

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Э.И. Цимбалист, П.Ф. Баранов,
С.В. Силушкин, Ю.М. Фомичев**

ЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СРЕДЕ NI ELVIS II

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию в области
приборостроения и оптоэлектроники для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки бакалавров 200100 «Приборостроение»*

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 621.382.049.7(075.8)

ББК 32.973.3я73

Ц61

Цимбалист Э.И.

Ц61

Электроника: часть первая. Лабораторный практикум по аналоговой электронике в программно-аппаратной среде NI ELVIS II: учебное пособие / Э.И. Цимбалист, П.Ф. Баранов, С.В. Силушкин, Ю.М. Фомичев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 302 с.

ISBN 978-5-4387-0314-3

Пособие включает в себя руководство по эксплуатации инструментов NI ELVIS II, основы схемотехнического моделирования и анализа электрических схем в среде Multisim, рекомендации по выполнению лабораторного цикла, которые могут быть полезными при изучении учебной дисциплины «Электроника», содержит контролирующие материалы. Знакомит с современными средствами измерений и моделирования схем, готовит студентов к выполнению лабораторных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Приборостроение».

УДК 621.382.049.7(075.8)

ББК 32.973.3я73

Рецензенты

Кандидат технических наук, доцент
директор ЦВДО ТУСУРа

Д.В. Дубинин

Кандидат технических наук, доцент
начальник патентного отдела ТУСУРа

В.И. Карнышев

Кандидат технических наук, доцент
кафедры ИИТ ИНК

Б.Б. Винокуров

ISBN 978-5-4387-0314-3

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Цимбалист Э.И., Баранов П.Ф.,
Силушкин С.В., Фомичев Ю.М., 2013

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2013

Содержание

1. Общие сведения о лабораторном цикле	5
1.1. Внеаудиторная подготовка к лабораторным работам	6
1.2. Проверка подготовленности студента и выполнение лабораторного эксперимента.....	7
1.3. Оформление отчета.....	9
2. Учебные лаборатории по аналоговой части электроники	11
2.1. Учебная лаборатория NI ELVIS II	11
2.1.1. Что такое технология виртуальных инструментов?	11
2.1.2. LabVIEW	12
2.1.3. Обзор NI ELVIS II.....	12
2.1.4. Краткое руководство по эксплуатации виртуальными измерительными приборами NI ELVIS II.	18
3. Лабораторные работы цикла в среде NI ELVIS	29
Модуль 1. Работы входного цикла.....	29
Лабораторная работа № 1.1	29
Лабораторная работа № 1.2	39
Модуль 2. Исследование активных элементов и простых схем по их применению	47
Лабораторная работа № 2.1	47
Модуль 2. Исследование активных элементов и простых схем по их применению	62
Лабораторная работа № 2.2	62
Модуль 3. Усилительные каскады на транзисторе	86
Лабораторная работа № 3.1	86
Модуль 3. Усилительные каскады на транзисторе	99
Лабораторная работа № 3.2	99
Модуль 4. Схемы на операционных усилителях	112
Лабораторная работа № 4.1	112
Модуль 4. Схемы на операционных усилителях	129
Лабораторная работа № 4.2	129
Модуль 4. Схемы на операционных усилителях	148
Лабораторная работа № 4.3	148
Модуль 5. Автогенераторы периодических колебаний	167
Лабораторная работа № 5.1	167
Модуль 5. Автогенераторы периодических колебаний	184
Лабораторная работа № 5.2	184
Модуль 6. Усилители мощности	193
Лабораторная работа № 6.1	193

4. Выполнение экспериментальных исследований в Multisim 10	213
4.1. Основы работы в Multisim 10	213
4.1.1. Окно разработки (Design Toolbox).....	214
4.1.2. Глобальные настройки	214
4.1.3. Настройка листа.....	215
4.1.4. Обзор компонентов	216
4.1.5. Сдвиг, поворот и выделение компонентов	219
4.1.6. Соединение компонентов	220
4.1.7. Графические аннотации	223
4.1.8. Использование интерактивного симулятора схем	224
4.1.9. Виртуальные приборы	225
4.1.10. Анализ схем.....	231
4.2. Программа самостоятельной подготовки к выполнению лабораторных работ по «Электронике» в среде Multisim 10	234
5. Обработка результатов измерений. Работа в Excel.....	298
Список литературы.....	301

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАБОРАТОРНОМ ЦИКЛЕ

Образовательные профессиональные программы подготовки выпускников по направлениям и специальностям, в учебных планах которых присутствует дисциплина «Электроника» в разных модификациях, резко снизили аудиторные часы лабораторного цикла.

С другой стороны, переход учебного процесса на использование кредитных и балльно-рейтинговых оценок освоения дисциплин образовательных программ должен обеспечить каждому студенту (подгруппе студентов) определенную свободу в выборе модулей и отдельных работ лабораторного цикла.

В этой связи необходимо предусмотреть ряд мероприятий, ведущих к активизации познавательной деятельности студентов, формированию их положительной мотивации на самообразование.

Предлагаемый вниманию студентов материал к лабораторному циклу направлен на облегчение их подготовки к работам, в то же время оставляя им элементы творчества по различным этапам постановки, проведения и обработки результатов эксперимента.

Целью лабораторного цикла является:

- экспериментальное освоение теоретических положений изучаемой дисциплины;
- получение практических навыков постановки и проведения эксперимента над различными объектами исследования;
- овладение навыками работы со средствами наблюдения, измерения и контроля, используемыми в изучаемой области знаний;
- формирование навыков обработки результатов проведенных исследований и представление их в виде таблиц, графиков и/или синхронизированных временных диаграмм сигналов.

Результативность лабораторного цикла предполагается повысить введением следующих мероприятий:

- использованием современной технологии виртуальных инструментов в среде NI ELVIS, которая объединяет технические средства измерения и управления, прикладное программное обеспечение и стандартные промышленные компьютерные технологии;
- индивидуализации объектов исследования за счет возможности выбора студентом как модуля объектов исследования, так и конкретных элементов и схем в выбранных модулях, представляющих наибольший интерес обучаемого;
- уходом от технологии «бригадного подряда» и переходом к индивидуальному обучению – каждый студент на своем рабочем месте;
- организацией диагностического и текущего контролей работ.

- Выполнение каждой лабораторной работы (ЛР) содержит три этапа:
- внеаудиторная подготовка к лабораторной работе;
 - аудиторное лабораторное занятие, включающее в себя оценку подготовки студента к ЛР, лабораторный эксперимент над заданным объектом исследования и защиту отчета о ранее проделанной ЛР;
 - внеаудиторное оформление отчета о выполненной ЛР.

1.1. Внеаудиторная подготовка к лабораторным работам

Внеаудиторная работа студента предполагает:

- уяснение целей и задач лабораторной работы;
- изучение (повторение) теоретических положений изучаемой дисциплины или предшествующих дисциплин, на которые опирается планирование, постановка, проведение эксперимента и обработка его результатов;
- понимание работы принципиальных схем эксперимента, методик получения требуемых характеристик и параметров;
- домашнюю разработку схем и методик эксперимента по поставленным задачам, если Вы работаете в активном режиме лабораторного эксперимента;
- ответы на контрольные вопросы, поставленные в описании к лабораторной работе.

Внеаудиторная подготовка студента к лабораторной работе контролируется вопросами текущего контроля и учитывается в баллах рейтинга.

Для реализации элементов сквозного обучения внеаудиторная подготовка к первым лабораторным работам дополнительно может включать изучение и повторение следующих разделов, использованных в предыдущих лабораторных циклах:

- расчет погрешности измерений;
- использование метода наименьших квадратов для обработки результатов измерений (в задачах аппроксимации эмпирических зависимостей).

Внеаудиторная подготовка студента к лабораторной работе считается законченной, когда у студента сформируется ясное понимание:

- технологии процесса эксперимента (зачем, что и как делать?);
- ожидаемых результатов по каждому этапу лабораторной работы (что должно получиться?).

Это произойдет тогда, когда студент овладеет набором компетенций в виде требуемых для работы знаний, умений и пониманий. В качестве примера в таблице 1 приведен краткий их перечень, необходимый для реализации ряда процессов при выполнении лабораторных работ.

Таблица 1.1

*Примерный перечень компетенций, востребованных при подготовке
к лабораторным работам*

Процесс	Используемые компетенции
Снятие ВАХ двухполюсника (четырёхполюсника)	1. Знание способов регулирования параметров тока и напряжения в исследуемых цепях. 2. Правильный выбор и расстановка средств измерений тока и напряжения. 3. Умение правильно собрать схему эксперимента. 4. Грамотное считывание показаний СИ и формирование массивов данных. 5. Проведение аналитической или графической аппроксимации закономерностей, полученных при лабораторных исследованиях. 6. Знание методов расчета погрешностей
Снятие АЧХ исследуемой схемы	1. Знание определения характеристик и выбор способа ее снятия. 2. Умение грамотно собрать схему эксперимента. 3. Умение по результатам наблюдения выходного напряжения ввести исследуемую схему в линеаризованный режим работы. 4. Грамотная реализация алгоритма использования АЧХ по выбранному методу, умение предъявить результаты эксперимента в виде таблиц, графиков и т. д.

Обратим внимание, что ряд указанных выше компетенций, востребованных в цикле лабораторных работ по электронике, должны быть освоены на предшествующих лабораторных работах по физике и электротехнике.

1.2. Проверка подготовленности студента и выполнение лабораторного эксперимента

В соответствии с рейтинг-планом дисциплины обычно осуществляется два-три текущих контроля успеваемости студента. В состав первого включены контролирующие материалы не только по первому модулю лабораторного цикла, но и по диагностическому контролю остаточных знаний и умений студентов по дисциплинам-пререквизитам. При остальных аттестациях степени подготовки студента к лабораторной работе используются контролирующие материалы, приведенные в описании к выполняемой работе.

Содержание банка контролирующих материалов определяется декларируемыми в рабочей программе дисциплины целями и задачами.

Для реализации положительной мотивации студента на обучение, постановку и организацию процесса его самообразования внедрены элементы проблемно-поисковой технологии обучения, когда студенты обязаны:

- узнавать схему с целью определения того, какие ее параметры и характеристики необходимо анализировать;
- демонстрировать действия алгоритмов анализа и синтеза различных объектов электроники по изложенным на лекциях алгоритмам и приведенным примерам.

Указанная технология, когда студенту не приходится воспроизводить то, что он слышал на занятиях или видел в книгах, принципиально ведет к его самообразованию и воспитанию творческой личности.

На всех видах контроля студенту как минимум придется демонстрировать стандартные профессиональные действия за счет самостоятельного добывания необходимых знаний, умений и компетенций для конкретного и ранее неизвестного объекта аналоговой электроники.

Учитывая вышесказанное, контролирующие материалы (вопросы, тесты и т. п.) лабораторного цикла должны относиться к сравнительно простым принципиальным схемам аналоговой электроники при их анализе и несложным задачам синтеза подобных устройств.

Для ликвидации возможных конфликтных ситуаций целесообразно оговаривать балльную стоимость вопроса или теста. Должны быть приведены также четкие критерии правильности ответов.

