \quad (7.5)$$

Отсюда можно получить соотношение для расчета амплитуды выходного сигнала.

Коэффициент обратной связи интегратора является комплексной величиной:



$$Ku = (j \cdot \omega \cdot R \cdot C) / (1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C). \quad (7.6)$$

При использовании реального ОУ необходимо учитывать входной ток  $I_{вх}$  и напряжение смещения ОУ  $U_{см}$ . За счет действия этих величин будет изменяться выходное напряжение

$$dU_{вых}/dt = 1/C * (U_{см}/R + I_{вх}). \quad (7.7)$$

### Схема дифференцирования

Поменяв местами сопротивление и конденсатор в интеграторе получим дифференциатор (рисунок 3).

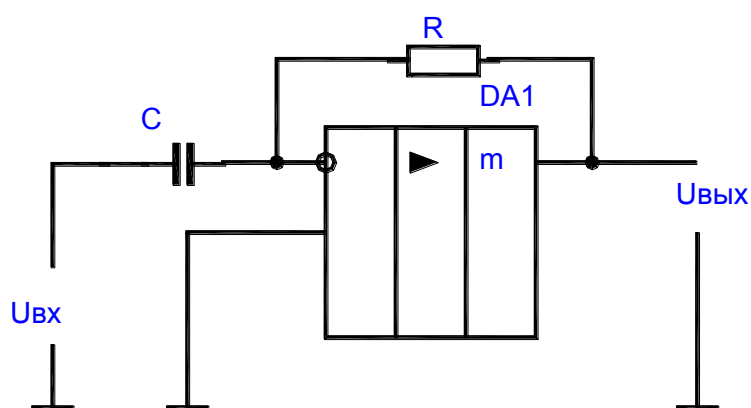


Рисунок 3-Схема дифференцирования

Применение правила узлов для инвертирующего входа ОУ в этом случае дает следующее соотношение:

$$U_{вых} = -R \cdot C \cdot (dU_{вх}/dt). \quad (7.8)$$

При синусоидальном входном напряжении получим на выходе напряжение:

$$U_{вых} = -\omega \cdot R \cdot C \cdot U_{вх} \cdot \cos(\omega t). \quad (7.9)$$

Отсюда следует соотношение для отношения амплитуд выходного и входного сигналов:

$$U_{вых}/U_{вх} = |Ku| = \omega \cdot R \cdot C. \quad (7.10)$$

Амплитудно-частотная характеристика схемы дифференцирования в логарифмическом масштабе представляет собой прямую с наклоном 20 дБ/дек.

Практическая реализация дифференцирующей схемы, показанной на рисунке 3 сопряжена с трудностью обеспечения устойчивости, поскольку ОС при больших частотах входного сигнала вызывает фазовое опережение, составляющее около 30 градусов.

Устранить этот недостаток можно включив во входную цепь последовательно с емкостью С резистор R1.

Величину  $R1 * C$  (и, следовательно, граничную частоту  $f1$  цепочки) целесообразно выбирать так, чтобы на этой частоте усиление цепи ОС составляло 1. В этом случае верно соотношение:

$$f1 = 1/(2n * R * C), \quad (7.11)$$

где  $f1$  – граница частоты дифференцирования.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы, параметры, характеристики схем на основе ОУ. Нарисовать исследуемые схемы в отчет (рисунки 4, 5, 6).

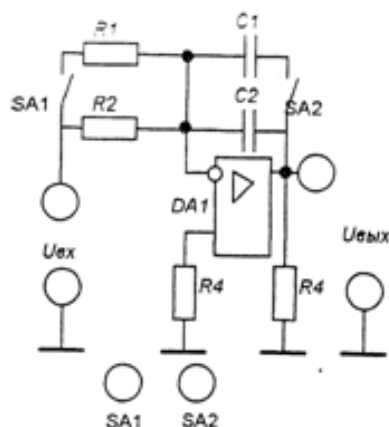


Рисунок 4-Интегратор

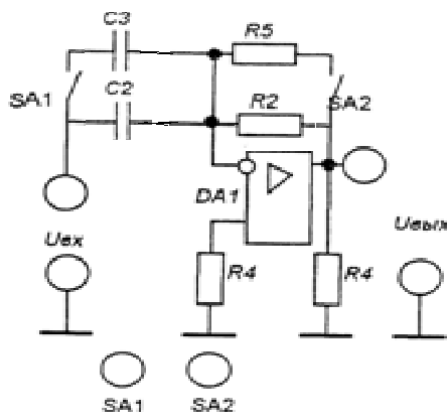


Рисунок 5- Дифференциатор

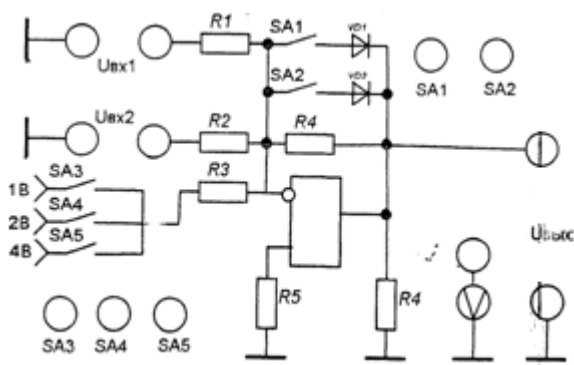


Рисунок 6- Сумматор

- 2 Ознакомьтесь с порядком сборки схем на стенде.
- 3 Подать на вход интегратора прямоугольные импульсы. На выход подключить осциллограф.
- 4 Зарисовать в масштабе осциллограммы входного и выходного напряжений в двух положениях SA2 (SA1 ниже).
- 5 Определите в каком положении SA2  $C1 \parallel C2$ . Укажите полученный результат на осциллограмме.
- 6 Определите в каком положении SA1 (SA2 верхнее)  $R1 \parallel R2$ . Зарисуйте осциллограммы с указанием полученных результатов.
- 7 Определите по осциллографу максимальное напряжение и период входных импульсов.
- 8 Подать на вход дифференциатора прямоугольные импульсы. На выход подключить осциллограф.
- 9 Зарисовать в масштабе осциллограммы входного и выходного напряжений при положениях SA2 верхнее, SA1 верхнее и при SA2 нижнее, SA1 нижнее.
- 10 Укажите на осциллограммах, какому подключению R и C соответствует каждая из них.
- 11 Для исследования работы сумматора установите SA1 и SA2 в левое положение.
- 12 Подключите на выход сумматора вольтметр.
- 13 Устанавливая SA3, SA4, SA5 в положения, указанные в таблице 1 измерить выходное напряжение. Результаты измерений записать в таблицу 1. SA3, SA4, SA5 - верхнее-разомкнут, нижнее – замкнут. В таблице 1 «+» обозначает замкнутое состояние.

Таблица 1- Результаты эксперимента

SA3	SA4	SA5	U <sub>вых</sub> , В	U <sub>вх</sub> , В
+	-	-		
-	+	-		
-	-	+		
+	+	-		
+	-	+		
-	+	+		
+	+	+		

14 Рассчитать  $U_{вх}$  для каждого случая. Результаты записать в таблицу 1. Уровни  $U_{вх}$  указаны на стенде.

### ***3 Содержание отчета***

- 1 Тема, цель работы, схемы (рисунки 4, 5, 6).
- 2 Осциллограммы входного и выходного напряжений интегратора.
- 3 Осциллограммы входного и выходного напряжений дифференциатора.
- 4 Таблица 1.
- 5 Расчет  $U_{вх}$ .
- 6 Выводы по работе.

### ***4 Контрольные вопросы***

- 1 Изобразите схему неинвертирующего сумматора.
- 2 Предложите схему вычитающего устройства на основе сумматора и инвертирующего усилителя и оцените ее погрешность.
- 3 Предложите схему для разряда емкости в интеграторе.
- 4 Поясните, как зависит точность интегрирования от частоты входного сигнала. (Воспользуйтесь амплитудно-частотной характеристикой).
- 5 Поясните, как зависит точность интегрирования от величины емкости при неизменной постоянной интегрирования.
- 6 Предложите способ уменьшения влияния напряжения смещения и входного тока на точность интегрирования.

## Лабораторная работа №8 Исследование компаратора напряжения на ОУ

**Цель работы:** исследование схем, основных параметров и характеристик аналоговых компараторов на операционных усилителях.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### 1 Краткие теоретические сведения

Компаратор предназначен для сравнения аналоговых напряжений, одно из которых является входным (измеряемым)  $U_{вх}$ , а второе - опорным (задающим)  $U_{оп}$ . В момент равенства мгновенных значений входных сигналов напряжение на выходе компаратора резко изменяется. Кроме функций сравнения, компаратор осуществляет формирование выходных сигналов в виде двух дискретных уровней, один из которых соответствует логической 1, а другой - логическому 0.

Схема простейшего компаратора для сравнения однополярных сигналов приведена на рисунке 1.

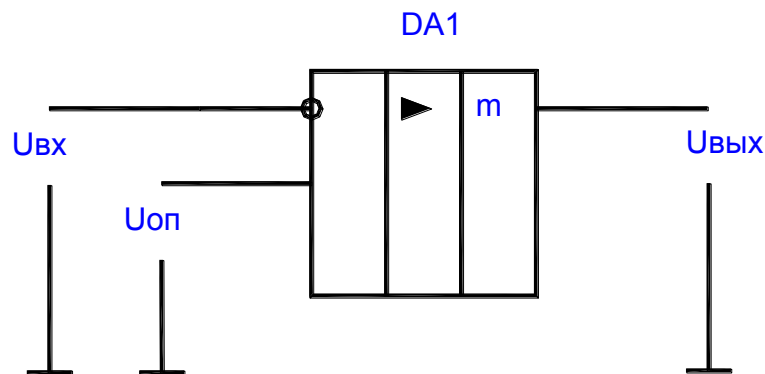


Рисунок 1- Схема простейшего компаратора

В нее входит ОУ с цепями питания и коррекции. Схема не содержит обратных связей. Выходное напряжение компаратора равно

$$U_{вых} = K_{иоу} * (U_{оп} - U_{вх}) \quad (8.1)$$

и, так как  $K_{иоу}$  велик, а ООС отсутствует, то оно принимает одно из двух дискретных значений  $+U_{нас}$  или  $-U_{нас}$ . При  $U_{оп} > U_{вх}$ , а  $U_{оп}$  поступает на неинвертирующий вход ОУ, то достаточно даже незначительной разности входных сигналов ( $U_{оп} - U_{вх}$ ), чтобы  $U_{вых}$  приняло значение  $+U_{нас}$ . При  $U_{оп} < U_{вх}$  выходное напряжение принимает значение  $-U_{нас}$ .

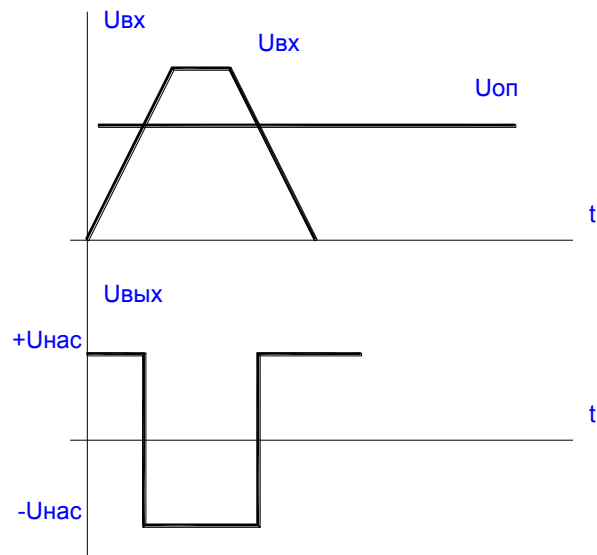


Рисунок 2- Характеристики

На рисунке 2 изображены характеристики  $U_{вых} = f(t)$  реального (сплошной линией) и идеального (пунктирной линией) компаратора. Из характеристики видно, что реальный компаратор переключается с некоторым запаздыванием и процесс переключения занимает некоторое конечное время.

Рассмотренная схема обладает низкой помехоустойчивостью, так как компаратор может ложно переключиться под действием помехи с малым напряжением, наложенной на полезный сигнал. Это явление получило название "дребезга компаратора". Особенно это явление проявляется при малой скорости изменения входного сигнала. Для повышения помехоустойчивости работы в схему компаратора вводят положительную обратную связь.

Компараторы на ОУ позволяют сравнивать сигналы с порогом чувствительности, равным десяткам микровольт, при времени переключения порядка единиц микросекунд. Специализированные интегральные компараторы имеют несколько худший порог чувствительности (порядка сотен микровольт) при меньшем времени переключения (порядка сотен наносекунд).

### Триггеры Шмидта

Более высокой помехоустойчивостью обладает компаратор, в который введена положительная ОС на резисторах R2 и R3 (см. рисунок 3).

Такая схема известна под названием триггера Шмидта.

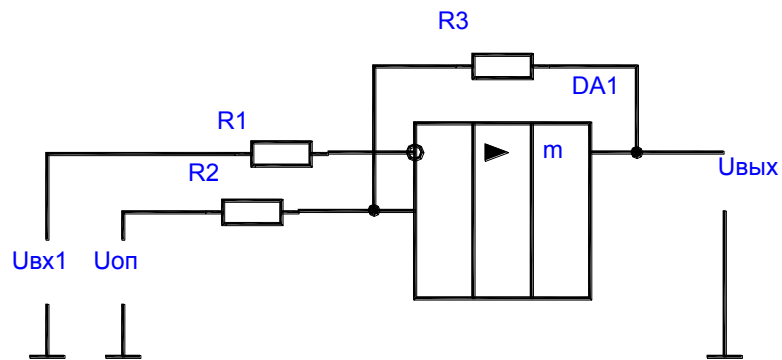


Рисунок 3 – Триггер Шмидта

В этой схеме напряжение на неинвертирующем входе ОУ

$$U^*_{вх} = U_{оп} + U_{ос}, \quad (8.2)$$

где  $U_{ос}$ - напряжение обратной связи.

$$U_{ос} = (U_{вых} - U_{оп}) * R2 / (R2 + R3). \quad (8.3)$$

За счет действия ПОС напряжение срабатывания  $U_{сраб}$  компаратора становится большим на величину  $\Delta U = U_{ос}$ , т.е.

$$U_{сраб} = U_{оп} + \Delta U. \quad (8.4)$$

Возвращение компаратора в исходное состояние происходит при напряжении отпущания  $U_{отп}$ , которое равно

$$U_{отп} = U_{оп} - \Delta U. \quad (8.5)$$

$$(при \ /+U_{нас}/ = \ /-U_{нас}/) \quad (8.6)$$

Отсюда следует, что за счет действия ПОС компаратор обладает гистерезисом

$$\Delta U_г = U_{сраб} - U_{отп}. \quad (8.7)$$

Зависимость выходного напряжения от входного представлена на рисунке 4.

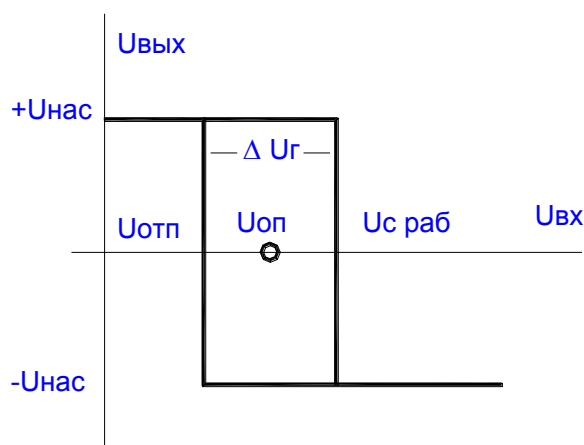


Рисунок 4- Передаточная характеристика

Для уменьшения влияния начальных входных токов ОУ на работу компаратора резистор  $R1$  выбирают с учетом равенства

$$R1 = R2 * R3 / (R2 + R3). \quad (8.8)$$

Введение ПОС повышает помехоустойчивость и скорость переключения компаратора, но при этом снижается точность сравнения входных напряжений, которая зависит от  $\Delta U_{\text{г}}$ .

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы, параметры, характеристики схем компараторов на основе ОУ.

2 Изучить порядок расчета элементов схем и их качественных характеристик.