Ответ студента на поставленный вопрос не должен быть формальным, он обязан быть доказательным. При тестировании без компьютера по вопросу необходимо привести требуемые аналитические выкладки, графические построения и расчет числовых значений величин.

Справедливым является критерий: задание засчитывается и получает высокую оценку, если ответ доказан и совпадает с ожидаемым результатом.

После тестирования студент допускается к лабораторной работе.

Перед выполнением эксперимента следует вспомнить правила эксплуатации используемых средств наблюдения и измерения и источников сигналов. Затем можно приступить к измерениям по плану, изложенному или в методических указаниях, или наработанному самостоятельно в ходе внеаудиторной предварительной подготовки к лабораторной работе, если Вы избрали активный и творческий характер деятельности.

При наблюдениях/измерениях, выполняемых с помощью осциллографа, необходимо предварительно установить подходящий размер изображения. Если исследователя интересует процесс с сохранением информации о постоянной (средней) составляющей сигналов, то целесообразно, где возможно, использовать открытый вход осциллографа.

В противном случае используется закрытый вход осциллографа, когда в установившемся режиме постоянная составляющая задерживается цепью с входной разделительной емкостью.

При использовании цифрового мультиметра необходимо периодически осуществлять установку нуля, что гарантирует правильность его показаний.

Вся необходимая для оформления отчета информация заносится в лабораторный журнал (USB-флеш-накопитель), который является единственным документом, удостоверяющим выполнение лабораторной работы.

1.3. Оформление отчета

Отчет о проделанной работе оформляется к следующему лабораторному занятию.

Отчет выполняется по правилам оформления студентами их работ в соответствии с СТО ТПУ 2.5.01 «Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления». Целесообразно также ознакомиться с СТО ТПУ 2.3.05 «Система образовательных стандартов. Занятия лабораторные. Общие требования к организации и проведению». Титульный лист отчета выполняется в соответствии с Приложением А указанного стандарта с учетом изменений в названии министерства и университета.

В начале отчета формируется цель работы. Отчет структурируется по этапам проведенного эксперимента.

По каждому этапу эксперимента изображается его схема и соответствующие таблицы, в которых приводятся результаты измерений. В тексте на все схемы и таблицы указываются соответствующие ссылки (в том числе на номер), разъясняющие необходимость их присутствия. Рисунки сопровождаются подрисуночными надписями. По табличным данным в выбранных масштабах строятся характеристики или семейства характеристик исследуемых объектов или процессов. На каждом графике должно быть указано, к какой части эксперимента он относится и что на графике изображено.

При необходимости приводятся все расчетные формулы как в символьном виде, так и с подставленными числами. Если это задано, то приводится вывод формул для расчета погрешностей и сам расчет. В последнем случае полезно использовать многократный эксперимент.

Отчет заканчивается выводами о проделанной работе. Выводы – это не содержание проделанной работы, это кратко сформулированные выявленные закономерности по процессам или объектам проделанной работы. Все разделы отчета должны содержать четко выверенную и

правдивую информацию, написаны грамотно с соблюдением всех правил орфографии и пунктуации на основе использования общих требований и правил оформления СТО ТПУ 2.5.01. Отчет, не удовлетворяющий указанным требованиям или скопированный с другого отчета, или незащищенный вовремя, принимается только после проведенных исправлений, но по-новому не оценивается в баллах рейтинга.

Лабораторная работа считается выполненной, если в ходе эксперимента получены правильные результаты, которые грамотно оформлены в отчете и обоснованы при его защите.

2. УЧЕБНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ ПО АНАЛОГОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ

2.1. Учебная лаборатория NI ELVIS II

Данный раздел содержит информацию, необходимую для понимания архитектуры учебной лаборатории NI ELVIS II, в состав которой входит комплект виртуальных измерительных приборов, а также информацию, необходимую для работы с этими приборами. Кроме того, рассматривается концепция виртуальных измерительных приборов и компоненты систем сбора данных компании National Instruments, специально разработанных для учебных лабораторий.

2.1.1. Что такое технология виртуальных инструментов?

Технология виртуальных инструментов объединяет технические средства измерения и управления, прикладное программное обеспечение и стандартные промышленные компьютерные технологии с целью создания измерительных, тестовых, управляющих и других технических систем, функциональность которых определяется пользователем.

Такая технология представляет собой идеальную платформу как для разработки учебных курсов, так и для проведения научных исследований. Выполняя различные эксперименты в лабораторных практикумах, студенты комбинируют операции измерения, автоматизации и управления.

В NI ELVIS II используется программное обеспечение, разработанное в среде LabVIEW, и аппаратура сбора данных NI для создания виртуальной измерительной системы, обладающей функциональными возможностями комплекта привычных измерительных приборов.

Отметим, что технология NI ELVIS II:

- оперирует не с виртуальными, а с реальными физически существующими объектами аналоговой электроники – различными элементами и схемами;
- имеет дело с реальными процессами, происходящими в электрических цепях разной конфигурации, в том числе и за счет воздействия на элементы и схемы физически сформированных сигналов;
- осуществляет наблюдение и измерение параметров сигналов и построение на этой основе различных характеристик. Это происходит за счет их преобразования в цифровую форму реально существующими аналого-цифровыми преобразователями с дальнейшим использованием программного обеспечения для их обработки.

2.1.2. LabVIEW

LabVIEW – это графическая среда программирования, предназначенная для создания прикладных систем измерения, тестирования и автоматизации. Виртуальный прибор (Virtual Instrument – VI) представляет собой программу, разработанную в среде LabVIEW, которая повторяет внешний вид и функционирование настоящего измерительного прибора.

2.1.3. Обзор NI ELVIS II

Функциональные возможности набора типовых лабораторных измерительных приборов в NI ELVIS II реализованы на основе настольной рабочей станции, макетной платы и программ в среде LabVIEW.

Макетная плата с элементами электроники устанавливается в настольную рабочую станцию и предназначена для монтажа электронной схемы и подключения ее через соответствующие выводы к приборам.

Внешний вид NI ELVIS II показан на рис. 2.1.

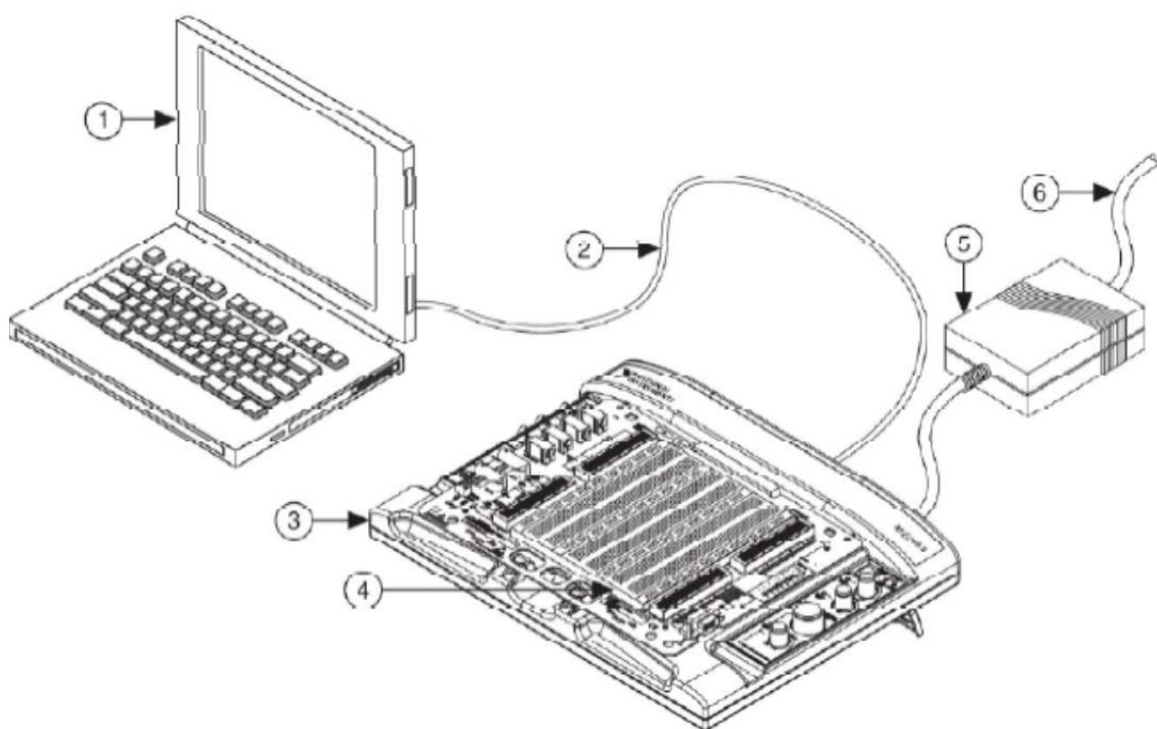


Рис. 2.1. Схема размещения компонентов системы NI ELVIS:
1 – ноутбук; 2 – USB-кабель; 3 – настольная рабочая станция NI ELVIS II;
4 – макетная плата; 5 – блок питания; 6 – сетевой шнур питания

2.1.3.1. Органы управления рабочей станции

Схема расположения компонентов на панели управления рабочей станции приведена на рис. 2.2.

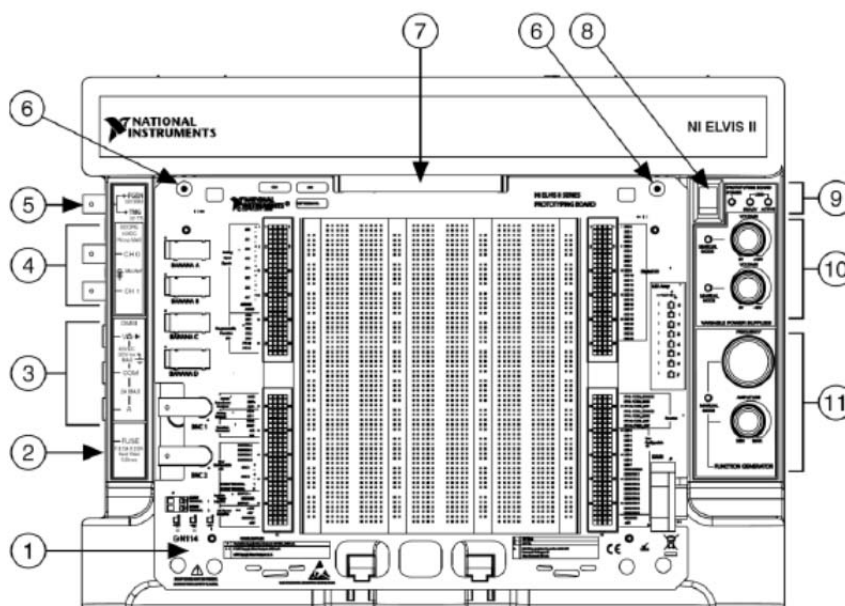


Рис. 2.2. Рабочая станция NI ELVIS II с макетной платой. Вид сверху

На рис. 2.2 обозначены следующие выводы и органы управления:

1. Макетная плата NI ELVIS II;
2. Плавкий предохранитель мультиметра;
3. Клеммы для подключения к мультиметру;
4. Разъемы для подключения к осциллографу;
5. Разъем выхода функционального генератора или входа цифрового запуска;
6. Монтажное отверстие под винт на макетной плате;
7. Разъем для подключения макетной платы;
8. Выключатель питания макетной платы;
9. Световые индикаторы статуса;
10. Элементы управления регулирующими блоками питания;
11. Элементы управления функциональным генератором.