3 По известным значениям элементов схемы триггера Шмидта и заданному преподавателем значению  $U_{\text{оп}}$  рассчитать  $U_{\text{с раб}}$ ,  $U_{\text{отп}}$  и  $\Delta U_{\text{г}}$ . Нарисовать временные диаграммы работы схемы.

4 Нарисовать исследуемые схемы компараторов.

5 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде. Собрать схему ИПН1, ИПН2 (рисунок 5).

6 Соберите схему компаратора для сравнения однополярных сигналов рисунок 6.

7 Исследовать работу устройства, изменяя уровень входного сигнала от источника питания вручную при  $U_{\text{оп}} = \text{const}$ . Определить порог чувствительности компаратора, используя для этого осциллограф. По осциллографу определяют момент срабатывания компаратора и определяют разность  $\Delta U_{\text{вх min}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{вх с раб}}$ , которая и будет характеризовать порог чувствительности.  $U_{\text{вх с раб}}$  замеряют с помощью цифрового вольтметра.



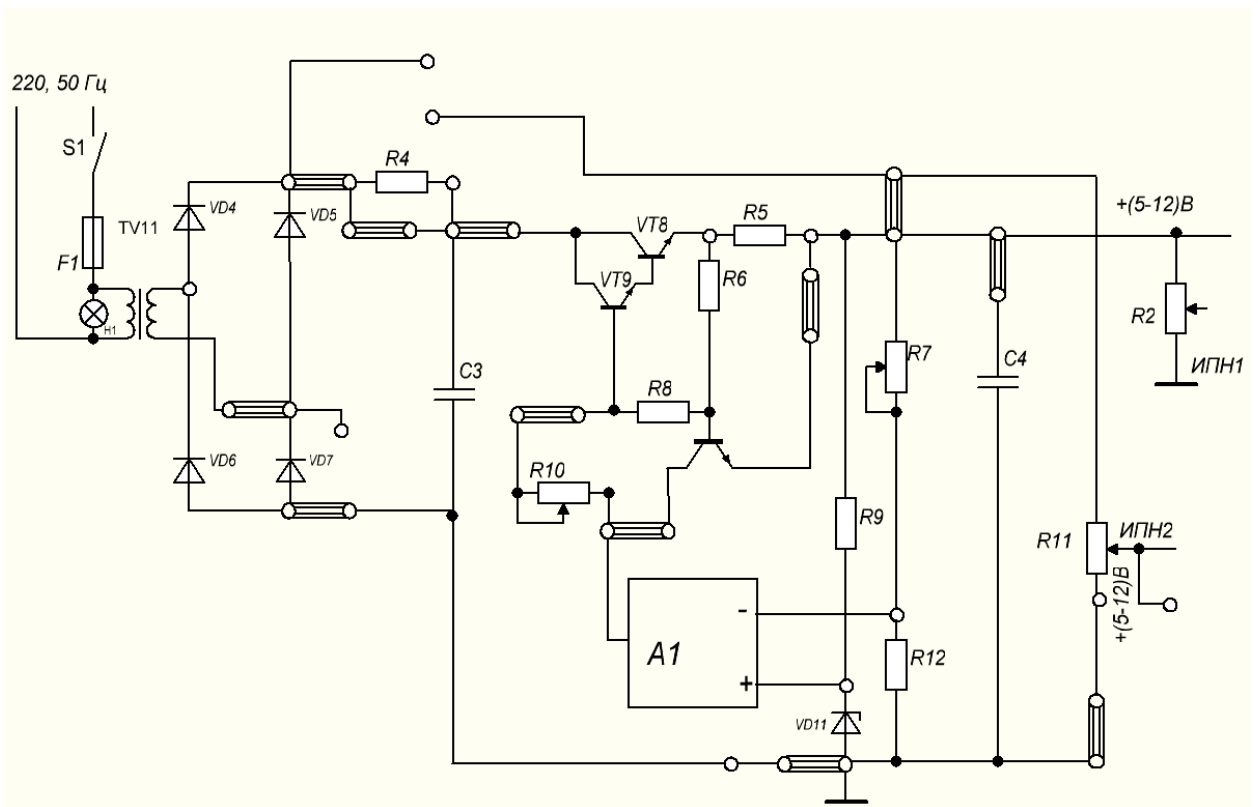


Рисунок 5 - Схема ИПН1, ИПН2

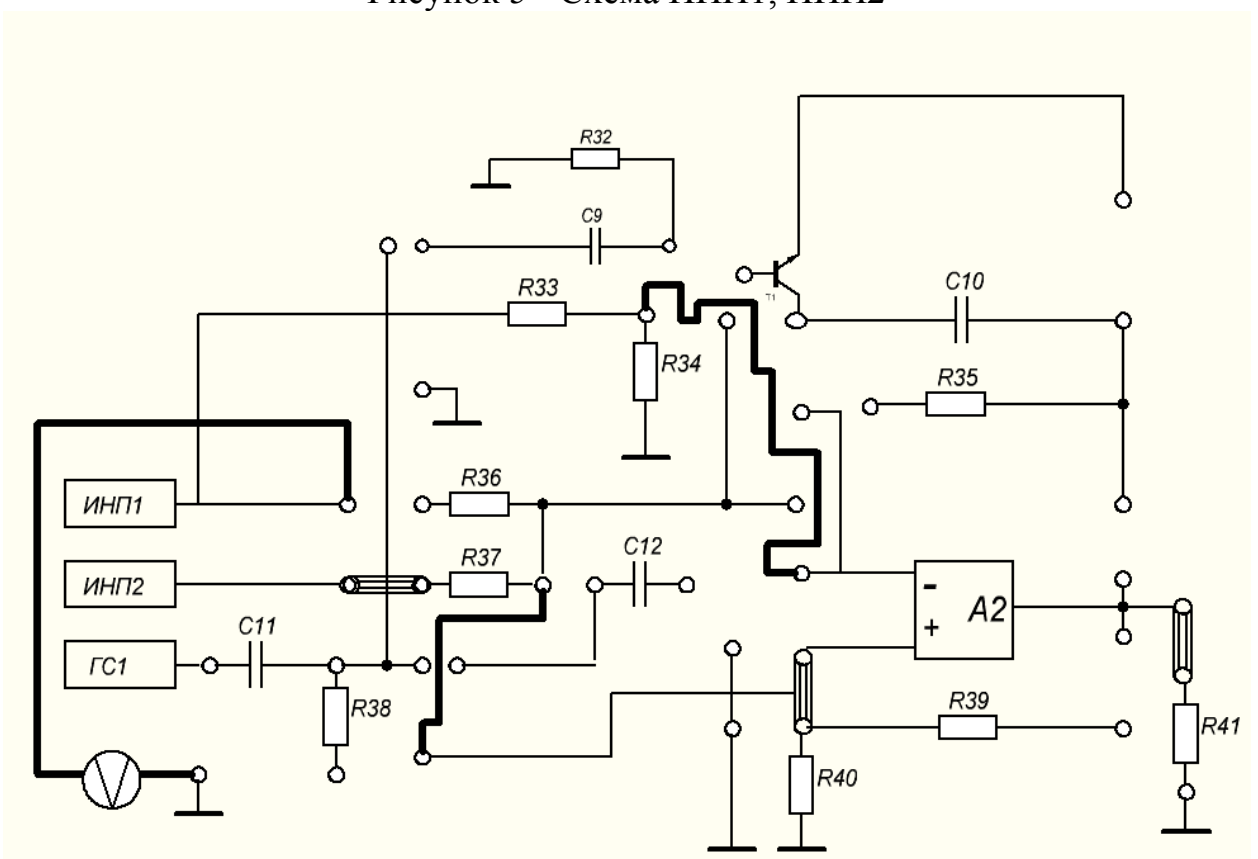


Рисунок 6 – Схема компаратора при сравнении однополярных сигналов

8 Подайте на вход компаратора синусоидальный сигнал соответствующей амплитуды и частотой  $f = 1\text{кГц}$  от генератора (рисунок 7).

Убедитесь в правильности функционирования схемы. Зарисуйте осциллограммы входных и выходных сигналов компаратора.

9 Соберите схему триггера Шмидта (рисунок 8).

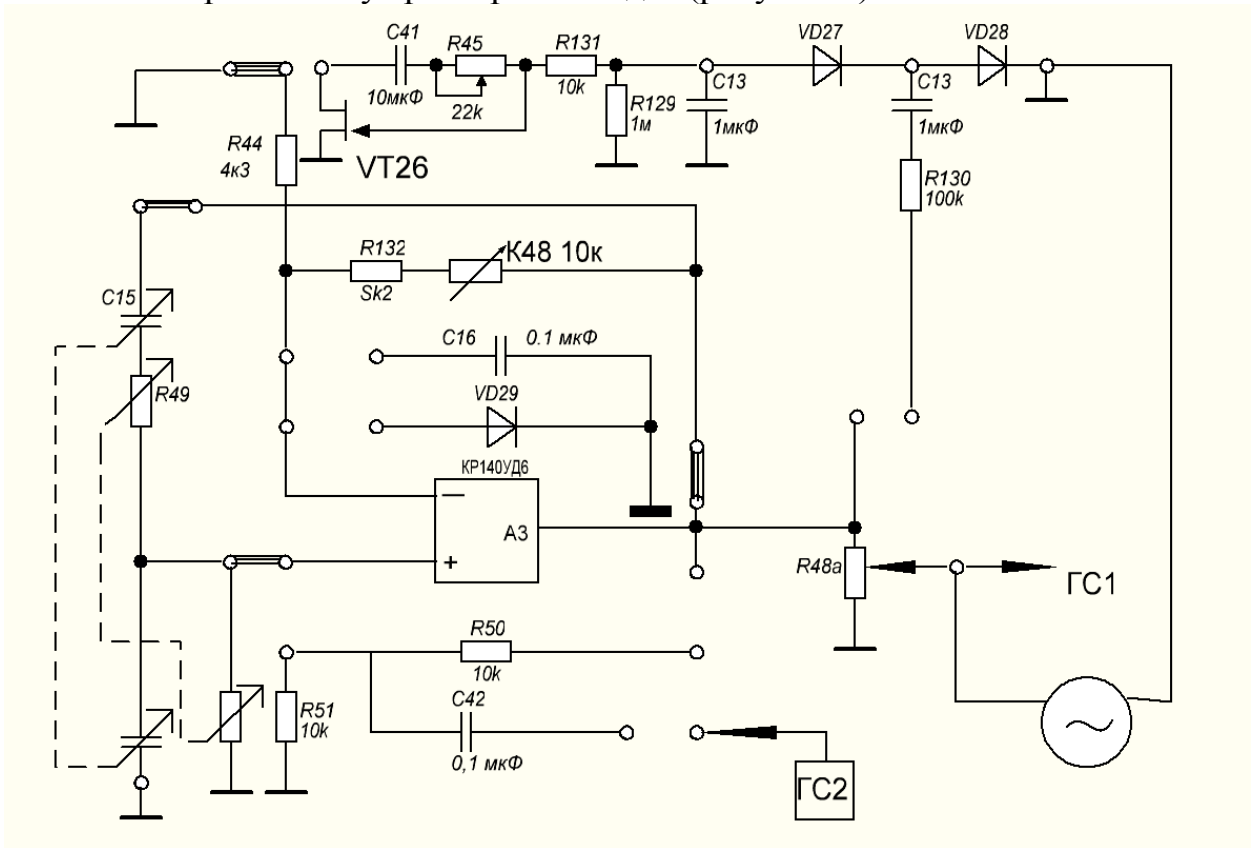


Рисунок 7 – Схема генератора синусоидальных сигналов

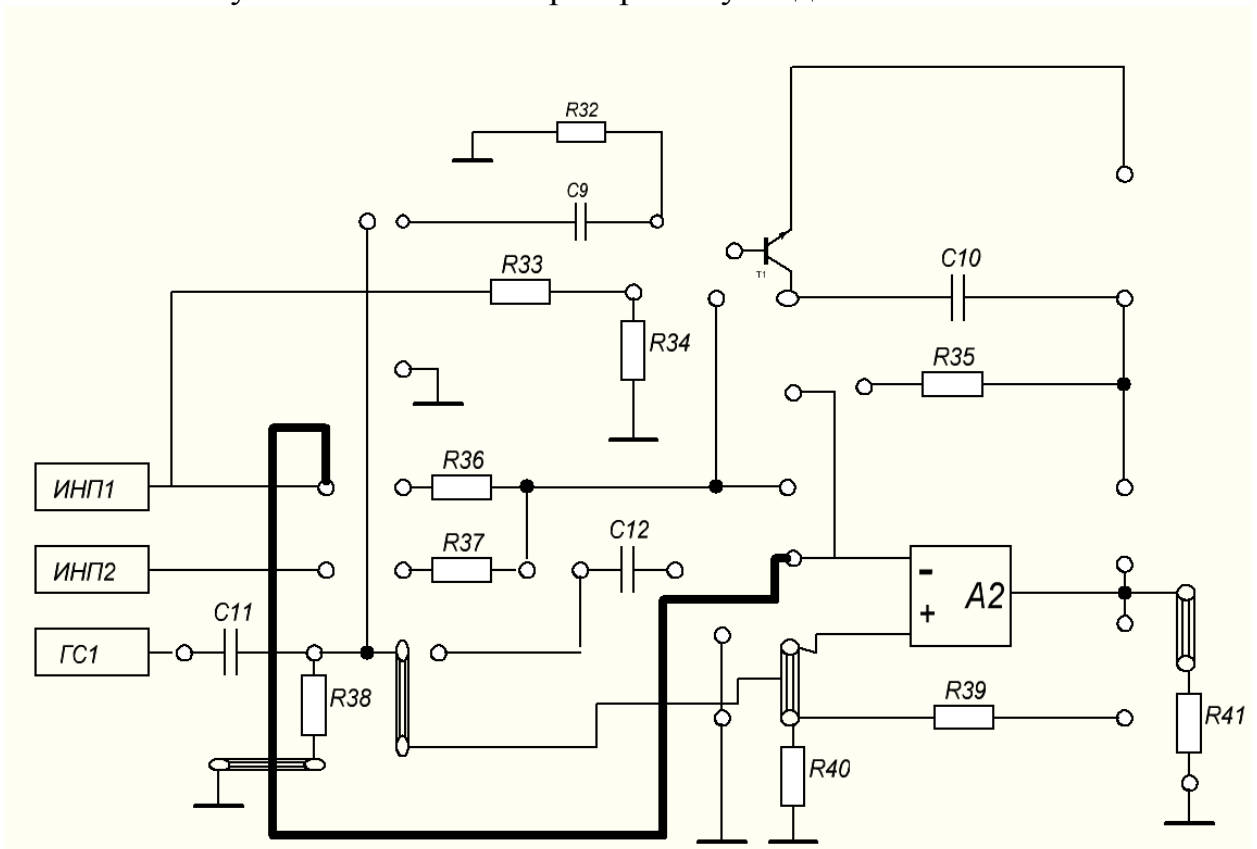


Рисунок 8 – Схема компаратора при сравнении сигналов с ИНП1 и GC1

10 Выполните указания п.п.6. и 7. Определите  $U_{сраб}$ ,  $U_{отп}$ , и  $\Delta U_2$  триггера.

11 Сравните результаты практического исследования с теоретическими расчетами и сделайте выводы.

### **3 Содержание отчета**

1 Тема, цель работы, схемы (рисунки 6, 8).

2 Осциллограммы входного и выходного напряжений компаратора при сравнении однополярных сигналов.

3 Осциллограммы входного и выходного напряжений компаратора при сравнении сигналов сИПН1 и ГС1.

4 Выводы по работе.

### **4 Контрольные вопросы**

1 Назовите основные особенности построения компараторов на ОУ.

2 Поясните, почему в таких схемах, как правило, не используются ООС.

3 Поясните, как можно повысить помехоустойчивость компаратора.

4 Поясните, как определить синфазное напряжение на входах компаратора для сравнения однополярных сигналов.

5 Поясните, как осуществляется в компараторах формирование нужных значений логических уровней цифровых микросхем  $U^1_{вых}$  и  $U^0_{вых}$ .

6 Назовите отличия в значениях основных параметров компараторов на ОУ и в виде специализированной ИМС?