Настольная рабочая станция снабжена следующими элементами управления и индикации:

- USB LEDs – индикаторы USB;
 - READY – показывает, что оборудование NI ELVIS II сконфигурировано должным образом и готово к соединению с компьютером;
 - ACTIVE – показывает активность USB-соединения с компьютером.
- POWER – Выключатель питания макетной платы и индикатор – управление питанием на макетной плате.
- VARIABLE POWER SUPPLY – элементы управления регулирующими блоками питания;
 - VOLTAGE + – регулятор положительного выходного напряжения. Диапазон изменения напряжения от 0 до +12 В;
 - VOLTAGE – – регулятор отрицательного выходного напряжения. Диапазон изменения напряжения от –12 до 0 В.

- FUNCTION GENERATOR – элементы управления функциональным генератором;
 - FREQUENCY – регулятор частоты генерируемого сигнала;
 - AMPLITUDE – регулятор амплитуды генерируемого сигнала.
- DMM – гнезда для подключения к цифровому мультиметру;
 - гнездо для подключения диода, измерения напряжения, сопротивления (красное) – вход для подключения к точке положительного потенциала при измерениях любых величин, кроме силы тока;
 - гнездо общей точки (черное) – вход общей (опорной) точки при измерениях любых величин;
 - гнездо для измерения тока (красное) – вход для подключения к точке положительного потенциала при измерении тока;
 - контейнер с плавким предохранителем – заменяемый плавкий предохранитель для защиты сигнальной линии по току.
- SCOPE – разъемы для подключения осциллографа;
 - CH 0 – вход канала 0 осциллографа;
 - CH 1 – вход канала 1 осциллографа.
- FGEN/Trigger – опциональный выход функционального генератора или вход цифрового запуска.

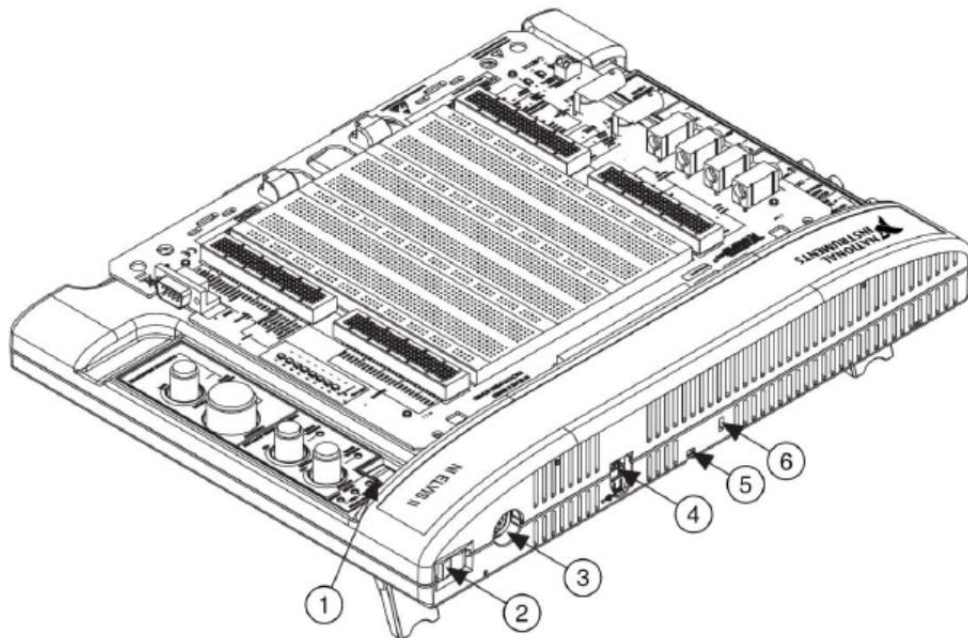


Рис. 2.3. Вид сзади настольной рабочей станции NI ELVIS II:
 1 – выключатель питания макетной платы; 2 – выключатель питания рабочей станции; 3 – разъем для подключения источника питания постоянного/переменного тока; 4 – разъем USB; 5 – гнездо для подключения кабеля безопасности; 6 – гнездо для подключения замка Kensington

На задней панели NI ELVIS расположены следующие компоненты (рис. 2.3):

- выключатель питания рабочей станции. Используйте этот выключатель для включения или отключения NI ELVIS II;
- разъем для подключения источника питания постоянного/переменного тока к рабочей станции;
- разъем USB. Используйте этот разъем для подключения рабочей станции к компьютеру;
- гнездо для подключения замка Kensington. Используется для защиты рабочей станции;
- гнездо для подключения кабеля безопасности ноутбука. Используется для защиты рабочей станции.

При работе с лабораторным макетом использован не ручной, а программный режим работы станции, поэтому клеммы и коаксиальные разъемы станции не используются, за исключением клемм для подключения к мультиметру и осциллографу. Входы и выходы сигналов, которые предоставляют доступ ко всем виртуальным измерительным приборам NI ELVIS II за исключением мультиметра, выведены на лабораторный макет.

2.1.3.2. Лабораторная плата аналоговой электроники

В предлагаемом цикле лабораторных работ по аналоговой электронике использована макетная плата, специально разработанная на кафедре КИСМ ТПУ и предназначенная для монтажа исследуемой схемы и подключения ее к источникам питания и измерительным приборам NI ELVIS II.

Плата снабжена принципиальной схемой и гнездами, удобными для монтажа исследуемой схемы с помощью прилагаемых перемычек.

Принципиальная схема разработанной макетной платы приведена на рис. 2.4. В левой части ее расположены монтажные гнезда (все гнезда на схеме обозначены концентрическими окружностями), соединенные с входами и выходами сигналов, которые предоставляют доступ ко всем виртуальным измерительным приборам NI ELVIS II.

На остальной части платы показаны элементы, соединяя которые перемычками, можно получать различные объекты исследования аналоговой электроники, как рекомендованные для проведения лабораторной работы в соответствующих методических указаниях, так и выбранные Вами, если они представляют интерес для исследования.

Принципиальная схема также содержит информацию об обозначениях и номиналах используемых элементов.

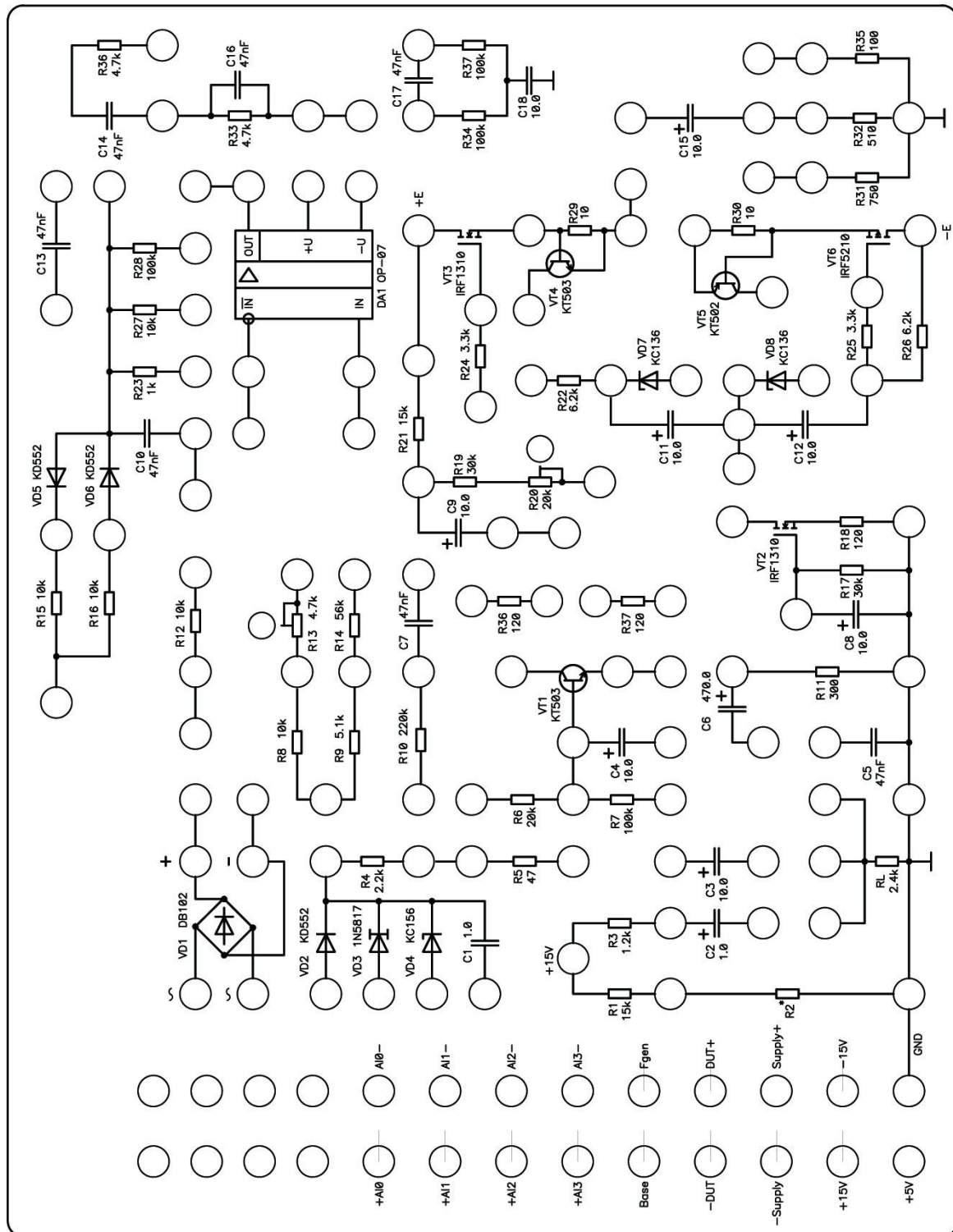


Рис. 2.4. Принципиальная схема лабораторной макетной платы NI ELVIS II

Входы и выходы сигналов, обеспечивающие доступ ко всем виртуальным измерительным приборам NI ELVIS II, подписаны в соответствии с идеологией NI ELVIS II и, по возможности, расположены с учетом их функционального назначения.