7 Начертите схему двухпорогового компаратора и временные диаграммы его работы.

## Лабораторная работа №9 Исследование импульсных усилителей

**Цель работы:** исследование схем, основных параметров и характеристик импульсных усилителей.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### 1 Краткие теоретические сведения

Устройства усиливающие сигналы с частотой от единиц- десятков герц до десятков-сотен мегагерц, называют импульсными усилителями. Они должны обладать широкой полосой пропускания, так как дают широкий спектр гармонических колебаний. Поэтому, чем шире полоса пропускания усилителя, тем точнее он будет воспроизводить импульсы, действующие на его входе. Обычный импульсный усилитель строится на основе резистивного усилительного каскада (рисунок 1).

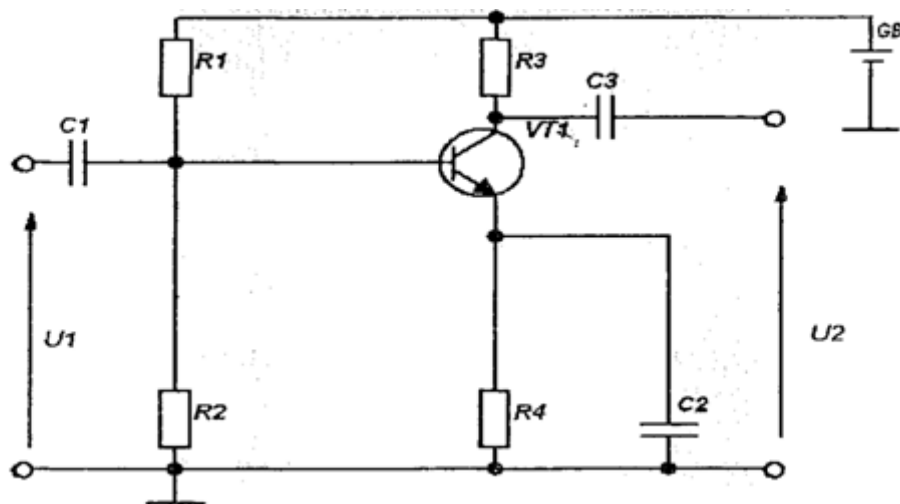


Рисунок 1- Схема импульсного усилителя

Для анализа формы искажений формы импульса используют переходную характеристику усилителя. Это зависимость мгновенного значения выходного напряжения  $U_2(t)$  при скачкообразном изменении входного напряжения  $U_1(t)$ . Переходная характеристика определяет процесс перехода усилителя из одного стационарного состояния в другое, когда входное воздействие скачком изменилось на некоторую величину, условно принимаемую за единицу. Для практического использования более удобными являются нормированные переходные характеристики  $h(t)$ , у которых по оси ординат откладывается отношение  $U(t)$  к коэффициенту усиления  $K_0$ , т. е.

$$h(t) = U_2(t) / K_0, \quad (9.1)$$

Если на вход усилителя подан идеальный прямоугольный импульс, его можно представить в виде суммы двух единичных скачков напряжений различной полярности, сдвинутых на время  $t_i$ . Реакция усилителя на скачок напряжения представляет его переходную характеристику. Следовательно, разность двух переходных характеристик, сдвинутых на  $t_i$ , дает форму искаженного импульса на выходе усилителя (рисунок 2).

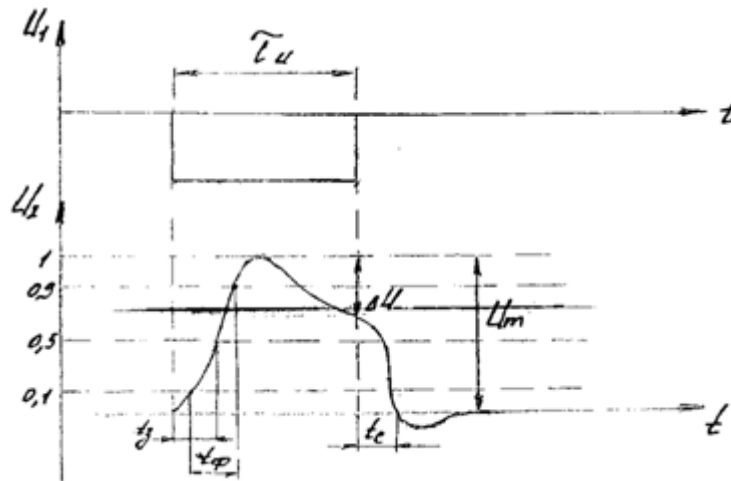


Рисунок 2- Параметры импульсного усилителя

Для качественной оценки формы искаженного импульса на выходе усилителя вводят параметры:

- а) длительность фронта  $t_f$ -интервал времени, в течение которого сигнал на выходе изменяется от  $0,1U_m$  до  $0,9U_m$ ;
- б) время запаздывания  $t_z$ - интервал времени, в течение которого сигнал на выходе достигает величины  $0,5U_m$ ;
- в) спад вершины определяется величиной  $\Delta U$ , а относительный спад вершины

$$G = \Delta U / U_m, \quad (9.2)$$

- г) длительность среза  $t_c$ .

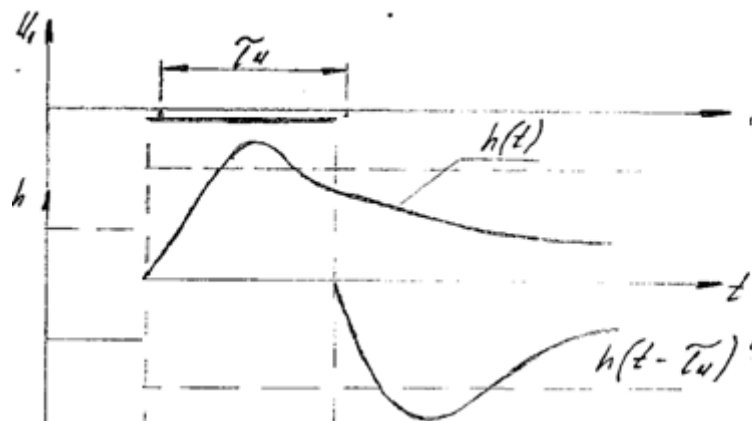


Рисунок 3 - Переходная характеристика

Переходную характеристику можно рассматривать совместно с полосой пропускания усилителя, т. е. разбить на два участка:

- переходная характеристика для малых интервалов времени и частотная характеристика в области высоких частот;
- переходная характеристика для больших интервалов времени и частотная характеристика в области низких частот.

При усилении импульса прямоугольной формы искажения в области высоких частот приводят к искажению фронта импульса. При усилении импульса прямоугольной формы искажения в области низких частот приводят к искажению вершины импульса. Чем шире полоса пропускания усилителя, тем меньше искажение импульса на выходе. Для расширения полосы пропускания усилителя в схему вводят специальные цепи частотной коррекции.

На длительность фронта импульса влияет паразитная емкость каскада

$$C_0 = C_{\text{вых}} + C_{\text{вх}} + C_{\text{м}}, \quad (9.3)$$

где  $C_{\text{вых}}$ -выходная емкость транзистора,

$C_{\text{вх}}$ - входная емкость транзистора,

$C_{\text{м}}$ -емкость монтажа.

На спад вершины импульса влияет емкость переходного конденсатора  $C_3$  (рисунок 1). Чтобы ослабить влияние этих емкостей на форму импульса, применяется коррекция в области высоких и низких частот, путем введения в схему дополнительных элементов (рисунок 2).

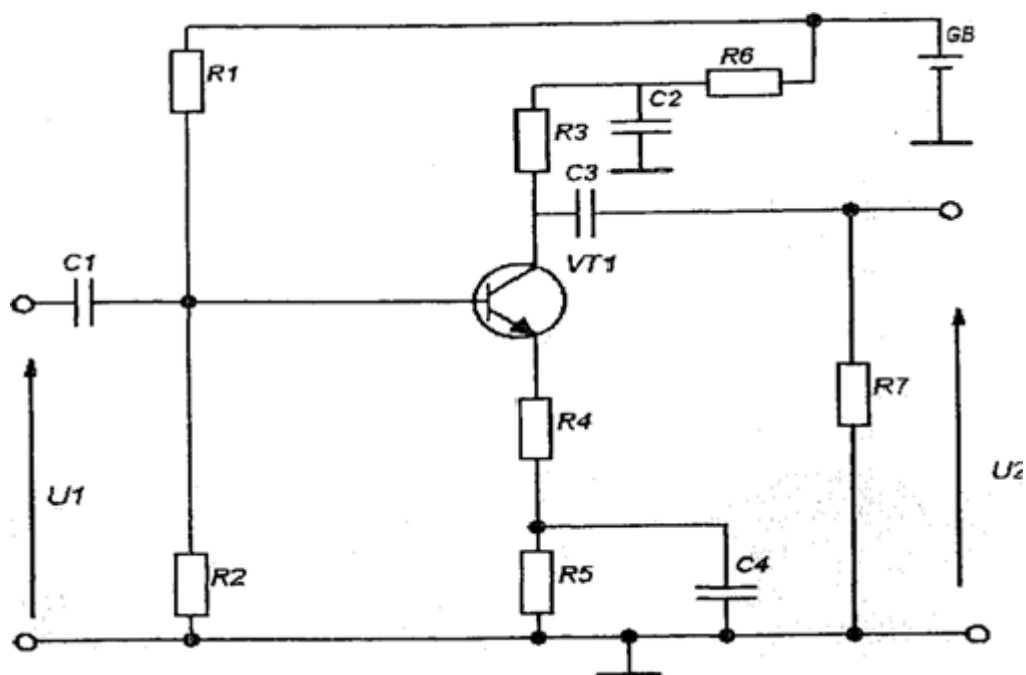


Рисунок 4- Схема импульсного усилителя с коррекцией

Для подъема частотной характеристики на низких частотах и компенсации частотных и фазовых искажений, в коллекторную цепь транзистора

включают корректирующий фильтр R6, C2. Условием НЧ коррекции является

$$R3 \cdot C2 = R7 \cdot C3 \quad (9.4)$$

Частотная коррекция в области высоких частот производится с помощью ООС за счет R4, не заблокированного конденсатором. Введение ООС обеспечивает получение более стабильного коэффициента усиления усилителя и расширяет полосу пропускания усилителя.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы, параметры, характеристики импульсных усилителей.

2 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

3 Соберите схему импульсного усилителя (рисунок 5).

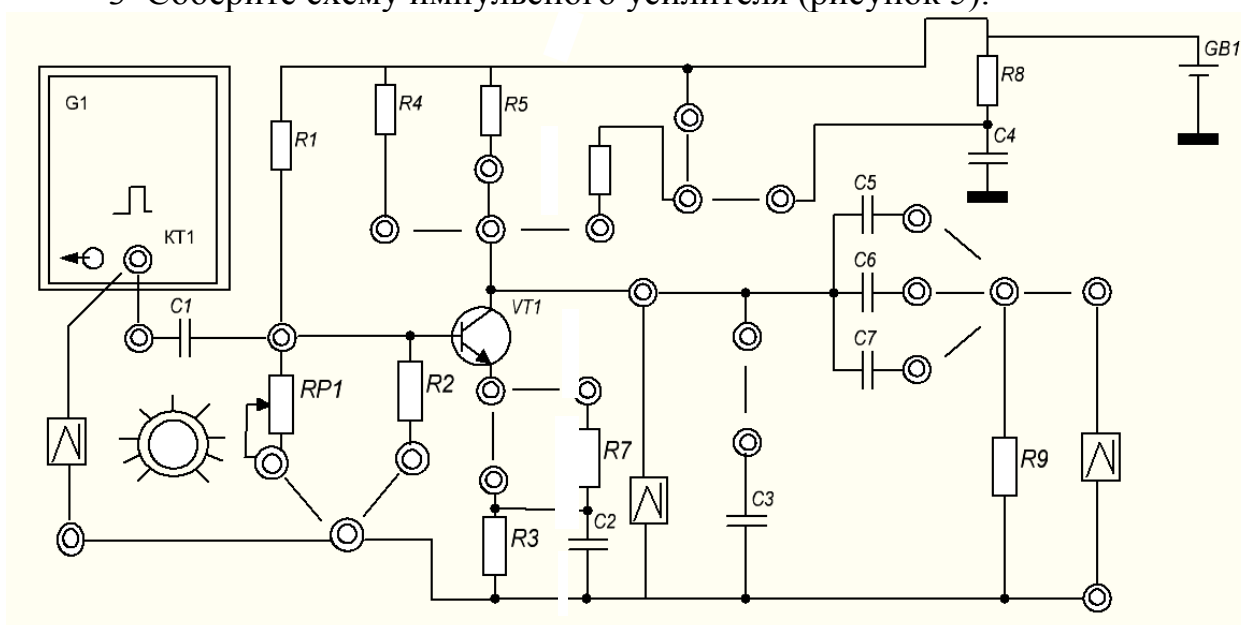


Рисунок 5- Схема импульсного усилителя

4 Включите стенд.

5 Последовательно подключая осциллограф к контрольным точкам от входа до выхода схемы усилителя КТ1, КТ2, КТ3, КТ4 зарисуйте осциллограммы.

6 Измерьте на выходе усилителя (КТ4) длительность фронта  $t_f$ , абсолютный спад вершины  $\Delta U$ , амплитуду  $U_m$  и длительность среза  $t_c$  импульса.

7 Рассчитайте G по формуле (9.2).

8 Определите влияние емкости переходного конденсатора на нижнюю граничную частоту. С помощью КЗП поочередно подключайте в схему конденсаторы C5, C6, C7. Измерьте с помощью осциллографа G. Сравните измеренные значения G и сделайте выводы. Зарисуйте осциллограммы, снятые в КТ4 для каждого конденсатора C5, C6, C7.

9 Восстановите схему согласно рисунку 6. Определите влияние паразитной емкости на верхнюю граничную частоту. С помощью КЗП подключите в схему конденсатор С3 и измерьте длительность фронта импульса на выходе усилителя. Сравните  $t_f$  с подключенным конденсатором и без него. Сделайте вывод. Зарисуйте осциллограммы, сняты е при подключенном и отключенном С3 на одних осях координат.

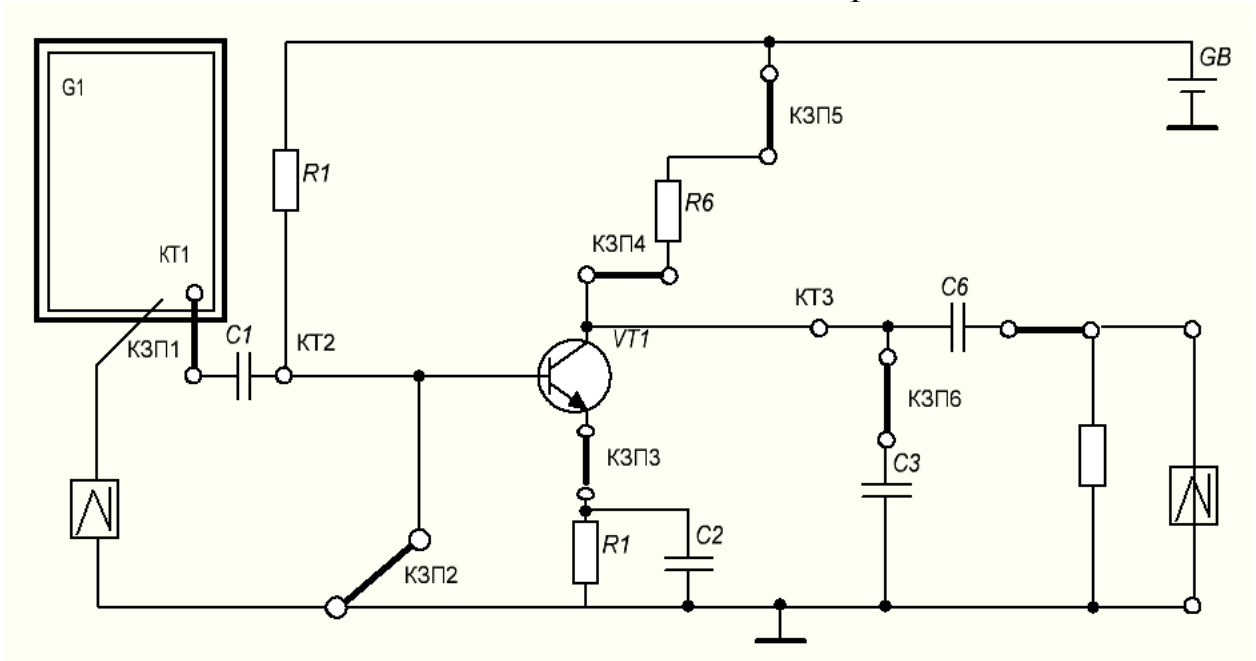


Рисунок 6- Схема импульсного усилителя

10 Восстановите схему согласно рисунку 6. Определите влияние положения рабочей точки (смещение на базе транзистора) на форму усиливаемого импульса. Отключите R2 и с помощью КЗП подключите RP1, убедитесь во влиянии положения рабочей точки на форму усиленного импульса. Сделайте вывод.