Назначение используемых в лабораторном цикле входов и выходов показано в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Назначение входов и выходов лабораторного макета, предоставляющих доступ ко всем используемым виртуальным измерительным приборам NI ELVIS II

Название сигнала	Тип	Описание
AI<0..3>±	Аналоговые входы общего назначения	Analog Input Channels – положительные и отрицательные входы дифференциальных аналоговых каналов 0...3 (±)
Base	Вход для анализатора трехпроводных устройств	Вывод для подключения базы биполярных транзисторов
DUT±	Входы для мультиметра, анализатора импеданса, анализаторов двух- и трехпроводных устройств	Входы для измерения емкости и индуктивности с помощью цифрового мультиметра, анализатора импедансов, построителей ВАХ
FGEN	Функциональный генератор	Function Generator – выход функционального генератора
+15V; –15V	Источник питания операционного усилителя	Выходы источника питания +15 и –15 В, относительно цепи GROUND, нерегулируемые
SUPPLY+	Регулируемые блоки питания	Выход регулируемого блока питания с положительным выходным напряжением (+) от 0 до 12 В
SUPPLY–	Регулируемые блоки питания	Выход регулируемого блока питания с отрицательным выходным напряжением (–) от –12 до 0 В
+5 V	Источник постоянного тока	Выход источника питания +5 В, относительно цепи GROUND, нерегулируемый
GND	Источник постоянного тока	Ground – общая цепь макетной платы – «заземление». Все контакты макетной платы с таким обозначением соединены

2.1.4. Краткое руководство по эксплуатации виртуальными измерительными приборами NI ELVIS II

2.1.4.1. Начало работы

Для включения питания на NI ELVIS II необходимо нажать кнопки «1» и «2», как показано на рис. 2.5, при этом возле кнопок «1» и «2» должны загореться индикаторы.

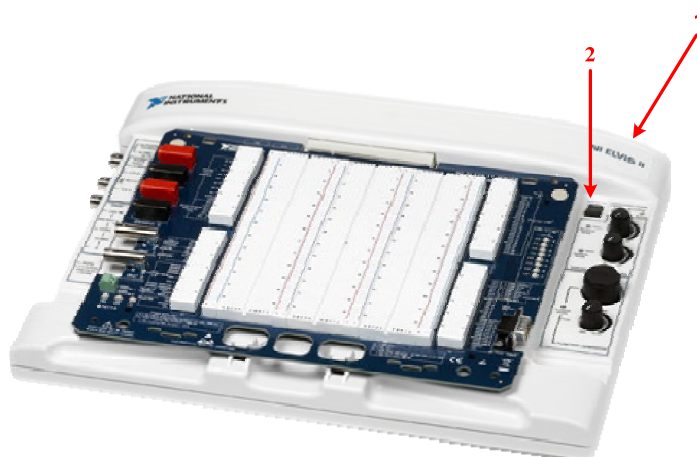


Рис. 2.5. Общий вид установки NI ELVIS II

Запустите программное обеспечение NI ELVIS II. Вызов программного модуля осуществляется путем двойного нажатия левой клавиши мыши по пиктограмме NI ELVISmx Instrument Launcher на рабочем столе или выбором в меню Start→All Program Files→National Instruments→NI ELVISmx→NI ELVISmx Instrument Launcher, или Пуск→NI ELVISmx Instrument Launcher. После инициализации откроется панель запуска виртуальных измерительных приборов – рис. 2.6. Вызов лицевой панели измерительного прибора осуществляется нажатием на соответствующую пиктограмму.



Рис. 2.6. Панель измерительных приборов ELVIS

Метрологические характеристики измерительных приборов приведены в руководстве «Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS II. Технические средства / Руководство пользователя – Режим доступа: <http://www.ni.com>.»

2.1.4.2. Цифровой мультиметр (Digital Multimeter – DMM)

Выберите DMM из панели инструментов, на экране появится следующее окно, рис. 2.7. Выводы мультиметра находятся на боковой панели лабораторной станции NI ELVIS II.

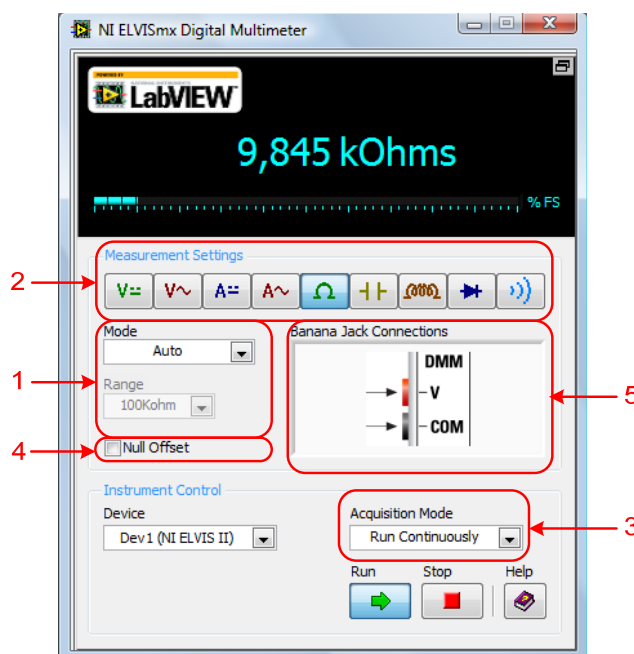


Рис. 2.7. Лицевая панель мультиметра

На лицевой панели расположены органы управления мультиметром: 1 – выбор диапазона измерений; 2 – выбор режима измерений; 3 – непрерывные (циклические) и однократные измерения; 4 – коррекция нуля – необходимо включать при работе амперметра и вольтметра; 5 – схема подключения к клеммам рабочей станции NI ELVIS II.

С помощью мультиметра возможно измерение значений постоянного и переменного токов и напряжений, получение значений сопротивлений резисторов, емкости конденсаторов и индуктивности катушек. Кроме того, мультиметр осуществляет проверку работоспособности полупроводниковых диодов и прозвонку проводников. Чтобы выбрать режим работы, необходимо кликнуть мышью на соответствующую пиктограмму.

Предел измерений необходимо выбирать исходя из априорной информации, если ее нет, включите автоматический выбор предела – Auto.

Необходимо учитывать, что при отсутствии внешнего сигнала мультиметр показывает напряжение и ток, которые присутствуют внутри самой установки NI ELVIS II. При включении кнопки Null мультиметр запоминает эти значения напряжения и тока с целью коррекции результата измерения.

Для проверки работоспособности диода (Diode test) необходимо выбрать соответствующий режим с изображением диода.

Если в окне высвечивается надпись «OPEN», это означает, что диод подключен обратной полярностью (наоборот) или диод неработоспособен. Появление надписи «GOOD» означает, что диод работоспособен.

При переключении на режим целостности электрических проводников – «прозвонка» (Audible continuity) – на экране может появиться надпись «OPEN» или определенное значение сопротивления. Первый случай означает, что в цепи присутствует разрыв. Второй случай сигнализирует, что целостность в цепи не нарушена и ее сопротивление равно указанному значению.

2.1.4.3. Осциллограф (SCOPE)

Для подключения сигналов к двухканальному осциллографу используются осциллографические кабели и входы CH 0 и CH 1 (применяются BNC-разъемы) или каналы AI<0...3>, выводы которых расположены на макете. При использовании входов AI необходимо выполнить подключение следующим образом: AI+ соединяется с сигнальным выводом, а AI- – с выводом GROUND на макете (обозначен на макете сокращенно – GND).

Примечание: входы осциллографа AI используют режим DC (открытый вход).

Лицевая панель виртуального прибора показана на рис. 2.8.

Назначение элементов управления осциллографа:

- 1 – кнопка запуска измерений;
- 2 – кнопка окончания измерений;
- 3 – кнопка сохранения результатов измерения;
- 4 – выбор входа для канала 1;
- 5 – выбор входа для канала 2;
- 6 – вкл./выкл. канала 1;
- 7 – вкл./выкл. канала 2;
- 8 – множитель канала 1;
- 9 – выбор открытый/закрытый вход канала 1;
- 10 – множитель канала 2;
- 11 – выбор открытый/закрытый вход канала 2;
- 12 – регулирования масштаба по оси Y канала 1;
- 13 – регулирования смещения по оси Y канала 1;
- 14 – регулирования масштаба по оси Y канала 2;
- 15 – регулирования смещения по оси Y канала 2;
- 16 – регулирования масштаба по оси X;
- 17 – выбор типа синхронизации;
- 18 – выбор синхронизации по переднему или заднему фронту;

- 19 – выбор канала для синхронизации;
- 20 – выбор уровня синхронизации;
- 21 – выбор режима измерений (непрерывный/однократный);
- 22 – информация о параметрах измеряемых сигналов;
- 23 – выбор курсоров.

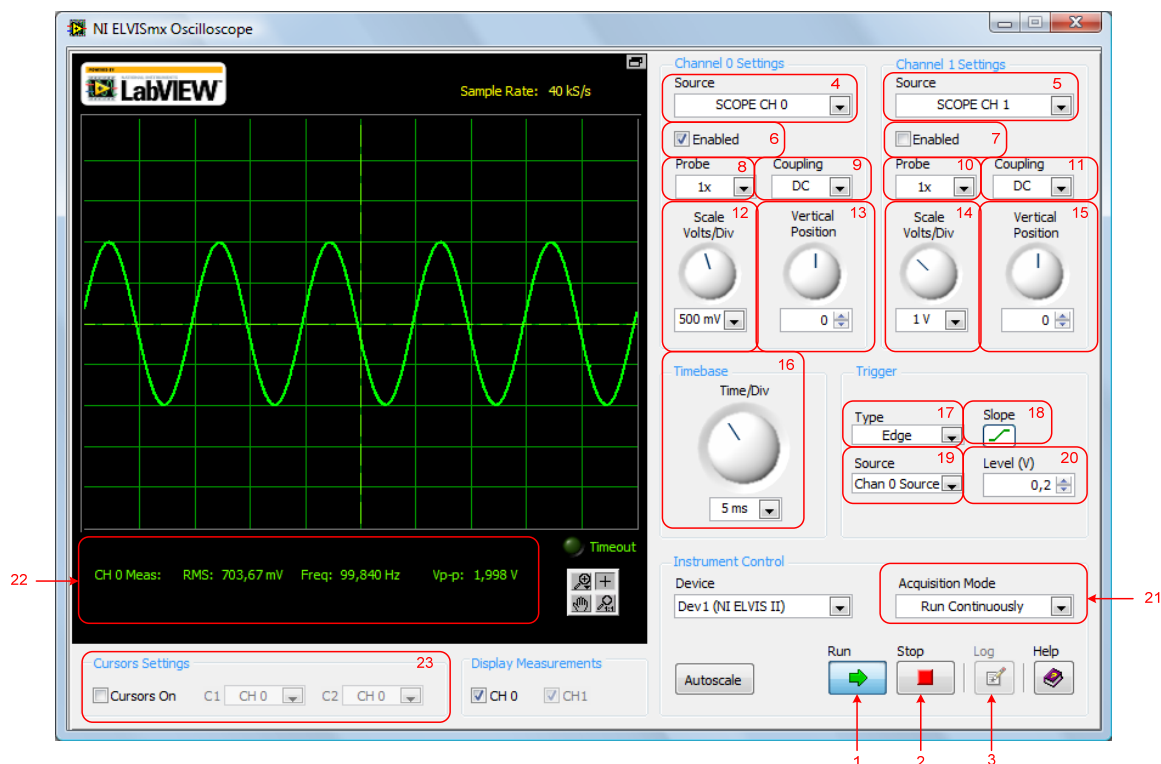


Рис. 2.8. Лицевая панель осциллографа

2.1.4.4. Функциональный генератор (Function Generator – FGEN)

Регулировать значение частоты и амплитуды можно как с лицевой панели прибора установки ELVIS II (рис. 2.9).