11 Восстановите схему согласно рисунку 6. Определите влияние сопротивления коллекторной нагрузки на коэффициент усиления усилителя. С помощью осциллографа измерьте амплитуду сигнала на входе усилителя и на выходе. Определите коэффициент усиления усилителя по формуле:

$$K_u = U_{m \text{ вых}} / U_{m \text{ вх}}. \quad (9.5)$$

12 Подключая поочередно резисторы R3 и R5 в схему с помощью КЗП определите коэффициенты усиления усилителя. Учитывая, что  $R_5 > R_6 > R_4$  и сравните коэффициент усиления при разных коллекторных нагрузках, сделайте выводы.

### 3 Содержание отчета

1 Тема, цель работы, схема (рисунок 5).

2 Осциллограммы в контрольных точках КТ1, КТ2, КТ3, КТ4.



3 Измеренные величины  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  при подключении конденсаторов  $C_5$ ,  $C_6$ ,  $C_7$ .

4 Осциллограммы выходного напряжения усилителя с конденсатором  $C_3$  и без него.

5 Расчет коэффициента усиления.

6 Выводы по работе.

#### ***4 Контрольные вопросы***

1 Дайте определение какие усилители называют импульсными.

2 Объясните назначение элементов схемы в импульсном усилителе.

3 Перечислите параметры импульсных усилителей.

4 Опишите параметры, пользуясь временной диаграммой напряжения.

## Лабораторная работа №10 Исследование LC-генератора

**Цель работы:** исследование схем, основных параметров и характеристик LC-генератора.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### 1 Краткие теоретические сведения

Электронным генератором называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию незатухающих колебаний требуемой формы частоты и мощности.

Условия самовозбуждения:

1. Баланс амплитуд  $K_u \beta = 1$ , т. е. ослабление сигнала, вносимое звеном ПОС должно компенсироваться усилителем.
2. Баланс фаз  $\varphi_y + \varphi_\beta = 2\pi n$ , где  $n=0, 1, 2, 3, \dots$ . Сдвиг фаз в замкнутой цепи автоколебательной системы  $= 2\pi n$ .

### LC-генератор на ИМС

Колебательный LC-контур включается между выходом ОУ и неинвертирующим входом, обеспечивая нужную ПОС. В цепь ООС для стабилизации амплитуды генерируемых колебаний включают терморезистор R с отрицательным ТКР.

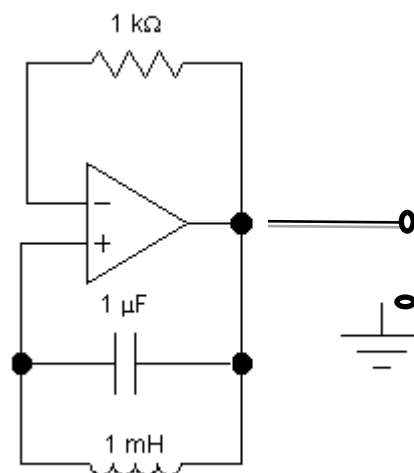


Рисунок 1 - LC-автогенератор синусоидальных напряжений на ОУ

Увеличение амплитуды колебаний вызывает уменьшение сопротивления терморезистора. При этом увеличивается глубина ООС, приводящая к уменьшению амплитуды колебаний.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Зарисуйте схему LC-генератора (рисунок 2).

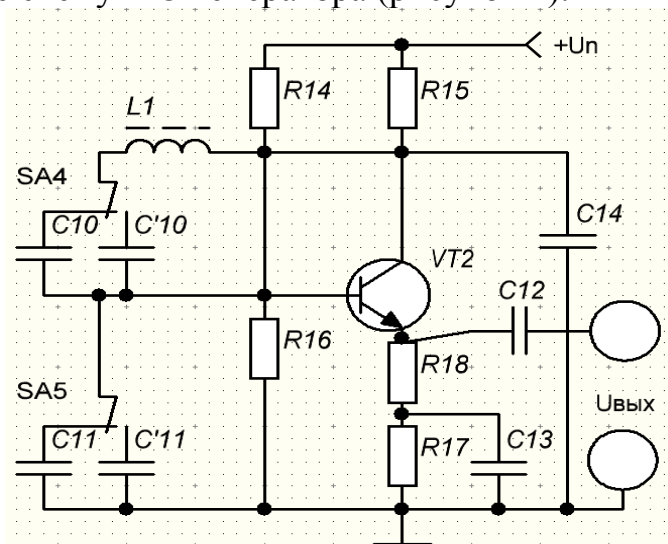


Рисунок 2 – Схема LC-генератора на транзисторе

- 2 Подключите осциллограф на выход и подайте напряжение на стенд.
- 3 Изменяя положение  $SA_5$  добейтесь самовозбуждения генератора.
- 4 При различных конденсаторах  $C_{10}$  и  $C'_{10}$  (изменить с помощью  $SA_4$ ) осциллографом измерьте период  $T$ . Данные запишите в таблицу 1.

Таблица 1- Результаты измерений

	фэксп, Гц	$T$ , мкс	$U_m$ , В
$C_{10}$			
$C'_{10}$			

- 5 Определите частоту генератора, если  $L=5\text{мГн}$ .
- 6 Зарисуйте временные диаграммы работы LC-генератора.

## 3 Содержание отчета

- 1 Тема, цель работы, схема (рисунок 2).
- 2 Условия самовозбуждения генератора.
- 3 Осциллограммы выходного напряжения.
- 4 Таблица 1, расчеты.
- 5 Выводы по работе.

#### ***4 Контрольные вопросы***

- 1 Объясните смысл баланса амплитуд и баланса фаз.
- 2 Объясните какой из ОС не пользуются в LC-генераторе для создания незатухающих колебаний. Дайте определение ПОС.
- 3 Объясните от каких элементов схемы зависит частота генерируемых колебаний.
- 4 Перечислите какие генераторы гармонических колебаний вы знаете.

## Лабораторная работа №11

### Исследование RC-генератора на биполярных транзисторах

**Цель работы** исследование схем, основных параметров и характеристик RC-генераторов гармонических колебаний.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

#### 1 Краткие теоретические сведения

Автогенераторы гармонических колебаний АГК преобразуют энергию источников питания в энергию незатухающих синусоидальных колебаний на выходе. Они содержат активный элемент АЭ и частотно-избирательный четырехполюсник ЧИЧ. В качестве АЭ а АГК широко используются транзисторы и операционные усилители, а в качестве ЧИЧ в области низких частот (звуковой диапазон) RC-четырёхполюсники: мост Вина, трехзвенные RC-цепочки дифференцирующего и интегрирующего типов.

На рисунке 1 показана структура простейшего автогенератора, который строится по кольцевой схеме с положительной обратной связью ПОС.

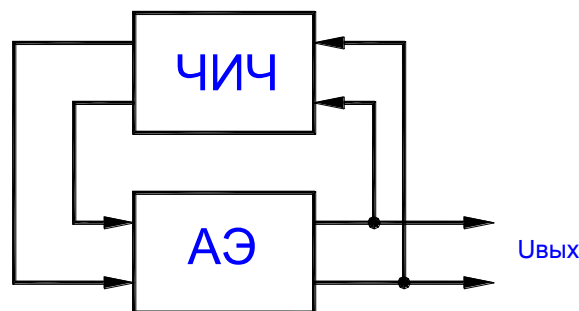


Рисунок 1- Схема простейшего генератора

Частота, генерируемая RC-автогенератором, называется квазирезонансной, так как ЧИЧ на RC-элементах не обладают резонансными свойствами, как, например, LC-контур.

Коэффициент усиления усилителя, охваченного ПОС, равен

$$K_{ипос} = K_u / (1 - K_u * K_{чич}), \quad (11.1)$$

где  $K_u$  - коэффициент усиления усилителя без ПОС;

$K_{чич}$  - коэффициент передачи ЧИЧ.

Для того чтобы при подаче на схему автогенератора напряжения питания на его выходе генерировались гармонические колебания, необходимо обеспечить выполнение условий самовозбуждения генератора:

$$K_u * K_{чич} > 1; \quad (11.2)$$

$$f_u + f_{чич} = 2nN, \quad (11.3)$$

где  $N = 0, 1, 2, 3...$

Эти условия означают, что для осуществления незатухающих автоколебаний на выходе необходимо, чтобы потери, вносимые ЧИЧ, компенсировались усилителем, т.е. выполнялся баланс амплитуд, а создаваемый усилителем и ЧИЧ в кольцевой схеме суммарный сдвиг фаз был равен нулю или кратен  $2\pi$ , т.е. выполнялся баланс фаз.

Условия самовозбуждения должны выполняться лишь на частоте генерируемых колебаний  $\omega = \omega_0$ . По принципу построения RC-автогенераторы подразделяются на две основные группы:

- автогенераторы без поворота фазы сигнала в цепи ОС;
- автогенераторы с поворотом фазы сигнала в цепи ОС.

### **RC-генераторы с поворотом фазы в цепи ОС**

Такой автогенератор (рисунок 2) в качестве ЧИЧ содержит 3-звенную RC-цепочку дифференцирующего или интегрирующего типа.

Поскольку ЧИЧ такого типа на частоте квазирезонанса  $\omega_0$  сдвигает фазу на 180 градусов, генератор содержит однокаскадный усилитель на транзисторе, включенный по схеме с общим эмиттером. Данный усилитель также сдвигает фазу сигнала на 180 градусов. Вход усилителя с помощью ЧИЧ соединен со входом, образуя кольцевую схему с ПОС. Режим работы усилителя по постоянному току обеспечивается делителем  $R_1, R_2$  и резистором  $R_э$  в эмиттерной цепи транзистора. Одновременно параллельно включенные по переменному току резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют третье сопротивление цепочечного ЧИЧ, т.е.

$$R = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2). \quad (11.4)$$

При обеспечении коэффициента усиления усилителя  $K_u > 29$  потери в цепочечном четырехполюснике компенсируются, схема самовозбуждается и генерирует синусоидальные колебания с частотой

$$f_r = 1 / (\sqrt{6} * 2n * R * C). \quad (11.5)$$

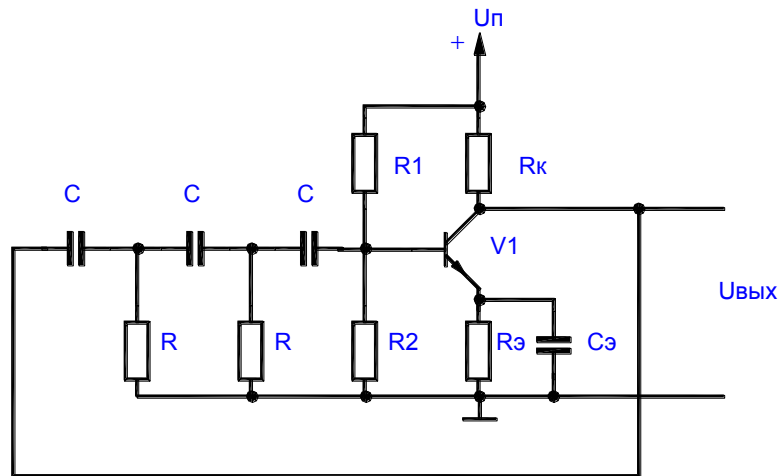


Рисунок 2-Генератор на транзисторах

Величина емкости определяется из выражения

$$C = 1/(\sqrt{6} * 2n * R * fr). \quad (11.6)$$

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы RC-автогенераторов с ЧИЧ различного типа и особенности их схемной реализации.

2 Нарисовать исследуемую схему генератора (рисунок 3).

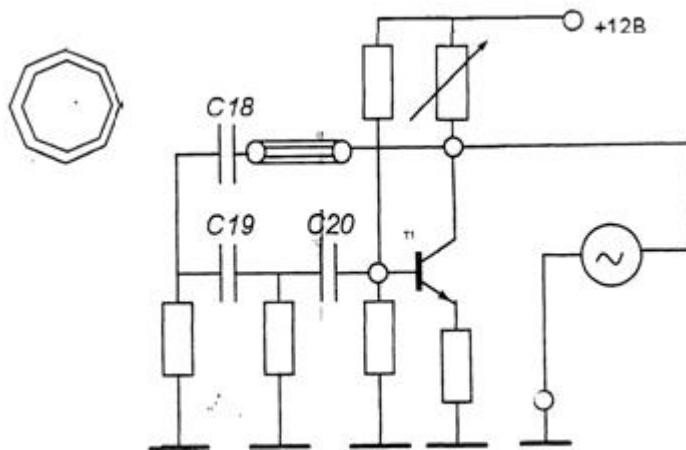


Рисунок 3- Схема генератора на транзисторе

3 Ознакомиться с порядком сборки схем на стенде.

4 Снять и зарисовать осциллограммы выходного сигнала генератора при

а)  $k\beta=1$

б)  $k\beta>1$

в)  $k\beta < 1$

5 Настроить схему, так чтобы выполнялись условия баланса амплитуд и баланса фаз и измерить амплитуду сигнала, период и частоту.

6 Объяснить почему при  $k\beta < 1$  выходной сигнал отличен от нуля.

### ***3 Содержание отчета***

1 Тема, цель работы, схема (рисунок 3).

2 Условия самовозбуждения генератора.

3 Осциллограммы выходного напряжения.

4 Результаты измерений.

5 Выводы по работе.

### ***4 Контрольные вопросы***

1 Сформулируйте условия самовозбуждения RC-автогенераторов.

2 Нарисуйте схемы четырехполюсников, используемых в RC-автогенераторах.

3 Как можно повысить стабильность частоты и амплитуды автогенераторов?

4 Дайте сравнительную оценку RC-автогенераторов на биполярных транзисторах и ОУ.



## Лабораторная работа №12 Исследование RC-генератора на ОУ

**Цель работы:** изучение принципа работы, основных параметров, характеристик, условий самовозбуждения RC-автогенераторов гармонических колебаний и их схемной реализации.

**Оснащение рабочего места:** учебный лабораторный стенд, осциллограф цифровой, мультиметр.

### 1 Краткие теоретические сведения

Автогенераторы гармонических колебаний АГК преобразуют энергию источников питания в энергию незатухающих синусоидальных колебаний на выходе. Они содержат активный элемент АЭ и частотно-избирательный четырехполюсник ЧИЧ. В качестве АЭ а АГК широко используются транзисторы и операционные усилители, а в качестве ЧИЧ в области низких частот (звуковой диапазон) RC-четырёхполюсники: мост Вина, трехзвенные RC-цепочки дифференцирующего и интегрирующего типов.

На рисунке 1 показана структура простейшего автогенератора, который строится по кольцевой схеме с положительной обратной связью ПОС.

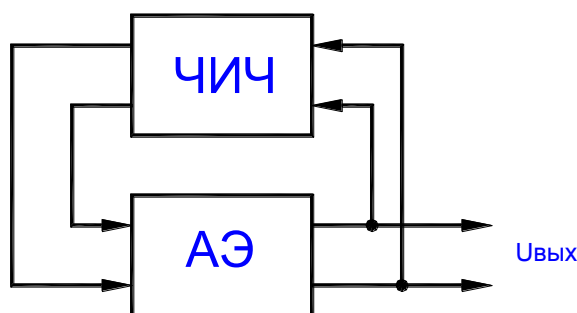


Рисунок 1- Схема простейшего генератора

Частота, генерируемая RC-автогенератором, называется квазирезонансной, так как ЧИЧ на RC-элементах не обладают резонансными свойствами, как, например, LC-контур.

Коэффициент усиления усилителя, охваченного ПОС, равен

$$K_{пос} = K_u / (1 - K_u * K_{чич}), \quad (12.1)$$

где  $K_u$  - коэффициент усиления усилителя без ПОС;

$K_{чич}$  - коэффициент передачи ЧИЧ.

Для того чтобы при подаче на схему автогенератора напряжения питания на его выходе генерировались гармонические колебания, необходимо обеспечить выполнение условий самовозбуждения генератора:

$$K_u * K_{чич} > 1; \quad (12.2)$$

$$f_u + f_{чич} = 2nN, \quad (12.3)$$

где  $N = 0, 1, 2, 3 \dots$

Эти условия означают, что для осуществления незатухающих автоколебаний на выходе необходимо, чтобы потери, вносимые ЧИЧ, компенсировались усилителем, т.е. выполнялся баланс амплитуд, а создаваемый усилителем и ЧИЧ в кольцевой схеме суммарный сдвиг фаз был равен нулю или кратен  $2\pi$ , т.е. выполнялся баланс фаз.

Условия самовозбуждения должны выполняться лишь на частоте генерируемых колебаний  $\omega = \omega_0$ . По принципу построения RC-автогенераторы подразделяются на две основные группы:

- автогенераторы без поворота фазы сигнала в цепи ОС;
- автогенераторы с поворотом фазы сигнала в цепи ОС.

### RC-автогенераторы без поворота фазы в цепи ОС

В данном варианте автогенератора, (рисунок 2) в качестве ЧИЧ используется мост Вина. Поскольку на частоте квазирезонанса  $\omega_0$  мост Вина дает сдвиг фаз, равный нулю, то для баланса фаз выход ЧИЧ связан с неинвертирующим входом ОУ. Элементы ООС  $R_1, R_2$  повышают стабильность работы генератора. Переменный резистор  $R_1$  изменяет глубину ООС.

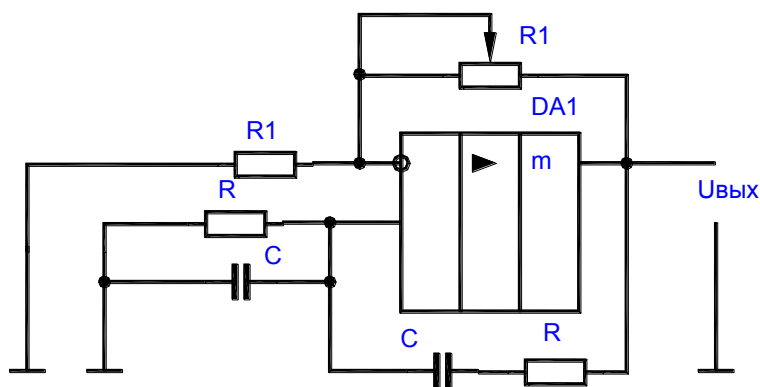


Рисунок 2 – RC-автогенераторы без поворота фазы в цепи ОС

Основные расчетные соотношения для данной схемы:

$$Fr = f0 = 1/(2n * R * C); K_{чич} = 1/3; C = 1/(2n * R * fr). \quad (12.4)$$

## 2 Порядок выполнения работы

1 Изучить принцип работы RC-автогенераторов с ЧИЧ различного типа и особенности их схемной реализации.

2 Нарисовать исследуемую схему генератора (рисунок 3).

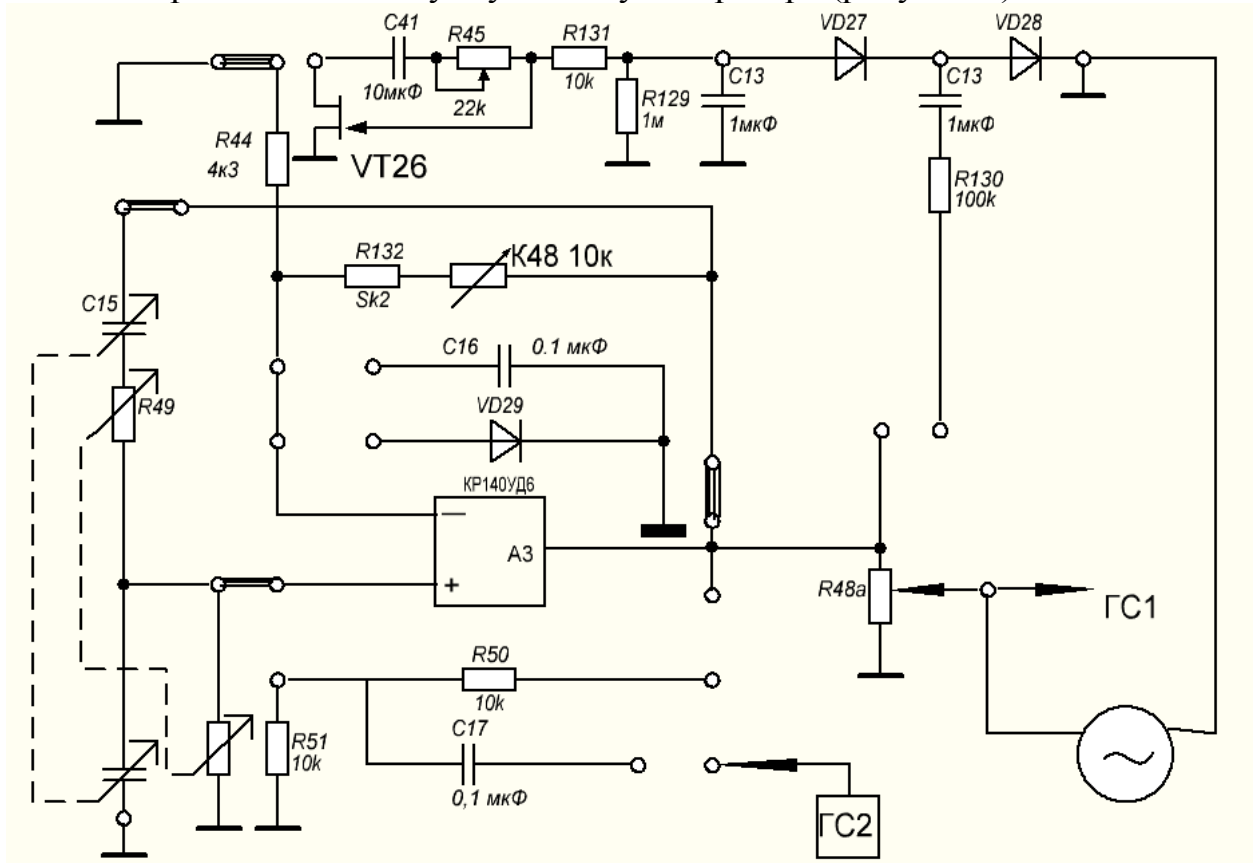


Рисунок 3- Схема генератора с мостом Вина

- 3 Соберите схему автогенератора, представленную на рисунке 3.
- 4 Снять и зарисовать осциллограммы выходного сигнала генератора при
  - а)  $k\beta=1$
  - б)  $k\beta>1$
  - в)  $k\beta<1$
- 5 Настроить схему, так чтобы выполнялись условия баланса амплитуд и баланса фаз и измерить амплитуду сигнала, период и частоту.

## 3 Содержание отчета

- 1 Тема, цель работы, схема (рисунок 3).
- 2 Условия самовозбуждения генератора.
- 3 Осциллограммы выходного напряжения.
- 4 Результаты измерений.
- 5 Выводы по работе.

#### **4 Контрольные вопросы**

- 1 Сформулируйте условия самовозбуждения RC-автогенераторов.
- 2 Нарисуйте схемы четырехполосников, используемых в RC-автогенераторах.
- 3 Поясните, как можно повысить стабильность частоты и амплитуды Автогенераторов.
- 4 Дайте сравнительную оценку RC-автогенераторов на биполярных транзисторах и ОУ.

## Практическая работа №1

### Расчет усилителя по постоянному току

**Цель работы:** сформировать умения определять порядок проведения расчета усилителя в соответствии с заданными режимами (по постоянному току) и требуемыми параметрами.

#### Оснащение рабочего места:

- методические указания по выполнению практической работы;
- индивидуальные задания.

#### 1 Порядок выполнения работы

1 Рассчитать по постоянному току усилитель по схеме с базовым делителем и эмиттерной термостабилизацией, работающей в классе А:

- ознакомиться с заданной электрической схемой устройства (рисунок 1) и определить порядок проведения расчета по индивидуальному заданию (приложение А);

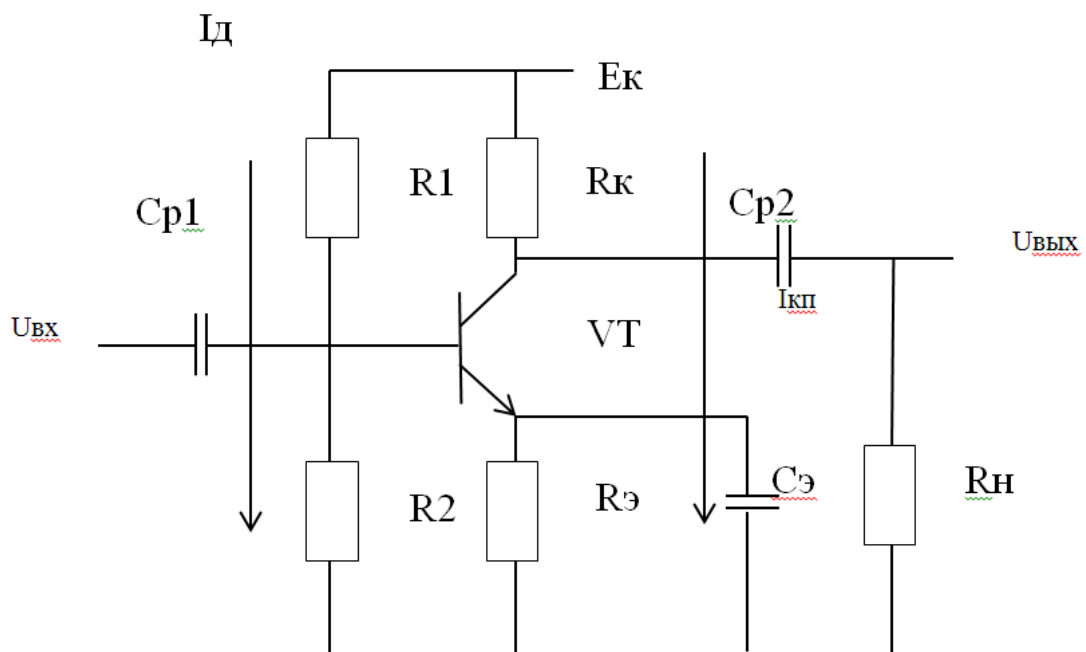


Рисунок 1 - Усилитель с эмиттерной термостабилизацией

- выбрать  $E_k$ ;
- задать режим работы по постоянному току.

- представить описание назначения каждого элемента усилителя с эмиттерной термостабилизацией;
- выполнить расчет резисторов схемы.

В целях экономичности и получения удовлетворительной температурной стабильности напряжение  $U_{R3}$  выбирают в пределах  $U_{R3} = (0,1 - 0,2)E_k$ .

Расчет  $R_k$  осуществляем по формуле

$$R_k = \frac{E_k - U_{R3} - U_{кзп}}{I_{кп}} \quad (1.1)$$

89

Расчет  $R_2$  осуществляем по формуле

$$R_2 = \frac{U_{бзп} + U_{R3}}{I_d} \quad (1.2)$$

Задаем  $U_{бзп} = (1 - 2)B$ .

Расчет  $R_1$  осуществляем по формуле

$$R_1 \approx \frac{E_k - (U_{бзп} + U_{R3})}{I_d}, \quad (1.3)$$

где  $I_d$  – ток, протекающий через делитель  $R_1, R_2$ .

Ток делителя в маломощных каскадах предварительного усиления выбирают из условия  $I_d = (2 - 5)I_{бп}$ , а в мощных каскадах - из условия  $I_d = (6 - 10)I_{бп}$ .

Расчет  $R_3$  осуществляем по формуле

$$R_3 = \frac{U_{R3}}{I_{кп} \approx I_{зп}} \quad (1.4)$$

- найденные сопротивления приводим к номинальному значению по таблице стандартизированных рядов (таблица 1.1).

Для выбора резистора определяем мощность, рассеиваемую на резисторе, например, по формуле

$$P = I_{кп}^2 \cdot R_k \quad (1.5)$$

В радиоэлектронной аппаратуре наибольшее распространение получили непроволочные резисторы на номинальной мощности 0,125; 0,25; 0,5; 1 и 2 Вт.

Резистор выбирают так, чтобы его номинальная мощность была на 20-30% больше полученной при расчете.

Таблица 1- Номиналы резисторов

Допустимые отклонения от номинальных величин сопротивлений					
$E_{24} \pm 5\%$	$E_{12} \pm 10\%$	$E_6 \pm 20\%$	$E_{24} \pm 5\%$	$E_{12} \pm 10\%$	$E_6 \pm 20\%$
Ом, десятки Ом, кОм, десятки кОм, сотни кОм, Мом, десятки МОм					
1,0	1,0	1,0	3,3	3,3	3,3
1,1			3,6		
1,2	1,2		3,9	3,9	
1,3			4,3		
1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7
1,6			5,1		
1,8	1,8		5,6	5,6	
2,0			6,2		
2,2	2,2	2,2	6,8	6,8	6,8
2,4			7,5		
2,7	2,7		8,2	8,2	
3,0			9,1		

ГОСТ 2825-67 устанавливает для резисторов шесть рядов номиналов сопротивлений  $E_6$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{24}$ ,  $E_{48}$ ,  $E_{96}$  и  $E_{192}$  (цифра указывает число номинальных сопротивлений в ряду).

- осуществляем выбор сопротивления по справочнику.

Например, номинальная мощность и диапазон номинальных сопротивлений для резисторов с металлодиэлектрическим проводящим слоем (МЛТ и ОМЛТ) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – МЛТ, ОМЛТ

Номинальная мощность, Вт	Диапазон номинальных сопротивлений, Ом
0,125	$8,2-3 \cdot 10^6$
0,25	$8,2-5,1 \cdot 10^6$
0,5	$1,0-5,1 \cdot 10^6$
1	$1,0-10 \cdot 10^6$
2	$1,0-10 \cdot 10^6$

Промежуточные значения номинальных сопротивлений для МЛТ соответствуют рядам  $E_{24}$  и  $E_{96}$  с допуском  $\pm 2,0$ ;  $\pm 5$ ;  $\pm 10$ ; для ОМЛТ – ряду  $E_6$  с допусками  $\pm 5$ ;  $\pm 10$  и ряду  $E_{96}$  с допуском  $\pm 2\%$ .

2 Оформить отчет.

3 Сделать выводы по работе.

4 Ответить на контрольные вопросы.

## **2 Содержание отчета**

- 1 Название цель работы.
- 2 Схема усилителя с эмиттерной термостабилизацией.
- 3 Назначение элементов схемы.
- 4 Расчет сопротивлений и выбор оптимального.
- 5 Расшифровка марки транзистора, УГО и определение электродных выводов.
- 6 Выводы по работе.

## **3 Контрольные вопросы**

- 1 Перечислите и охарактеризуйте классификацию усилителей в зависимости от способа смещения эмиттерного перехода?
- 2 Опишите назначение каждого элемента усилителя с эмиттерной стабилизацией.
- 3 Представьте порядок проведения расчета по постоянному току усилителя по схеме с базовым делителем и эмиттерной термостабилизацией, работающей в классе А.
- 4 Приведите методику выбора рабочей точки по статической характеристике транзистора.
- 5 Приведите методику выбора резисторов после расчета их сопротивлений.



## Приложение А

В таблице А1 представлены маркировки транзисторов малой и средней мощности для проведения расчета усилителя с эмиттерной термостабилизацией по постоянному току.