Назначение элементов управления генератора:

- 1 – кнопка запуска генератора;
- 2 – индикатор работы функционального генератора в ручном режиме;
- 3 – настройки режима свипирования;
- 4 – выбор формы сигнала;
- 5, 6 – регулятор настройки значения частоты сигнала;
- 7, 8 – регулирование амплитуды сигнала;
- 9 – настройки скважности сигнала;
- 10, 11 – установка напряжения смещения;
- 12 – выбор типа модуляции;
- 13 – установка выхода для генерируемого сигнала (в лабораторном цикле устанавливается в состояние «Prototyping board»).

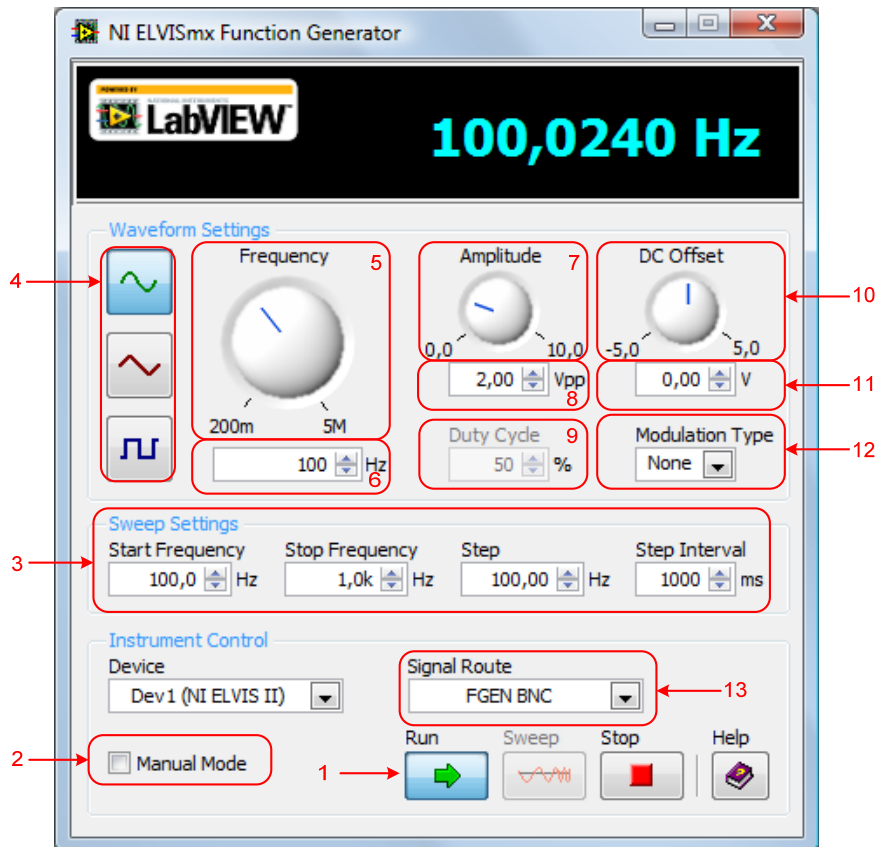


Рис. 2.9. Лицевая панель генератора. Общий вид

После настройки параметров генерируемого сигнала его можно просмотреть и измерить его параметры с помощью встроенного осциллографа (рис. 2.10).

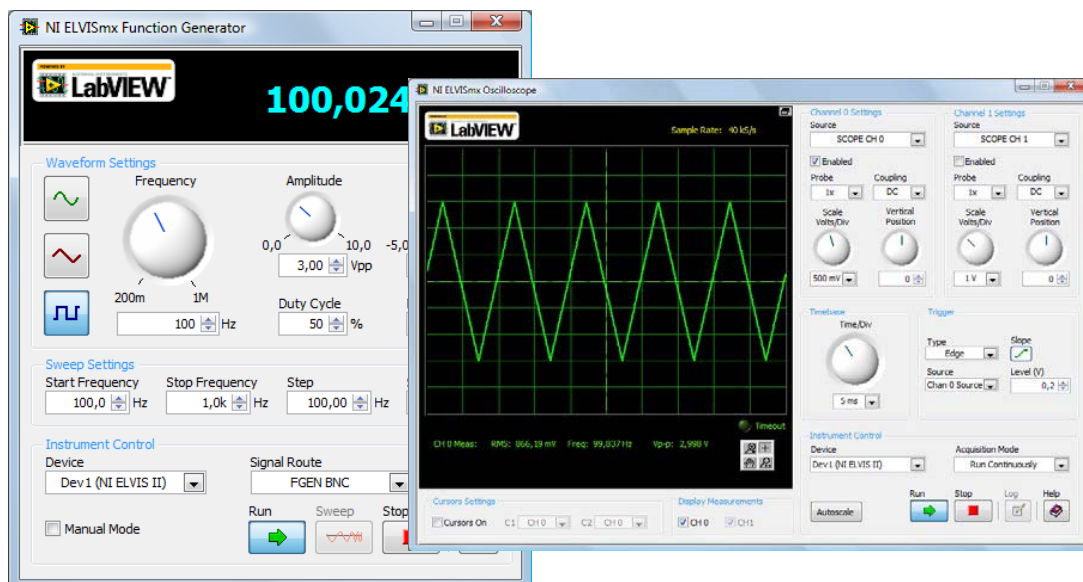


Рис. 2.10. Просмотр и измерение параметров сигнала генератора на осциллографе

2.1.4.5. Регулируемые источники питания (Variable Power Supplies)

Программное обеспечение регулируемых источников питания (Variable Power Supplies – VPS) позволяет изменять напряжения на их выходах: для источника отрицательного напряжения от -12 до 0 В, для источника положительного напряжения – от 0 до $+12$ В (рис. 2.11).

С помощью виртуальной панели прибора мы можем настраивать постоянное напряжение как поворотом ручки потенциометров, так и указанием нужного значения в окнах. При нажатии на кнопку RESET значение обнуляется.

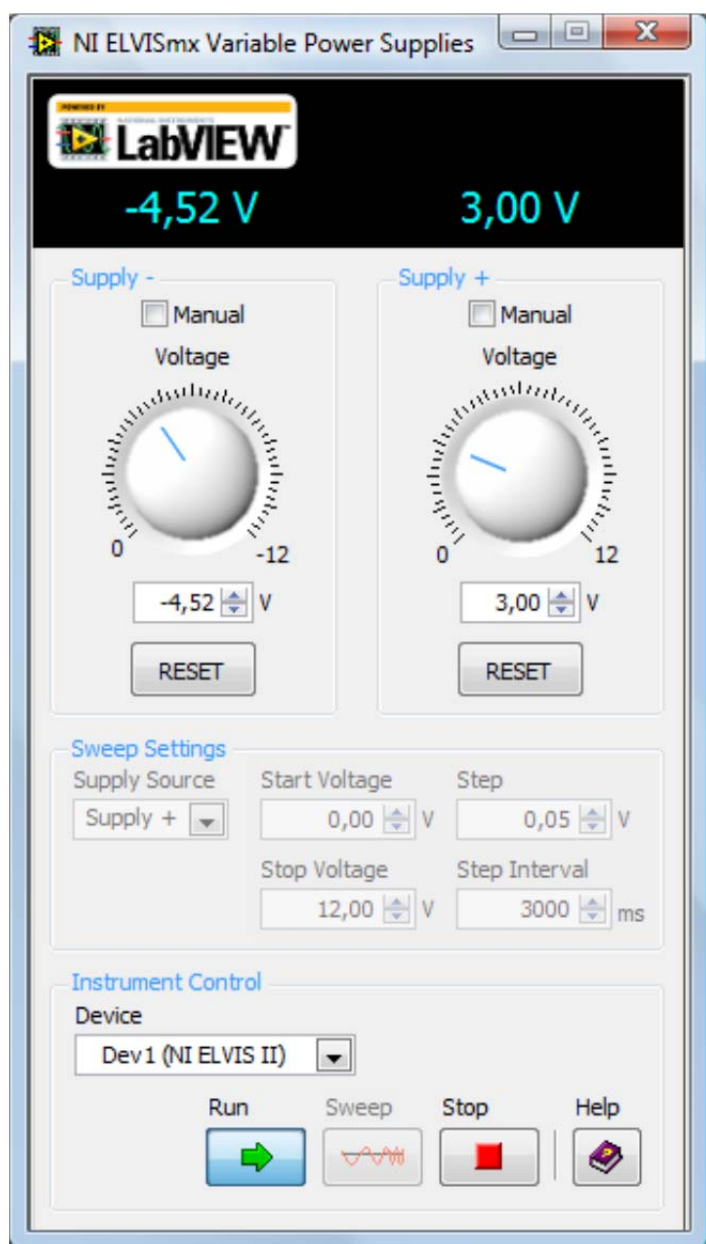


Рис. 2.11. Лицевая панель регулируемых источников питания (VPS)

2.1.4.6. Анализатор амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (Bode Analyzer)

На анализаторе АЧХ/ФЧХ мы можем устанавливать частотный диапазон прибора, а также выбирать шкалу отображения – линейную или логарифмическую, как показано на рис. 2.12.

Элементы управления анализатора:

- 1 – выбор начального значения частоты;
- 2 – выбор конечного значения частоты;
- 3 – выбор количества шагов на декаду;
- 4 – максимальное значение амплитуды;
- 5 – полярность сигнала;
- 6 – выбор представления масштаба по осям;
- 7 – настройка курсоров;
- 8 – кнопка запуска;
- 9 – кнопка сохранения результатов.