Таблица А1 – Маркировки транзисторов

Вариант	Маркировка транзистора
1	КТ201А
2	КТ201Б
3	КТ201В,Д
4	КТ201Г
5	КТ325А,Б
6	ГТ329А,Б,В,Г
7	ГТ330Д,Ж,И
8	КТ355А
9	КТ372А,Б,В
10	КТ3102А
11	КТ3102Б
12	КТ3102В
13	КТ3102Г
14	КТ3102Е
15	КТ3117А
16	КТ317А
17	КТ3123АМ
18	КТ3120А
19	КТ3127А
20	КТ3142А

## Практическая работа № 2

### Расчет коэффициента усиления усилителя на средних частотах (СЧ)

**Цель работы:** сформировать умения определять порядок проведения расчета коэффициента усиления усилителя на средних частотах (СЧ) в соответствии с заданными режимами и требуемыми параметрами.

#### Оснащение рабочего места:

- методические указания по выполнению практической работы;
- индивидуальные задания.

#### 1 Порядок выполнения работы

1 Провести расчет коэффициента усиления усилителя по индивидуальному заданию (таблица 1).

Таблица 1 – Исходные данные

Вариант	Задача	$R_{к, кОМ}$	$R_{н, кОМ}$	$h_{11, кОМ}$	$h_{21}$	$R_1, кОМ$	$R_2, кОМ$	$R_э, Ом$
1	1; 2,а; 3	0,5	2,0	1,1	10	6,0	2,0	100
2	1; 2,б; 3	0,7	2,2	1,3	20	6,5	2,5	110
3	1; 2,а; 3	0,9	2,4	1,5	30	7,0	3,0	120
4	1; 2,б; 3	1,0	2,6	1,7	40	7,5	3,5	130
5	1; 2,а; 3	0,6	2,1	1,2	50	8,0	4,0	140
6	1; 2,б; 3	0,8	2,3	1,4	60	6,0	3,5	150
7	1; 2,а; 3	1,1	2,5	1,6	10	6,5	3,0	160
8	1; 2,б; 3	0,6	2,0	1,1	20	7,0	2,5	170
9	1; 2,а; 3	0,8	2,2	1,3	30	7,5	2,0	180
10	1; 2,б; 3	1,1	2,4	1,5	40	8,0	2,5	190
11	1; 2,а; 3	0,5	2,6	1,7	50	6,0	2,0	200
12	1; 2,б; 3	0,7	2,1	1,2	60	6,5	2,5	100
13	1; 2,а; 3	0,9	2,3	1,4	10	7,0	3,0	110
14	1; 2,б; 3	1,0	2,5	1,6	20	7,5	3,5	120
15	1; 2,а; 3	0,8	2,0	1,1	30	8,0	4,0	130

Схема усилителя с эмиттерной термостабилизацией представлена на рисунке 1.

В приложении А представлена эквивалентная схема усилителя.

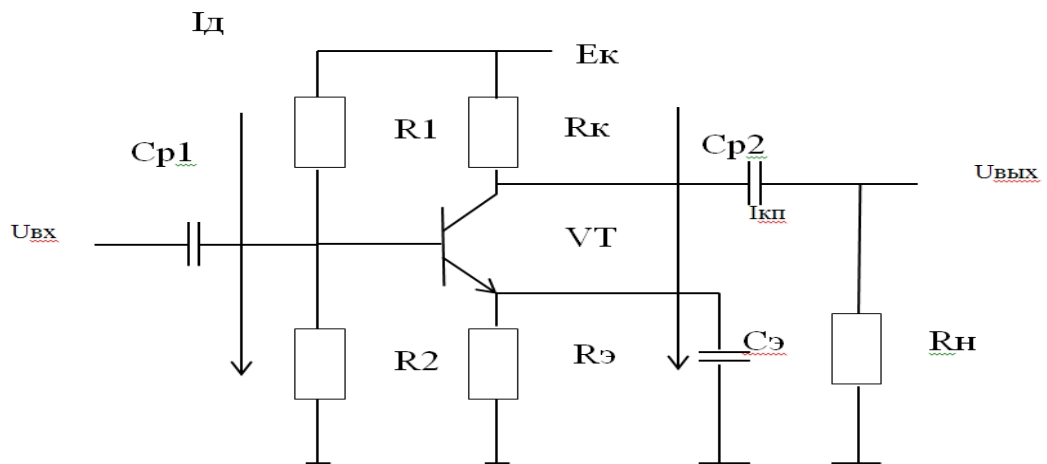


Рисунок 1 - Усилитель с эмиттерной термостабилизацией  
 В приложении А представлена эквивалентная схема усилителя.

**Задача № 1**

Определить  $K_I$  и  $K_U$  для усилителя на средних частотах, если известны  $R_k, R_n, h_{11}, h_{21}$ .

$$K_I = h_{21} \frac{R_k}{R_k + R_n}$$

$$K_U = K_I \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$$

**Задача № 2**

а) Определить  $K_U$  с эмиттерной термостабилизацией без шунтирующей  $C_э$ , если известны  $R_э, R_k, h_{11}, h_{21}$ .

б) Определить  $K_U$  с эмиттерной термостабилизацией с шунтирующей  $C_э$ , если известны  $R_э, R_k, h_{11}, h_{21}$ .

$$K_I = h_{21}$$

$$K_U = K_I \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$$

**Задача № 3**

Определить на сколько изменится  $K_U$  с элементами:  $R_k, R_2, R_1$ , если ввести  $R_э, h_{11}, h_{21}$ .

а) без  $R_э$ ;

б) с  $R_э$ .

$$K_U = K_I \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$$

$$K_I = h_{21}$$

2 Оформить отчет.

3 Сделать выводы по работе.

4 Ответить на контрольные вопросы.

## **2 Содержание отчета**

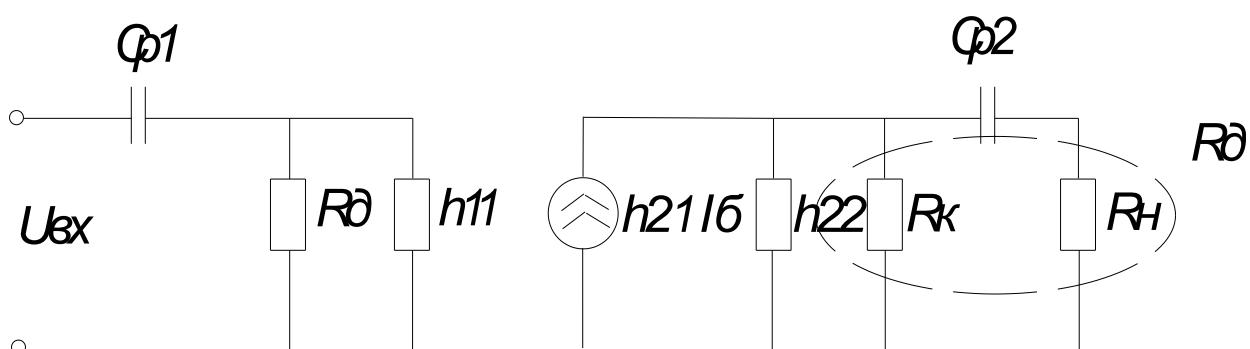
- 1 Название цель работы.
- 2 Схема усилителя с эмиттерной термостабилизацией.
- 3 Эквивалентная схема усилителя
- 4 Расчет коэффициента усиления усилителя по индивидуальному заданию.
- 5 Выводы по работе.

## **3 Контрольные вопросы**

- 1 Опишите назначение каждого элемента усилителя с эмиттерной стабилизацией.
- 2 Докажите наличие термостабилизации режима в усилителе с эмиттерной стабилизацией.
- 3 Опишите назначение конденсаторов в цепях эмиттера транзисторного усилителя?
- 4 Представьте порядок проведения расчета коэффициента усиления усилителя на средних частотах.
- 5 Определите  $R_{\text{вых}}$  с учетом  $R_{\text{н}}$  и без учета.
- 6 Определите  $R_{\text{вх}}$  с учетом делителя.
- 7 Определите  $R_{\text{вх}}$  без учета делителя.

## Приложение А

### Эквивалентная схема усилителя



При расчете коэффициента усиления усилителя на СЧ:

а)  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  выбирают таким образом, чтобы их сопротивления были равны нулю:  $X_{p1}=0$  и  $X_{p2}=0$ ;

б)  $h_{22}$  можно пренебречь;

в)  $R_{д}$  определяют по следующей формуле

$$R_{д} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

г) если  $R_{д}$  отсутствует, то  $R_{вх} = h_{11}$ .

### Задача № 1

Определить  $K_I$  и  $K_U$  для усилителя на средних частотах, если известны  $R_K$ ,  $R_H$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ .

$$K_I = h_{21} \frac{R_K}{R_K + R_H}$$

$$K_U = K_I \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$$

$$R_{\text{ВХ}} = h_{11}$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_K || R_H$$

### Задача № 2

а) Определить  $K_U$  с эмиттерной термостабилизацией без шунтирующей  $R_3$ , если известны  $R_K$ ,  $R_H$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ .

б) Определить  $K_U$  с эмиттерной термостабилизацией с шунтирующей  $R_3$ , если известны  $R_3$ ,  $R_K$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ .

$$K_I = h_{21}$$

$$K_U = K_I \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$$

а)

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_K$$

$$R_{\text{ВХ}} = h_{11} + h_{21} \cdot R_3$$

б)

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_K$$

$$R_{\text{ВХ}} = h_{11}$$

### Задача № 3

Определить на сколько изменится  $K_U$  с элементами:  $R_K$ ,  $R_2$ ,  $R_1$ , если ввести  $R_3$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ .

а) без  $R_3$ ;

б) с  $R_3$ .

$$K_U = K_I \frac{R_{\text{ввх}}}{R_{\text{вх}}}$$

$$K_I = h_{21}$$

а)

$$R_{\text{ввх}} = R_{\text{к}}$$

$$R_{\text{вх}} = h_{11} || (R_2 || R_1)$$

$$R_{\text{вх}} = h_{11} || R_{\text{д}}$$

$$R_{\text{д}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

б)

$$R_{\text{вх}} = (h_{11} + h_{21}R_3) || (R_1 || R_2)$$

$$R_{\text{вх}} = (h_{11} + h_{21}R_3) || R_{\text{д}}$$

$$R_{\text{д}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## **Практическая работа № 3**

### **Расчет схем на базе ОУ**

**Цель работы:** сформировать умения определять порядок проведения расчета схем на базе ОУ в соответствии с определенными требованиями, предъявляемыми к их параметрам и характеристикам.

#### **Оснащение рабочего места:**

- методические указания по выполнению практической работы;
- индивидуальные задания.

#### **1 Краткие теоретические сведения**

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, предназначенный для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: их усиление или ослабление, сложение или вычитание, интегрирование или дифференцирование, логарифмирование или потенцирование их формы и др.

Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей положительной и отрицательной обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости и индуктивности, диоды, стабилитроны, транзисторы и некоторые другие электронные элементы.

Современный ОУ выполняется на базе интегральной микросхемы ОУ, к выводам которой присоединяются источники питания, входных сигналов, сопротивление нагрузки, цепи обратной связи, коррекции частотных характеристик ОУ и другие цепи.

#### **Инвертирующий усилитель**

Инвертирующий усилитель представлен на рисунке 1. Источником схемы на базе ОУ входного сигнала инвертирующего усилителя служит генератор, который подключается к инверсному входу ОУ и имеет внутреннее сопротивление, равной  $R_1$ . Напряжение обратной связи с выхода ОУ через резистор  $R_{oc}$  подается на инверсный вход, прямой вход ОУ заземляется.



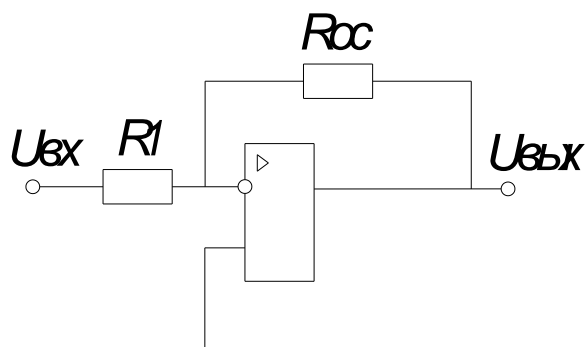


Рисунок 1 – Инвертирующий усилитель

Исходя из идеализированной схемы ОУ, полагаем, что в линейном режиме напряжения на входах ОУ одинаковы, то есть  $U_{\approx}0$ . Поэтому  $I_{вх}$  рассчитывается по формуле

$$I_{вх} \approx \frac{U_{вх}}{R_1}, \quad (3.1)$$

где  $I_{вх}$ - входной ток, мА;

$U_{вх}$ -входное напряжение, В.

$U_{вых}$  рассчитывается по формуле

$$U_{вых} \approx I_{ос} \cdot R_{ос}, \quad (3.2)$$

где  $U_{вых}$  – выходное напряжение, В;

$I_{ос}$ - ток обратной связи, мА;

$R_{ос}$ -сопротивление обратной связи, кОм.

Так как входное сопротивление идеализированного ОУ равно бесконечности,  $I_{вх}=I_{ос}$ , откуда получаем

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \approx -\frac{R_{ос}}{R_1} \quad (3.3)$$

Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель представлен на рисунке 3.2.

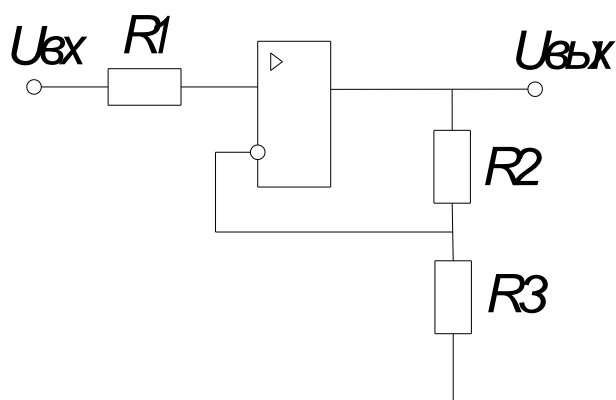


Рисунок 2 – Неинвертирующий усилитель

Напряжение входного сигнала подается на прямой, а напряжение обратной связи – на инверсный вход ОУ. Напряжение обратной связи на входе ОУ

$$U_- = \frac{U_{\text{вых}} \cdot R_2}{(R_2 + R_3)} \quad (3.4)$$

В идеализированном ОУ в линейном режиме  $I_{\text{вх}}=0$ , а  $U_+ \approx U_-$ , поэтому

$$U_{\text{вх}} = U_+ = \frac{U_{\text{вых}} \cdot R_2}{(R_2 + R_3)} \quad (3.5)$$

Откуда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя  $K_u$  рассчитывается по формуле

$$K_u = \frac{(R_2 + R_3)}{R_2} = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (3.6)$$

Суммирующее устройство

На рисунке 3 представлен усилитель на ОУ, в котором происходит сложение двух сигналов.

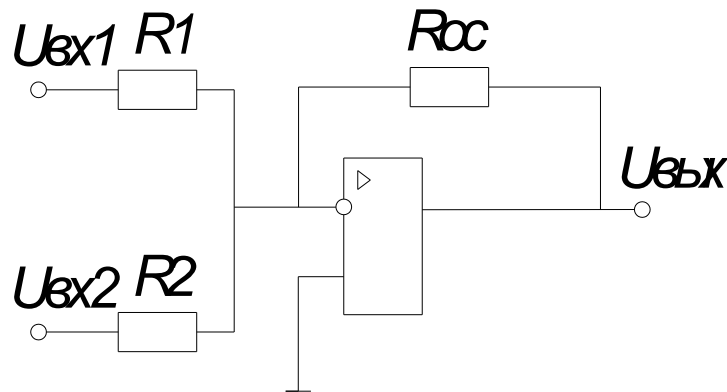


Рисунок 3 – Усилитель на ОУ, в котором происходит сложение двух сигналов

Для сложения аналоговых сигналов можно использовать инвертирующий усилитель, в котором на инверсный вход ОУ подается несколько напряжений, подлежащих сложению. Поскольку в этой схеме снова полагаем, что  $U_+ \approx U_- = 0$ , входные токи  $I_1$  и  $I_2$  определяются следующими соотношениями

$$I_1 \approx \frac{U_1}{R_1} \quad (3.7)$$

$$I_2 \approx \frac{U_2}{R_2} \quad (3.8)$$

Так как входной ток ОУ равен нулю, то

$$I_{\text{oc}} \approx I_1 + I_2 \quad (3.9)$$

Выходное сопротивление рассчитывается по формуле

$$U_{\text{вых}} = - \left( \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} \cdot U_{\text{вх1}} + \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} \cdot U_{\text{вх2}} \right) \quad (3.10)$$

То есть в рассматриваемом случае  $U_{\text{ВЫХ}}$  есть инвертируемая взвешенная сумма  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ , а весовые коэффициенты слагаемых определяются отношением соответствующих сопротивлений. При  $R_1 = R_2 = R$   $U_{\text{ВЫХ}}$  рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{R_{\text{ОС}}}{R}\right) \cdot (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}}) = K_u (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}}) \quad (3.11)$$

и схема, показанная на рисунке 3.3, превращается в простой сумматор.