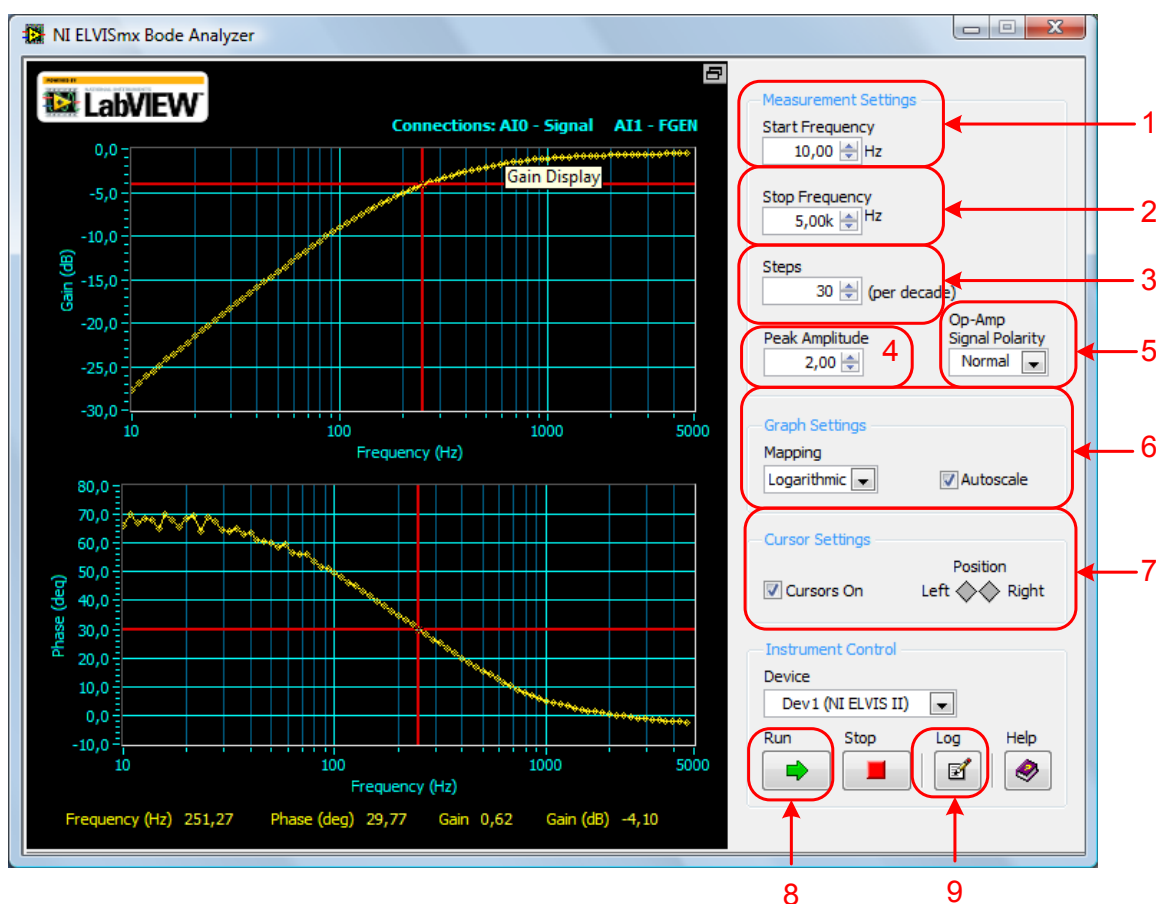


Рис. 2.12. Анализатор Бодэ (Bode Analyzer). Общий вид лицевой панели

2.1.4.7. Анализатор спектра сигнала (Dynamic Signal Analyzer – DSA)

С помощью данного прибора можно определить спектральные составляющие сигнала и отфильтровать его. Панель виртуального прибора показана на рис. 2.13.

Элементы управления анализатора:

- 1 – выбор источника входного сигнала;
- 2 – выбор верхней границы частотного диапазона измерений, длины временного интервала и типа используемого временного окна;
- 3 – выбор типа синхронизации;
- 4 – выбор источника для синхронизации;
- 5 – выбор диапазона измерений по напряжению;
- 6 – настройка параметров усреднения;
- 7 – выбор типа синхронизации (по возрастающему или спадающему фронту);
- 8 – выбор режима отображения спектра на экране;
- 9 – настройка вертикальной шкалы;
- 10 – кнопка запуска;
- 11 – кнопка сохранения результатов.

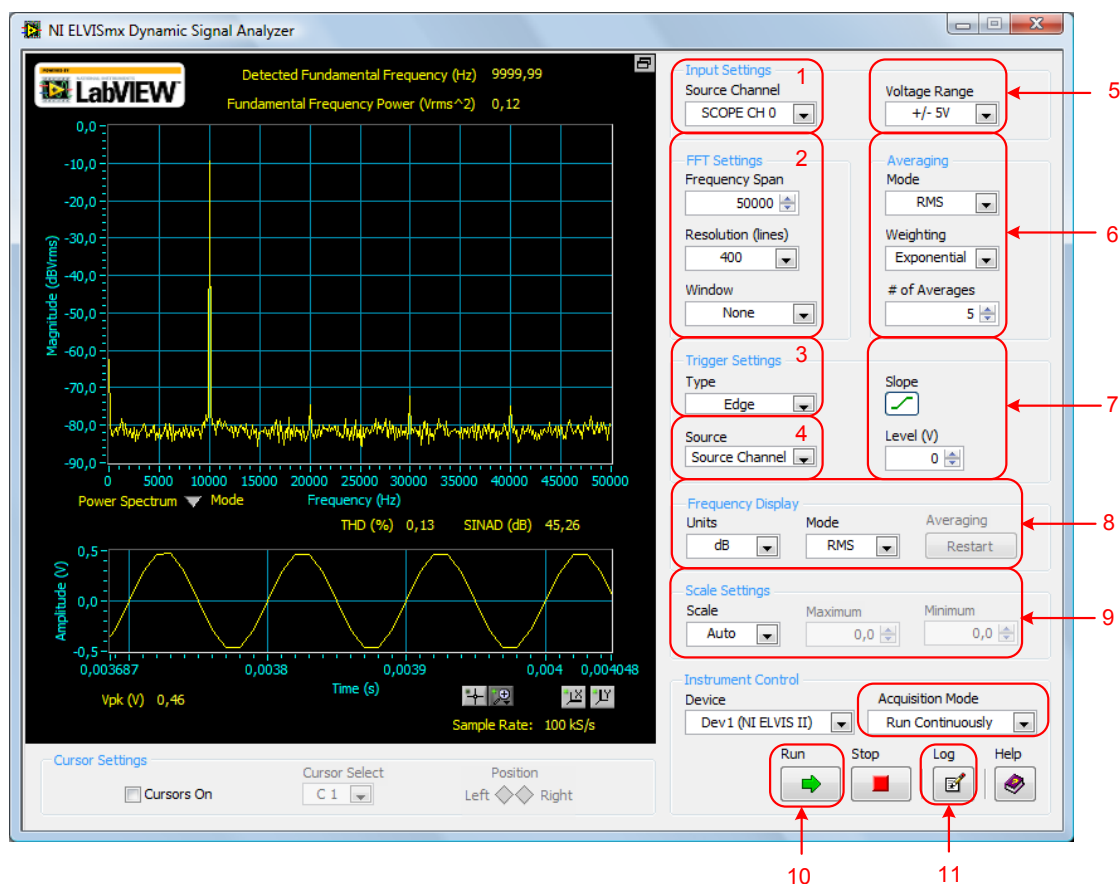


Рис. 2.13. Анализатор спектра сигнала (DSA). Общий вид

2.1.4.8. Анализатор вольт-амперных характеристик двухполюсников (Two-Wire Current-Voltage Analyzer)

Для определения и визуализации вольт-амперной характеристики (ВАХ) двухполюсников (например, диодов) необходимо выбрать «2-Wire» (Two-Wire Current-Voltage Analyzer). Лицевая панель анализатора показана на рис. 2.14.

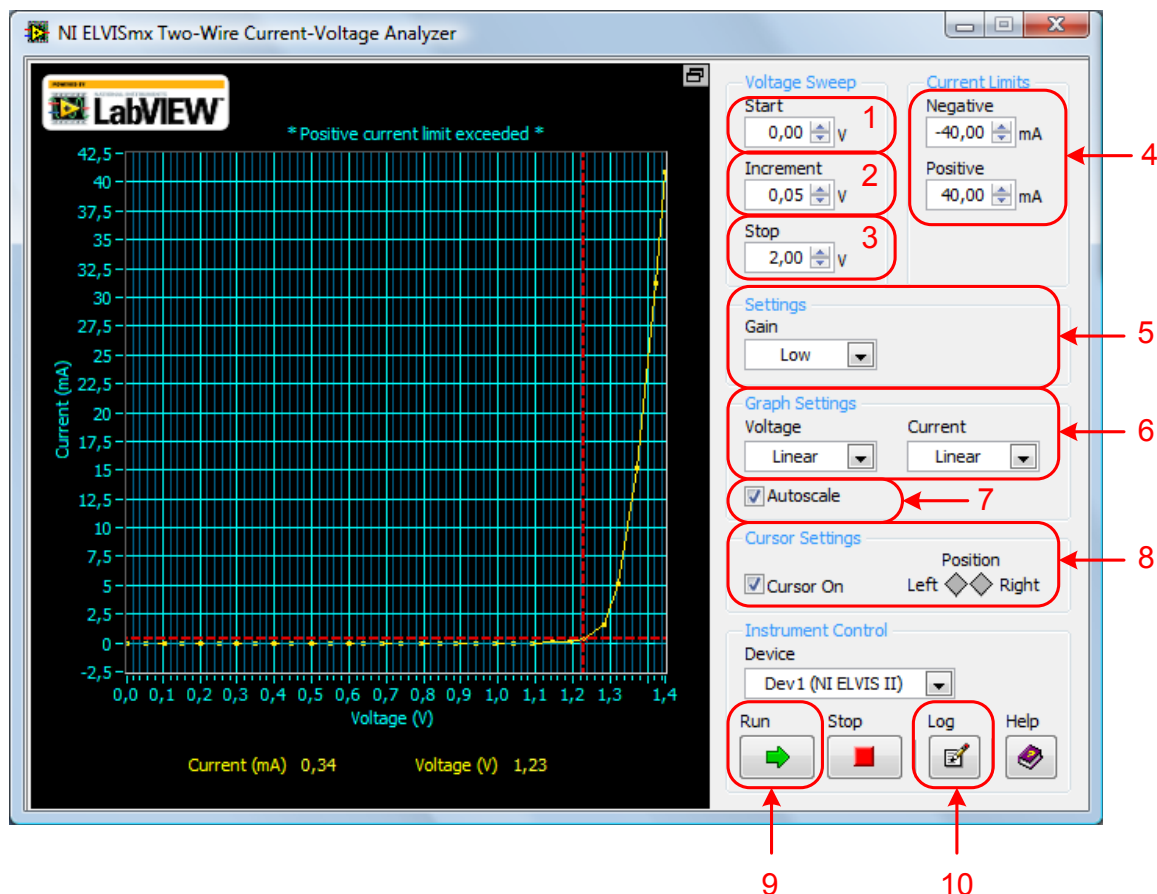


Рис. 2.14. Анализатор вольт-амперных характеристик двухполюсников
(Two-Wire Current-Voltage Analyzer). Общий вид

Элементы управления анализатора ВАХ двухполюсников:

- 1, 3 – выбор диапазона измерений по оси напряжения (ось X);
- 2 – выбор шага измерений;
- 4 – выбор диапазона измерений по оси тока (ось Y);
- 5 – установка усиления;
- 6 – выбор представления масштаба по осям;
- 7 – автонастройка;
- 8 – настройка курсоров;
- 9 – кнопка запуска;
- 10 – кнопка сохранения результатов.

2.1.4.9. Анализатор вольт-амперных характеристик четырехполюсников (Three-wire Current-Voltage Analyzer)

Для определения вольт-амперной характеристики четырехполюсников (например, биполярного транзистора $n-p-n$ -типа) необходимо выбрать «3-Wire» (Three-Wire Current-Voltage Analyzer), как показано на рис. 2.15.