Вычитающее устройство

Напряжение  $U_{\text{ВХ1}}$  подается на инверсный вход ОУ, а  $U_{\text{ВХ2}}$  - на прямой. С помощью резистора  $R_{\text{ОС}}$  осуществляется отрицательная обратная связь (ООС). В этой схеме (рисунок 4)

$$U_+ = \frac{U_{\text{ВХ2}} \cdot 2R_4}{(R_2 = R_4)} \quad (3.12)$$

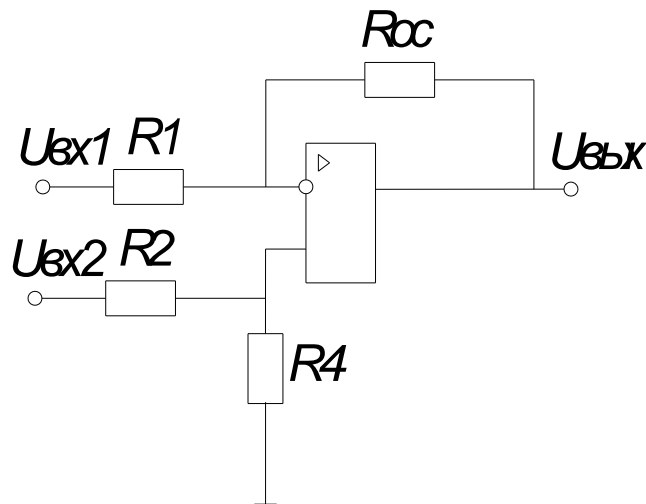


Рисунок 3.4 – Схема вычитающего устройства

Для идеализированного ОУ, у которого  $U_- = U_+$ , а  $i_i = i_{\text{ОС}}$ ,

$$i_i = \frac{U_{\text{ВХ1}} - U_-}{R_i} = \frac{U_{\text{ВХ1}} - U_+}{R_i}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_+ - \frac{U_{\text{ВХ1}} - U_+}{R_i} R_{\text{ОС}} \quad (3.13)$$

Подставляя формулу (3.11) в формулу (3.13) и проведя упрощения, получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 - R_{\text{ОС}}}{R_i} \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4} \cdot U_{\text{ВХ2}} - \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} \cdot U_{\text{ВХ2}}$$

При равенстве сопротивлений  $R_1 = R_2 = R_4 = R_{\text{ОС}}$  получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}} \quad (3.14)$$

Формула (3.14) показывает, что в схеме на рисунке 3.4 происходит вычитание двух сигналов.

Особенности операционных усилителей

В идеальном усилителе выходное напряжение точно равно произведению входного сигнала на коэффициент усиления ОУ. В реальном усилителе в выходном напряжении появляется составляющая ошибка, которая связана с различием между реальным и идеальным ОУ. Если ошибка невелика по сравнению с выходным напряжением, её можно не учитывать. Но если она сравнима с выходным напряжением, её необходимо устранить или хотя бы уменьшить.

При усилении постоянного напряжения наиболее существенны входное напряжение сдвига, входной ток сдвига и дрейф ОУ. При усилении переменного напряжения важны частотная характеристика ОУ и скорость нарастания напряжения.

#### Балансировка ОУ

Если замкнуть входы идеального ОУ, его выходное напряжение будет равно нулю. В реальном ОУ при короткозамкнутых входах выходное напряжение имеет некоторое конечное значение входного напряжения сдвига  $U_{\text{вых сдв}}$ . Это связано с тем, что коллекторные токи транзисторов входного дифференциального каскада несколько отличаются даже тогда, когда на их базы подано одинаковое напряжение. В результате на выходе первого каскада появляется напряжение, которое затем усиливается и увеличивается за счет дополнительных разбалансов в последующих каскадах ОУ. Напряжение  $U_{\text{вых сдв}}$  зависит как от разбаланса внутри ОУ, так и от коэффициента усиления ОУ. Поэтому, чтобы охарактеризовать собственно ОУ, вводят понятие входного напряжения сдвига  $U_{\text{вых сдв}}$  - постоянного напряжения соответствующей полярности, при котором  $U_{\text{вых сдв}} = 0$ . При этом говорят, что усилитель сбалансирован или что в нем установлен (настроен) нуль. В наиболее простых ОУ настройку нуля осуществляют, подавая дополнительное постоянное напряжение к тому входу, на который не подается усиливаемый сигнал. В более совершенных ОУ предусматриваются специальные выводы компенсации нуля.

#### Токи смещения ОУ

В идеальном усилителе ток через входные клеммы равен нулю. В большинстве ОУ во входных каскадах используют биполярные транзисторы, которые управляются базовыми токами. Поэтому в реальном ОУ через оба входа проходят малые постоянные токи – входные токи смещения, определяемые как среднее значение двух базовых токов входного каскада ОУ

$$I_{\text{см}} = \frac{I_{b1} + I_{b2}}{2}, \quad (3.15)$$

где  $I_{\text{см}}$  - ток смещения, А;

$I_b$  - ток базы, А.

Значения обычно приводятся в паспортах реальных ОУ. Так как  $I_{b1} \approx I_{b2}$  то приводимый в паспортах ОУ входной ток смещения, приблизительно равный каждому из них, мал – для простых ОУ составляет единицы микроампер, а для высококачественных ОУ – единицы наноампер.

Хотя значения входных токов смещения весьма малы, они могут оказывать серьезное влияние на выходное напряжение. Действительно, как видно из схемы на рисунке 5,а, ток  $I_{b1}$  не создает никакого напряжения на входе, поэтому потенциал точки будет равен нулю. Ток  $I_{b1}$  протекает по резисторам  $R_1$  и  $R_{oc}$ , создает падение напряжения  $U_- = I_{b1}(R_1 || R_{oc})$ , которое оказывается дифференциальным между входами ОУ и вызывает появление дополнительного выходного напряжения

$$U_{\text{вых}} = KU = I_{\text{см}} \frac{R_{oc}}{R_1} \cdot \frac{R_{oc} \cdot R_1}{R_{oc} + R_1} \approx R_{oc} \cdot I_{\text{см}} \quad (3.16)$$

И будет, очевидно, тем больше, чем больше  $R_{oc}$ .

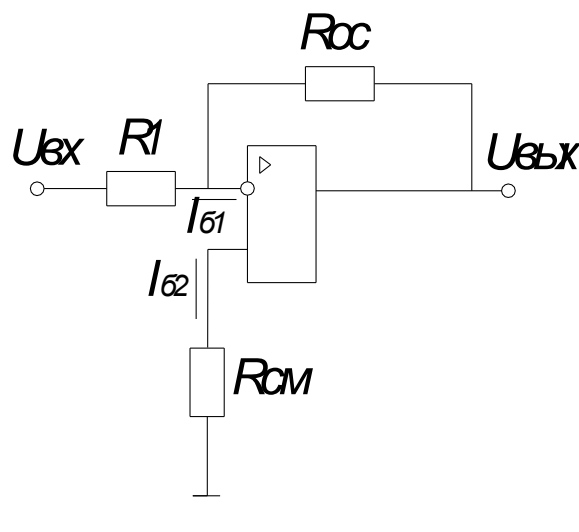
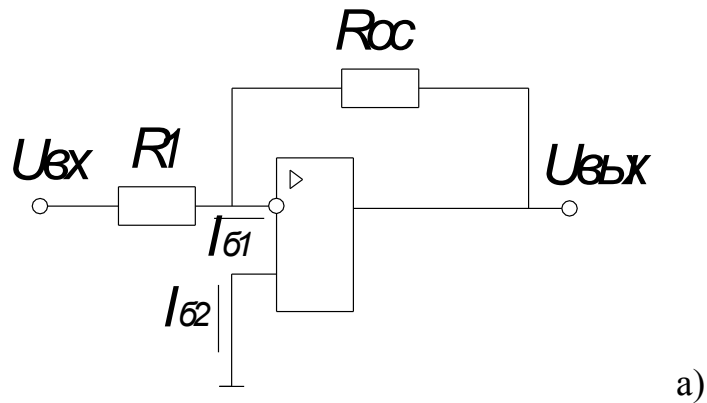


Рисунок 5 – Устранение влияния токов смещения

Влияние входного тока смещения можно свести к минимуму, если последовательно с прямым входом реального ОУ включить резистор  $R_{cm}$

(рисунок 5,б). Должно быть подобрано такое сопротивление  $R_{см}$ , чтобы падение напряжения  $U_{R2} = U_+$  было равно  $U_-$ . Тогда напряжения на обоих входах относительно «земли» будут одинаковыми, дифференциальное входное напряжение равно нулю и  $U_{вых}$  также равно нулю.

Очевидно, что

$$R_{см} = R_{ос} || R_1 \quad (3.17)$$

Ток сдвига ОУ

Разность базовых токов называют входным током сдвига ОУ

$$I_{вх\ сдв} = I_{b1} - I_{b2} \quad (3.18)$$

Для устранения его влияния необходимо несколько другое сопротивление  $R_{см}$ , чем рассчитанное по формуле (3.17). Вообще, для уменьшения влияния входных токов ОУ (входных токов смещения и сдвига) необходимо, чтобы сопротивление по постоянному току между прямым и инверсным входами реального ОУ было одинаковыми.

Дрейф нуля ОУ

При усилении постоянных напряжений существенное значение имеет дрейф нуля. Входные токи и напряжение сдвига с течением времени изменяются, что вызывает колебание входного напряжения. Основными причинами являются нестабильность напряжения питания и внешней температуры.

Нестабильность напряжений питания может быть скомпенсирована применением стабилизированных источников питания. Температурные влияния могут быть ослаблены, если ОУ поместить в термостат.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Провести расчет схем на базе ОУ по индивидуальному заданию (таблица 1).

### Задача № 1

Определить сопротивление  $R_{ос}$  в инвертирующем усилителе (рисунок 1) и его входной ток  $I_{вх}$ , если на усилитель подается напряжение от генератора с  $U_{вх}$  и внутренним сопротивлением  $R_i$ , а также известен коэффициент усиления.

### Задача № 2

Определить коэффициент усиления усилителя  $K_U$  и  $U_{вых}$  неинвертирующего усилителя (рисунок 2) с заданными сопротивлениями  $R_2$ ,  $R_3$  и  $U_{вх}$ .

### Задача № 3

Определить  $U_{\text{вых}}$  сумматора, представленного на рисунке 3, если сопротивления резисторов одинаковы и равны, известны  $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{вх2}}$ .

### Задача № 4

Определить  $U_{\text{вых}}$  и сопротивление резистора  $R_{\text{см}}$ , который нужно включить в схему инвертирующего усилителя для устранения влияния тока смещения  $I_{\text{см}}$ , если известны  $R_{\text{ос}}$  и  $R_1$ .

Таблица 1 – Исходные данные

№	$ K_u $	$U_{\text{вх}}$ В	$R_i$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , Ом	$U_{\text{вх1}}$ , В	$U_{\text{вх2}}$ , В	$R$ , кОм	$R_1$ , кОм	$R_{\text{ос}}$ , кОм	$I_{\text{см}}$ , нА
1	5	5	5,5	10	2,5	2	4	10	1	50	400
2	6	4	6,0	11	3,0	3	5	11	2	55	410
3	7	3	6,5	12	3,5	4	6	12	3	60	420
4	8	2	7,0	13	4,0	5	7	13	4	65	430
5	9	1	7,5	14	4,5	2	3	14	5	70	440
6	10	1	8,0	15	5,0	2	4	15	6	75	450
7	5	2	8,5	16	5,5	3	5	16	7	80	460
8	6	3	9,0	17	6,0	4	6	17	8	85	470
9	7	4	9,5	18	6,0	5	7	18	9	90	480
10	8	5	10	19	5,5	2	3	19	10	95	490
11	9	5	10	20	5,0	2	4	20	6	100	500
12	10	4	9,5	21	4,5	3	5	21	7	85	470
13	5	3	9,0	22	4,0	4	6	22	8	90	480
14	6	2	8,5	23	3,5	5	7	23	9	95	490
15	7	1	8,0	24	3,0	2	3	24	10	100	500

2 Оформить отчет.

3 Сделать выводы по работе.

4 Ответить на контрольные вопросы.

### **3 Содержание отчета**

- 1 Название цель работы.
- 2 Оснащение рабочего места.
- 3 Схема инвертирующего усилителя на ОУ.
- 4 Результаты решения задачи №1.
- 5 Схема неинвертирующего усилителя на ОУ.
- 6 Результаты решения задачи №2.
- 7 Схема сумматора на ОУ.
- 8 Результаты решения задачи №3.
- 9 Схема устранения влияния токов смещения.
- 10 Результаты решения задачи №4.
- 11 Выводы по работе.

### **4 Контрольные вопросы**

- 1 Охарактеризуйте назначение, параметры, характеристики и особенности применения ОУ.
- 2 Охарактеризуйте неинвертирующий и инвертирующий усилители и приведите их схемную реализацию.
- 3 Разъясните, чем определяется максимальное выходное напряжение ОУ.
- 4 Объясните, почему в усилителях на ОУ обязательно наличие ООС?
- 5 Разъясните, почему  $R_{oc}$  не выбирают очень большим.
- 6 Раскройте суть понятия «входной ток смещения» и перечислите основные причины его возникновения.
- 7 Представьте меры устранения тока смещения.



## Самоконтроль знаний

### Входной контроль

- 1 Нарисуйте УГО туннельного диода.
- 2 Нарисуйте УГО варикапа.
- 3 Нарисуйте УГО конденсатора переменной емкости.
- 4 Нарисуйте УГО полевого транзистора с управляющим р-п переходом и каналом n-типа.
- 5 Дайте определение выпрямительного диода.
- 6 Нарисуйте схему включения БТ с общим коллектором. Напишите, какие токи и напряжения являются входными, а какие выходными.
- 7 Схема с ОЭ усиливает
  - а) ток, мощность;
  - б) ток, напряжение;
  - в) напряжение, ток, мощность.
- 8 По каким параметрам выбирают полупроводниковые выпрямительные диоды
  - а) по допустимому прямому току и обратному напряжению;
  - б) по допустимому прямому напряжению и обратному току;
  - в) по допустимой мощности.
- 9 В каком из полупроводниковых приборов существует индуцированный накал
  - а) БТ;
  - б) ПТ;
  - в) тиристор.
- 10 Полупроводниковым источником излучения является:
  - а) светодиод;
  - б) фотодиод;
  - в) обращенный диод.
- 11 Нарисуйте УГО обращенного диода.
- 12 Нарисуйте УГО полевого транзистора со встроенным каналом р-типа.
- 13 Нарисуйте УГО конденсатора постоянной емкости.
- 14 Нарисуйте УГО биполярного транзистора р-п-р типа.
- 15 Дайте определение полевого транзистора.
- 16 Нарисуйте схему включения БТ с общей базой. Напишите, какие токи и напряжения являются входными, а какие выходными.
- 17 В полупроводниках n- типа неосновные носители заряда – это:
  - а) электроны;
  - б) дырки;
  - в) протоны.
- 18 Чтобы открыть динистор необходимо подать напряжение
  - а) на управляющий электрод;
  - б) на анод и катод;
  - в) на базу и эмиттер.
- 19 Управляющий электрод полевого транзистора называется
  - а) сток;

- б) исток;
  - в) затвор.
- 20 Режимы работы БТ
- а) статический, динамический;
  - б) ключевой, пороговый;
  - в) активный, отсечки, насыщения.
- 21 Нарисуйте УГО стабилитрона.
- 22 Нарисуйте УГО переменного резистора.
- 23 Нарисуйте УГО выпрямительного диода.
- 24 Нарисуйте УГО полевого транзистора с управляющим р-п переходом и каналом р-типа.
- 25 Дайте определение биполярного транзистора.
- 26 Нарисуйте схему включения БТ с общим эмиттером. Напишите, какие токи и напряжения являются входными, а какие выходными.
- 27 Какой проводимостью обладает выпрямительный диод
- а) односторонней;
  - б) двухсторонней;
  - в) проводимостью не обладает.
- 28 Варикап является элементом с электрически управляемой
- а) проводимостью;
  - б) индуктивностью;
  - в) емкостью.
- 29 Полупроводниковым приемником излучения является
- а) лампа накаливания;
  - б) светодиод;
  - в) фотодиод.
- 30 Сопротивление фоторезистора зависит от
- а) приложенного напряжения;
  - б) освещенности;
  - в) протекающего тока.
- 31 Нарисуйте УГО постоянного резистора.
- 32 Нарисуйте УГО полевого транзистора с индуцированным каналом р-типа.
- 33 Нарисуйте УГО биполярного транзистора n-р-n типа.
- 34 Нарисуйте УГО конденсатора переменной емкости.
- 35 Дайте определение тиристора.
- 36 Нарисуйте схему включения БТ с общей базой. Напишите, какие токи и напряжения являются входными, а какие выходными.
- 37 Полупроводники с электронной проводимостью это:
- а) полупроводники р- типа;
  - б) полупроводники n- типа;
  - в) полупроводники i- типа.
- 38 Выводы тринистора называются:
- а) анод, катод, управляющий электрод;
  - б) эмиттер, база, коллектор;
  - в) затвор, сток, исток.