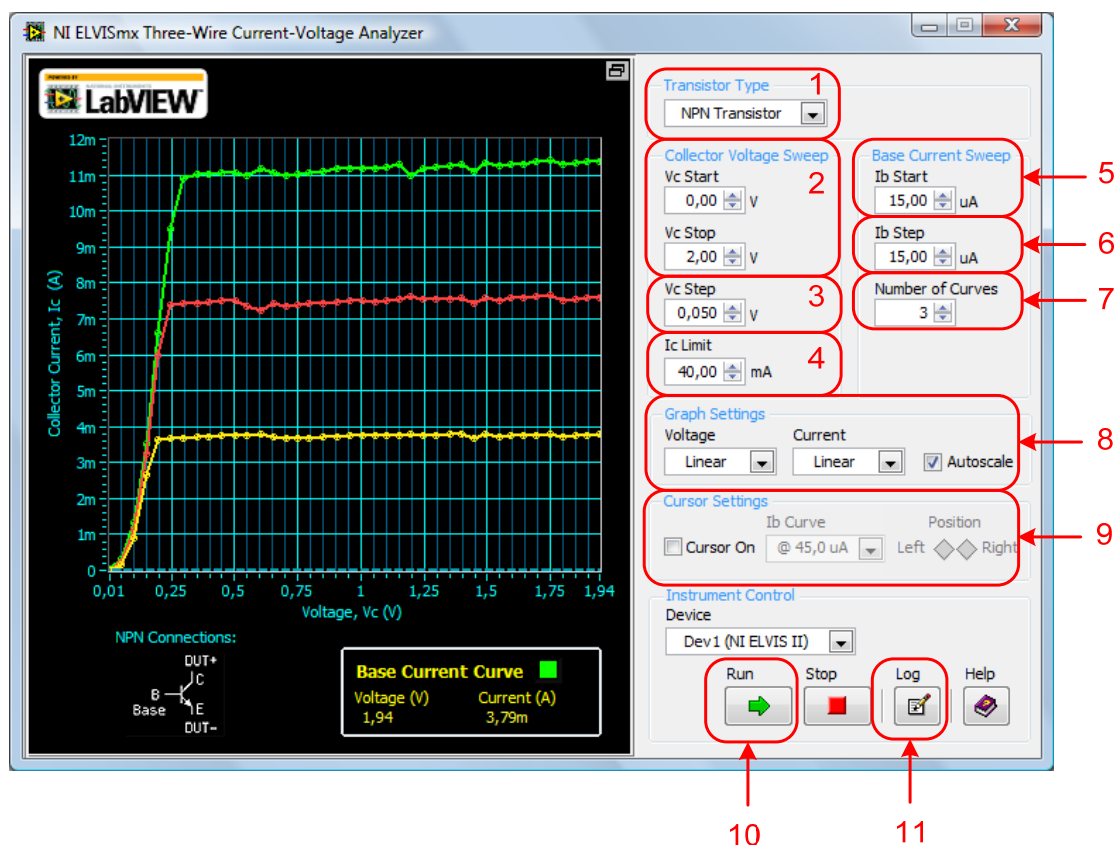


Рис. 2.15. Анализатор вольт-амперных характеристик четырехполюсников (Three-Wire Current-Voltage Analyzer). Общий вид

Элементы управления анализатора ВАХ четырехполюсников:

- 1 – выбор типа четырехполюсника;
- 2 – выбор диапазона изменения напряжения на коллекторе (ось X);
- 3 – выбор шага изменения напряжения на коллекторе;
- 4 – выбор предельного значения тока коллектора;
- 5 – установка начального значения тока базы;
- 6 – выбор шага изменения тока базы;
- 7 – выбор числа кривых;
- 8 – выбор представления масштаба по осям;
- 9 – настройка курсоров;
- 10 – кнопка запуска;
- 11 – кнопка сохранения результатов измерений.

2.1.4.10. Сохранение результатов работы

Результаты измерения, полученные с помощью виртуальных приборов (осциллограф, анализатор АЧХ и ФЧХ, анализатор спектра, анализаторы двух- и четырехполюсников), можно сохранить в различных форматах (.txt, .xls и т. д.). Для этого на панели виртуального прибора необходимо нажать соответствующую кнопку, рис. 2.16.



Рис. 2.16. Вид кнопки сохранения результатов измерения

После нажатия кнопки появляется окно сохранения результатов, рис. 2.17. Далее выбираем директорию, в которую необходимо сохранить числовые результаты, которые можно визуализировать в виде графических зависимостей, например, в Microsoft Office Excel.

Если необходимо сохранить различные графические данные, полученные в ходе выполнения лабораторной работы, то их фиксация осуществляется кнопкой Print Screen SysRq. Эти графики можно также видоизменить с помощью имеющегося программного обеспечения.

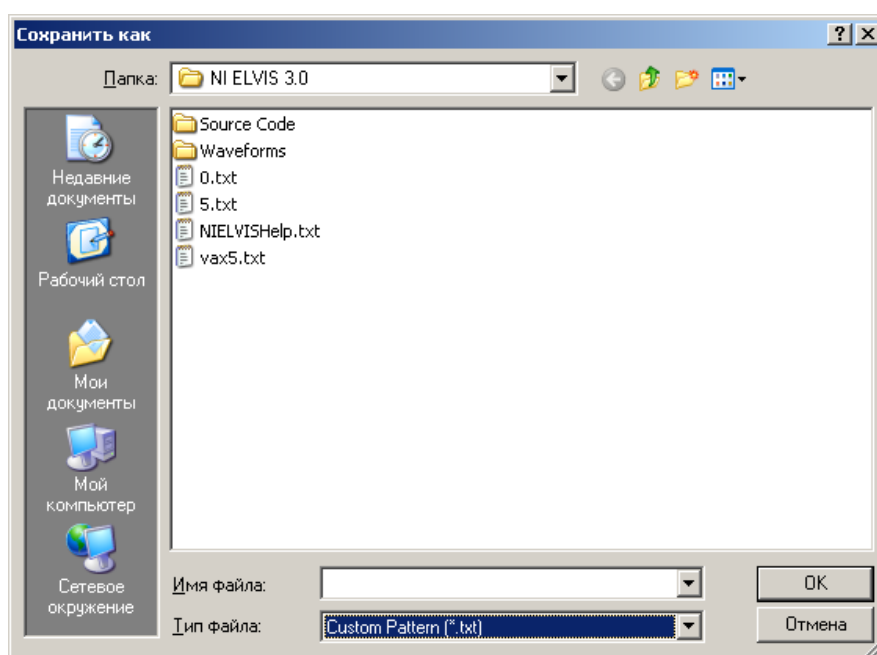


Рис. 2.17. Выбор папки и создание файла для сохранения результатов измерений

Более подробную информацию о приборах можно найти в справочной системе NI ELVIS II Help.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ЦИКЛА В СРЕДЕ NI ELVIS

Сначала голова, а потом руки.
Руководство к действию студентов

Модуль 1. Работы входного цикла

Лабораторная работа № 1.1

Ознакомление с работой в программно-аппаратной среде NI ELVIS II

1. Цель работы

Получить первоначальные навыки выполнения лабораторных работ по аналоговой электронике в программно-аппаратной среде NI ELVIS II.

2. Задачи работы

- изучить с целью дальнейшего использования в лабораторном цикле первый и второй разделы описания лабораторного цикла;
- ознакомиться с инструкцией по охране труда в лабораториях кафедры КИСМ ТПУ;
- подготовиться и практически освоить предложенную программу ознакомительных работ по аналоговой электронике и защитить ее на контрольной работе, предшествующей проведению эксперимента.

3. Программа лабораторной работы

Основные элементы измерительной системы:

- учебная лаборатория NI ELVIS II, использующая программно-аппаратную среду для генерирования различных воздействий в электронные цепи и выполнения измерений их откликов (рис. 3.1);

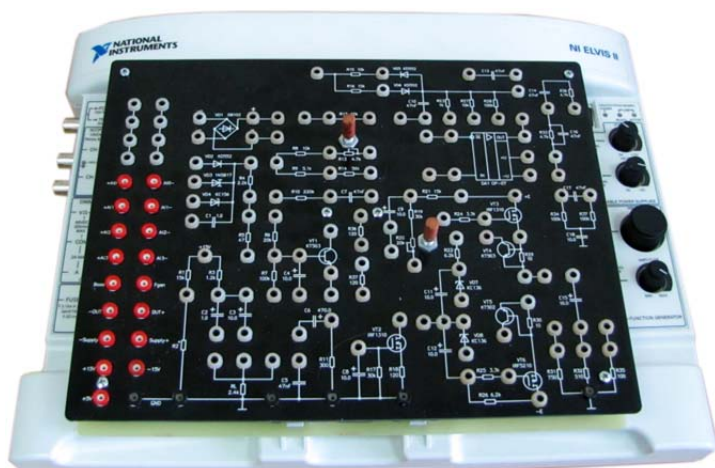


Рис. 3.1. Рабочая станция учебной лаборатории NI ELVIS с лабораторным макетом по электронике

- лабораторный макет по аналоговой электронике кафедры КИСМ для построения схем, выбранных для исследований (см. рис. 2.4).

3.1. Осуществите запуск программного обеспечения NI ELVIS и его инициализацию. Появится перечень приборов (рис. 3.2)

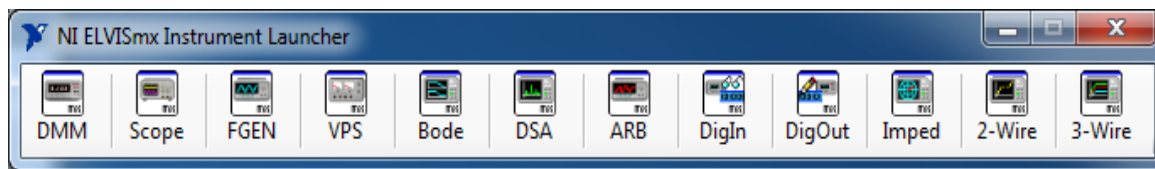


Рис. 3.2. Инициализация набора интерактивных инструментов

3.2. Выполните измерения параметров различных электронных компонентов

- Выберите «DMM» (Digital Multimeter – цифровой мультиметр) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в LabVIEW.

- Измерьте с помощью DMM значения различных сопротивлений лабораторного макета, например, R_4 , R_5 , R_{12} . С этой целью соедините выбранный резистор с входами DMM «V Ω » и «COM», а цифровой вольтметр переведите в режим омметра, нажав кнопку « Ω ».

Проведите измерения и запишите полученные результаты:

$R_4 = \underline{\hspace{1cm}}$; $R_5 = \underline{\hspace{1cm}}$; $R_{12} = \underline{\hspace{1cm}}$. Сравните с номиналами, указанными на макете.

- Измерьте с помощью DMM значения различных конденсаторов лабораторного макета, например, C_1 и C_{13} . С этой целью соедините выбранный конденсатор с входами DMM «V Ω » и «COM», а цифровой вольтметр переведите в режим измерения емкостей, нажав соответствующую кнопку « $\text{—}||\text{—}$ ».

Проведите измерения и заполните строку:

$C_1 = \underline{\hspace{1cm}}$; $C_{13} = \underline{\hspace{1cm}}$. Сравните с номиналами, указанными на макете.

3.3. Освойте процесс получения вольт-амперных характеристик (ВАХ) двух- и четырехполюсников.

- Соберите схему для снятия ВАХ двухполюсников (сначала резистора R_4 , потом диодов: VD_2 – кремниевого точечного диода, VD_3 – диода Шоттки, VD_4 – кремниевого стабилитрона).

Снятие ВАХ осуществляется с помощью анализатора ВАХ двухполюсников «2-Wire» (Two-Wire Current-Voltage Analyzer – двухпроводной вольт-амперный анализатор). Исследуемый двухполюсник подключается к выводам анализатора DUT+ и DUT- на макете. Обобщенная схема эксперимента приведена на рис. 3.3.