39 Выводы полевого транзистора называются

- а) эмиттер, база, коллектор;
- б) эмиттер, сток, исток;
- в) затвор, сток, исток.

40 Стабилитрон работает

- а) при прямом напряжении;
- б) при обратном напряжении;
- в) при обратном напряжении в области электрического пробоя.

### **Тематический контроль №1**

1 Назовите виды электронных устройств и сигналов которые они обрабатывают.

2 Дайте определение электронного усилителя

3 Начертите структурные схемы обратных связей по току и напряжению. Поясните их.

4 Приведите классификацию усилителей.

5 Поясните, что представляет собой аналоговый сигнал.

6 Поясните за счет чего увеличивается мощность сигнала в усилителе?

7 Начертите структурные схемы последовательной и параллельной обратных связей. Поясните их.

8 Назовите и поясните параметры усилителей.

9 Поясните, что представляет собой дискретный сигнал.

10 Дайте определение усилительного каскада.

11 Начертите структурную схему усилителя с обратными связями и поясните ее.

12 Начертите и поясните характеристики усилителей.

13 Назовите виды аналоговых сигналов и приведите их примеры.

14 Назовите источники входных сигналов усилителя.

15 Начертите обобщенную схему усилительного каскада и поясните ее.

16 Дайте определение обратной связи. Назовите виды обратных связей.

### **Тематический контроль №2**

1 Начертите схему и поясните активный режим работы БТ.

2 Поясните режим работы А усилительного каскада.

3 Начертите схемы усилителей с фиксированным током и напряжением базы. Поясните их работу и назначение элементов схемы.

4 Начертите схему и поясните режим отсечки БТ.

5 Поясните режимы работы В и АВ усилительного каскада.

6 Начертите схему простейшего усилителя на БТ и поясните его работу и назначение элементов схемы.

7 Начертите схему и поясните инверсный режим работы БТ.

8 Поясните режим работы С усилительного каскада.

- 9 Начертите схемы усилителей с эмиттерной и коллекторной стабилизацией. Поясните их работу и назначение элементов схемы.
- 10 Начертите схему и поясните режим насыщения БТ.
- 11 Поясните режим работы D усилительного каскада.
- 12 Начертите схему усилительного каскада на полевом транзисторе и поясните его работу и назначение элементов схемы.

### **Тематический контроль №3**

- 1 Поясните назначение усилителей мощности.
- 2 Начертите схему однотактного трансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 3 Назовите самые важные параметры усилителей мощности.
- 4 Начертите схему однотактного бестрансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 5 Назовите режимы работы усилителей мощности.
- 6 Начертите схему двухтактного трансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 7 Поясните, чем отличается однотактный усилитель мощности от двухтактного.
- 8 Начертите схему двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.

### **Тематический контроль №4**

- 1 Дайте определение понятию «операционный усилитель». Начертите его условное графическое обозначение и подпишите выводы.
- 2 Начертите схему неинвертирующего усилителя и поясните ее.
- 3 Начертите структурную схему операционного усилителя и поясните назначение каскадов.
- 4 Начертите схему инвертирующего усилителя и поясните ее.
- 5 Назовите основные параметры операционного усилителя и их значения.
- 6 Начертите схему сумматора на операционном усилителе и поясните ее.
- 7 Начертите характеристики операционного усилителя и поясните их.
- 8 Начертите схемы интегратора и дифференциатора и поясните их.

## Перечень вопросов к ОКР

### Вопросы к ОКР №1

- 1 За счет чего увеличивается мощность сигнала в усилителе?
- 2 Начертите схему простейшего усилителя на БТ и поясните его работу и назначение элементов схемы.
- 3 Дайте определение явлению «дрейф нуля» и поясните какие причины его вызывают.
- 4 Начертите схему усилителя с коллекторной стабилизацией. Поясните ее работу и назначение элементов схемы.
- 5 Дайте определение усилительного каскада.
- 6 Начертите схему усилителя с эмиттерной стабилизацией. Поясните ее работу и назначение элементов схемы.
- 7 Назовите режимы работы биполярного транзистора и охарактеризуйте их.
- 8 Начертите структурную схему многокаскадного усилителя, схемы межкаскадных связей и поясните их.
- 9 Дайте определение электронного усилителя.
- 10 Начертите схемы усилителей с фиксированным током и напряжением базы. Поясните их работу и назначение элементов схемы.
- 11 Дайте определение обратной связи. Назовите виды обратных связей.
- 12 Начертите схему усилительного каскада на полевом транзисторе и поясните его работу и назначение элементов схемы.
- 13 Определите коэффициенты усиления  $K_i$  и  $K_u$  усилителя на средних частотах если известны  $R_k=0,5\text{кОм}$ ,  $R_n=2\text{кОм}$ ,  $h_{11}=1,1\text{кОм}$ ,  $h_{21}=10$ .
- 14 Определите коэффициенты усиления  $K_i$  и  $K_u$  усилителя на средних частотах если известны  $R_k=0,7\text{кОм}$ ,  $R_n=2,2\text{кОм}$ ,  $h_{11}=1,3\text{кОм}$ ,  $h_{21}=20$ .
- 15 Определите коэффициенты усиления  $K_i$  и  $K_u$  усилителя на средних частотах если известны  $R_k=0,9\text{кОм}$ ,  $R_n=2,4\text{кОм}$ ,  $h_{11}=1,5\text{кОм}$ ,  $h_{21}=30$ .
- 16 Определите коэффициенты усиления  $K_i$  и  $K_u$  усилителя на средних частотах если известны  $R_k=1\text{кОм}$ ,  $R_n=2,6\text{кОм}$ ,  $h_{11}=1,7\text{кОм}$ ,  $h_{21}=40$ .
- 17 Определите коэффициенты усиления  $K_i$  и  $K_u$  усилителя на средних частотах если известны  $R_k=1,2\text{кОм}$ ,  $R_n=2,6\text{кОм}$ ,  $h_{11}=1,7\text{кОм}$ ,  $h_{21}=50$ .
- 18 Определите коэффициенты усиления  $K_i$  и  $K_u$  усилителя на средних частотах если известны  $R_k=1,5\text{кОм}$ ,  $R_n=2,6\text{кОм}$ ,  $h_{11}=1,8\text{кОм}$ ,  $h_{21}=40$ .

## Вопросы к ОКР №2

- 1 Дайте определение понятию «компаратор напряжения». Поясните принцип его работы.
- 2 Начертите схему двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 3 Назовите известные вам виды схем усилителей мощности и режимы их работы. Поясните, в чем состоит их различие.
- 4 Начертите схему сумматора на операционном усилителе и поясните ее.
- 5 Дайте определение явлению «дрейф нуля» и поясните какие причины его вызывают.
- 6 Начертите схему однотактного бестрансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 7 Дайте определение понятию «операционный усилитель». Начертите его условное графическое обозначение и подпишите выводы.
- 8 Начертите схему двухтактного трансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 9 Назовите основные параметры операционного усилителя и их значения.
- 10 Начертите схему однотактного трансформаторного усилителя мощности и поясните его работу.
- 11 Поясните назначение усилителей мощности и их основные параметры.
- 12 Начертите схемы интегратора и дифференциатора и поясните их.
- 13 Начертите схему инвертирующего усилителя и определите сопротивление  $R_{ос}$  в нем, его входной ток  $i_{вх}$ , если требуемый коэффициент усиления  $|K|=10$ , а на усилитель подается напряжение от генератора с  $U_{вх}=1В$  и внутренним сопротивлением  $R_i=10кОм$ .
- 14 Начертите схему неинвертирующего усилителя и определите коэффициент усиления усилителя  $K$  и  $U_{вых}$  если  $R_2=20кОм$ ,  $R_3=5кОм$  и  $U_{вх}=2В$ .
- 15 Начертите схему инвертирующего усилителя и определите сопротивление  $R_{ос}$  в нем, его входной ток  $i_{вх}$ , если требуемый коэффициент усиления  $|K|=12$ , а на усилитель подается напряжение от генератора с  $U_{вх}=1,5В$  и внутренним сопротивлением  $R_i=10кОм$ .
- 16 Начертите схему неинвертирующего усилителя и определите коэффициент усиления усилителя  $K$  и  $U_{вых}$  если  $R_2=25кОм$ ,  $R_3=10кОм$  и  $U_{вх}=2В$ .
- 17 Начертите схему инвертирующего усилителя и определите сопротивление  $R_{ос}$  в нем, его входной ток  $i_{вх}$ , если требуемый коэффициент усиления  $|K|=15$ , а на усилитель подается напряжение от генератора с  $U_{вх}=1,5В$  и внутренним сопротивлением  $R_i=12кОм$ .
- 18 Начертите схему неинвертирующего усилителя и определите

коэффициент усиления усилителя  $K$  и  $U_{\text{вых}}$  если  $R_2=27\text{кОм}$ ,  $R_3=17\text{кОм}$  и  $U_{\text{вх}}=2\text{В}$ .

## Литература

- 1 Галкин, В. И. Промышленная электроника и микроэлектроника / В. И. Галкин, Е. В. Пелевин.- Минск: Беларусь, 2000.-350 с.
- 2 Криштафович, А. К. Основы промышленной электроники / А. К. Криштафович.- М., Высш. Шк., 1985.-287 с.
- 3 Москатов, Е. А. Основы электронной техники /Е. А. Москатов.- Ростов н/Д: Феникс, 2010.- 378 с.
- 4 Дунаев, С. Д. Электроника, микроэлектроника, автоматика / С. Д. Дунаев.- М.: Маршрут, 2003. -336 с.
- 5 Акимова, Г. Н. Электронная техника / Г. Н. Акимова.- М.: Маршрут, 2003. -290 с.
- 6 Ревич, Ю. В. Занимательная электроника / Ю. В. Ревич.- СПб.: БХВ-Петербург, 2005.-672 с.
- 7 Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов/ Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров; Под. ред. О. П. Глудкина.—М.: Горячая линия - Телеком, 2000.—768 с.
- 8 Ярочкина, Г. В. Задачник по радиоэлектронике: практикум для нач. проф. Образования/ Г. В. Ярочкина.-М.: Издательский центр «Академия», 2008.- 112с.



## Обратная связь

### Анкета для оценки уровня мотивации

<p>1 Тебе нравится в колледже?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- не очень</li><li>- нравится</li><li>- не нравится</li></ul>	<p>6 У тебя в группе много друзей?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- мало</li><li>- много</li><li>- нет друзей</li></ul>
<p>2 Утром, когда ты просыпаешься, ты всегда с радостью идешь в колледж или тебе часто хочется остаться дома?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- чаще хочется остаться дома</li><li>- бывает по-разному</li><li>- иду с радостью</li></ul>	<p>7 Если бы преподаватель сказал, что завтра в колледж не обязательно приходить всем учащимся, что желающие могут остаться дома, ты пошел бы или остался дома?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- не знаю</li><li>- остался бы дома</li><li>- пошел бы в колледж</li></ul>
<p>3 Ты часто рассказываешь о колледже родителям?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- часто</li><li>- редко</li><li>- не рассказываю</li></ul>	<p>8 Ты хотел бы, чтобы у тебя были менее строгие преподаватели?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- точно не знаю</li><li>- хотел бы</li><li>- не хотел бы</li></ul>
<p>4 Тебе нравится, когда у вас отменяют какие-нибудь занятия?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- не нравится</li><li>- бывает по-разному</li><li>- нравится</li></ul>	<p>9 Ты хотел бы, чтобы в колледже остались одни перемены?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- не знаю</li><li>- не хотел бы</li><li>- хотел бы</li></ul>
<p>5 Ты хотел бы, чтобы тебе не задавали домашних заданий?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- хотел бы</li><li>- не хотел бы</li><li>- не знаю</li></ul>	<p>10 Тебе нравятся твои одноклассники?</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- нравятся</li><li>- не очень</li><li>- не нравятся</li></ul>

## Методика изучения отношения к учебным дисциплинам

**Раздел I.** Подчеркни причины, характеризующие твое отношение к дисциплине. Допиши недостающие.

Люблю дисциплину потому, что:

1. Данная дисциплина интересна
2. Нравится, как преподают
3. Дисциплину нужно знать всем
4. Дисциплина нужна для будущей работы
5. Дисциплина легко усваивается
6. Дисциплина заставляет думать
7. Дисциплина считается выгодной
8. Требуется наблюдательности, сообразительности
9. Дисциплина требует терпения
10. Дисциплина занимательная
11. Товарищи интересуются этой дисциплиной
12. Интересны отдельные факты
13. Родители считают эту дисциплину важной
14. Хорошие отношения с преподавателем
15. Преподаватель часто хвалит
16. Преподаватель интересно объясняет
17. Получаю удовольствие при его изучении
18. Знания по дисциплине необходимы для поступления в институт
19. Предмет помогает развивать общую культуру
20. Дисциплина влияет на изменение знаний об окружающем мире
21. Просто интересно

Не люблю дисциплину потому, что:

1. Данная дисциплина не интересна
2. Не нравится, как преподают
3. Дисциплину не нужно знать всем
4. Дисциплина не нужна для будущей работы
5. Дисциплина трудно усваивается
6. Дисциплина не заставляет думать
7. Дисциплина не считается выгодной
8. Не требует наблюдательности, сообразительности
9. Дисциплина не требует терпения
10. Дисциплина не занимательная
11. Товарищи не интересуются этой дисциплиной
12. Интересны только отдельные факты
13. Родители не считают эту дисциплину важной
14. Плохие отношения с преподавателем
15. Преподаватель редко хвалит
16. Преподаватель неинтересно объясняет
17. Не получаю удовольствия при изучении
18. Знания по дисциплине не играют существенной роли при поступлении в институт
19. Дисциплина не способствует развитию общей культуры
20. Дисциплина не влияет на изменение знаний об окружающем мире
21. Просто неинтересно

**Раздел II.** Почему ты вообще учишься? Подчеркни наиболее соответствующий этому вопросу ответ или допиши недостающий.

1. Это мой долг.
2. Хочу стать грамотным.
3. Хочу быть полезным гражданином.
4. Не хочу подводить свою группу.
5. Хочу быть умным и эрудированным.
6. Хочу добиться полных и глубоких знаний.
7. Хочу научиться самостоятельно работать.
8. Все учатся и я тоже.
9. Родители заставляют.
10. Нравится получать хорошие оценки.
11. Чтобы похвалил преподаватель.
12. Чтобы товарищи со мной дружили.
13. Для расширения умственного кругозора.
14. Чтобы получить диплом.
15. Хочу учиться.