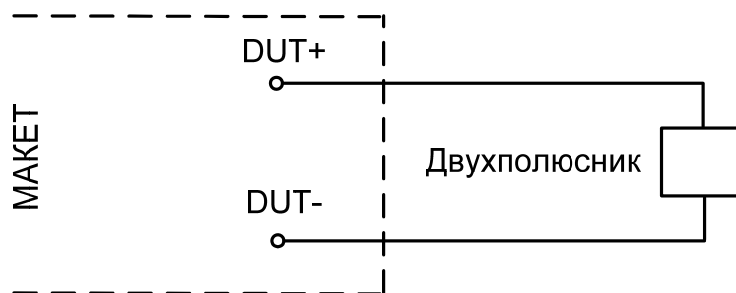


Рис. 3.3. Схема эксперимента для снятия ВАХ двухполюсников (резисторов и диодов)

При получении ВАХ диодов необходимо следить за их включением (прямым или обратным), а также за выбором пределов изменения напряжения (Start, Stop, Increment) и его полярности, чтобы не было превышения токов по сравнению с обозначенными на виртуальной панели предельными значениями (не должно быть надписи типа «Positive current limit exceeded»). –

Сохраните данные по ВАХ в виде файла с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

- Соберите схему для снятия выходных ВАХ биполярного транзистора VT1.

В меню запуска инструментов NI ELVIS выберите функцию «3-Wire» (Three-Wire Current-Voltage Analyzer – трехпроводной вольт-амперный анализатор). Схема подключения транзистора приведена на лицевой панели анализатора и на рис. 3.4.

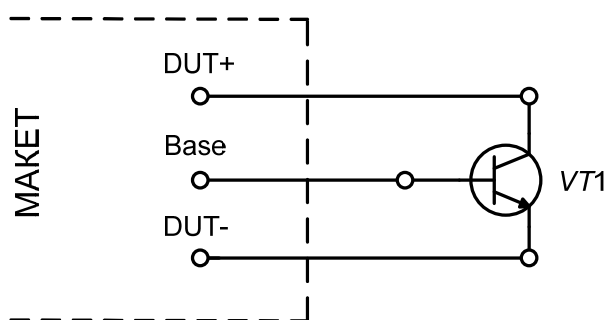


Рис. 3.4. Схема эксперимента для снятия выходных ВАХ транзистора в программно-аппаратной среде NI ELVIS

При получении выходных ВАХ транзистора необходимо задать количество кривых в характеристиках (обычно 6–7 при шаге базового тока 15 мкА) и следить за выбором пределов изменения выходного напряжения (желательно до 9 В), чтобы не вызывать превышения токов коллектора по сравнению с обозначенными на виртуальной панели предельными значениями.

Сохраните выходные ВАХ транзистора в виде массива данных файла и графиков с целью дальнейшего использования в лабораторном цикле и распечатки для отчета.

- Соберите схемы для снятия входных ВАХ биполярного транзистора VT1, приведенные на рис. 3.5, для чего вызовите из меню запуска инструментов NI ELVIS функцию «2-Wire».

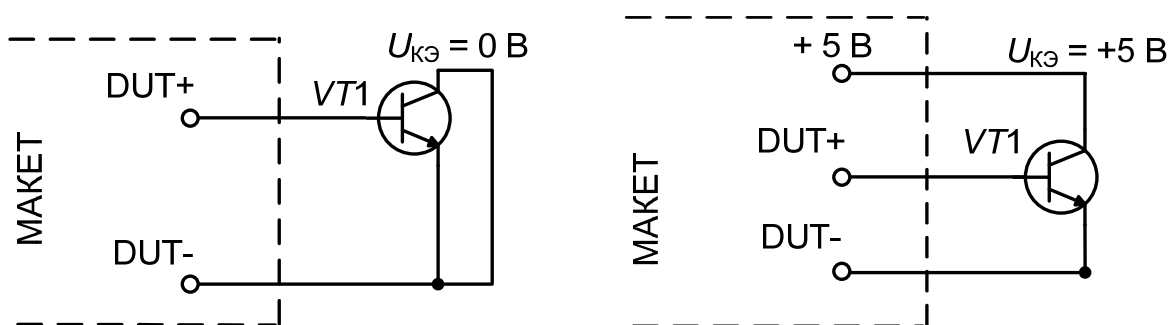


Рис. 3.5. Схемы для снятия входных ВАХ транзистора в программно-аппаратной среде NI ELVIS при $U_{КЭ} = 0 \text{ В}$ и $U_{КЭ} = +5 \text{ В}$

Входные характеристики транзистора получите для двух значений выходного напряжения $U_{КЭ} = 0 \text{ В}$ и $U_{КЭ} = +5 \text{ В}$. При снятии ВАХ обратите внимание на правильное взаимное расположение полученных характеристик.

Сохраните данные входных ВАХ транзистора в виде файлов с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета.

3.4. Создайте и исследуйте схему делителя напряжения постоянного тока

- Соберите схему делителя на резисторах $R6$ и $R7$ (рис. 3.6). При сборке схемы входное напряжение $U_{ВХ} = +5 \text{ В}$ делителя подайте на его вход (на резистор $R6$) через дополнительные клеммы, чтобы иметь возможность в дальнейшем измерить входное напряжение с помощью DMM, подсоединив в эту точку потенциальный вход вольтметра «V Ω » (на схеме показано пунктиром).

- Выберите Digital Multimeter (цифровой мультиметр) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в LabVIEW.

- Измерьте, используя DMM, входное $U_{ВХ}$ и выходное $U_{ВЫХ}$ напряжения делителя. Рассчитайте выходное напряжение, зная $U_{ВХ} = +5 \text{ В}$ и значения резисторов делителя, измеренные Вами ранее. Определите, насколько хорошо совпадают теоретические и экспериментальные данные.

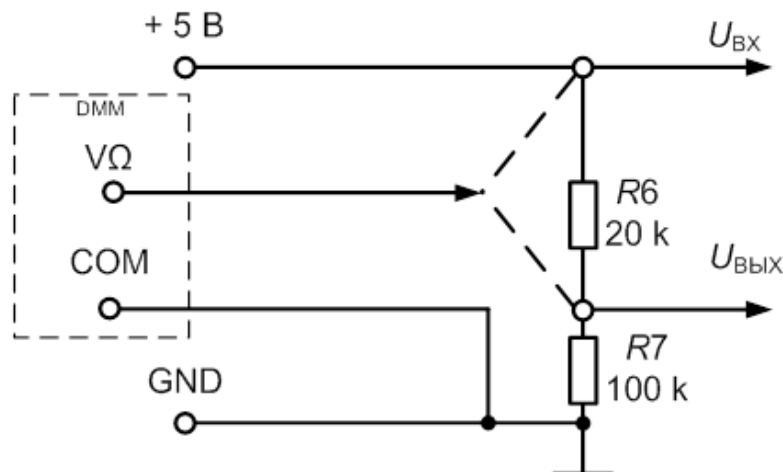


Рис. 3.6. Схема исследования резистивного делителя напряжения постоянного тока (пунктир означает, что для измерения напряжений необходимо переключать вход вольтметра на вход или выход делителя)

3.5. Создайте и исследуйте схему делителя с изменяющимися значениями выходного напряжения, используя Variable Power Supplies (VPS)

- Соберите схему делителя на резисторах $R6$ и $R7$ (рис. 3.6), в котором вместо источника +5 В используйте перестраиваемый источник питания VPS. С этой целью отсоедините провод от клеммы +5 В и присоедините его к выводу Supply+.
- Выберите перестраиваемый источник питания VPS среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в LabVIEW.
- Изменяя значения источника VPS как $U_{ВХ}$ от 0 до +12 В через 2 В, получите и зафиксируйте значения $U_{ВЫХ}$, используя DMM.
- Введите массив полученных данных в Excel, с помощью которого рассчитайте коэффициенты передачи делителя по напряжению и обработайте их как массив случайных чисел.

3.6. Создайте и исследуйте схему делителя с изменяющимися значениями выходного напряжения, используя переменное сопротивление $R13$

- Соберите делитель на резисторах $R13$ и $R8$ (рис. 3.7).
- Измерьте, используя DMM, входное $U_{ВХ}$ и выходное $U_{ВЫХ}$ напряжения делителя для различных положений движка потенциометра $R13$.
- Убедитесь в возможностях изменения выходного напряжения и коэффициента передачи делителя напряжения.
- Рассчитайте сопротивление $R13'$ по полученным коэффициентам передачи цепи.

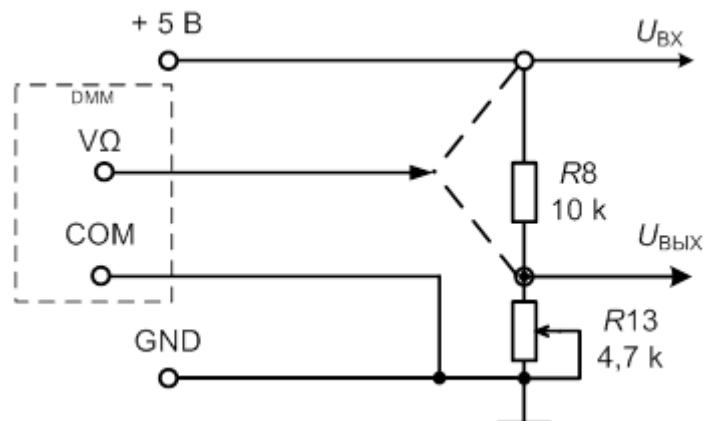


Рис. 3.7. Схема исследования резистивного делителя напряжения постоянного тока с потенциометром
(пунктир означает, что для измерения напряжений необходимо переключать вход вольтметра на вход или выход делителя)

3.7. Исследование работы последовательной RC -цепи с помощью функционального генератора и осциллографа

- Соберите схему последовательной RC -цепи (рис. 3.8), источником питания которой является функциональный генератор Fgen, а входной и выходной сигналы просматриваются каналами осциллографа SCOPE (CH 0 и CH 1).
- Из меню запуска инструментов NI ELVIS выберите функцию «FGEN» (Function Generator – функциональный генератор).
- Выберите функцию «Scope» (Oscilloscope – осциллограф) из меню запуска инструментов NI ELVIS.

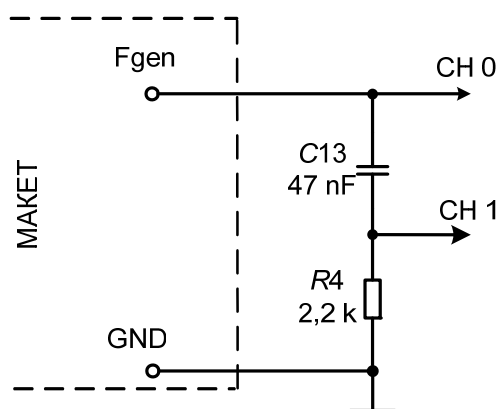


Рис. 3.8. Схема исследования последовательной RC -цепи

- Рассчитайте частоту среза RC -цепи $f_{ср} = 1/(2 \cdot \pi \cdot R \cdot C)$ и установите близкое к ней значение частоты на функциональном генераторе. Используйте режим генерации синусоидального напряжения с амплитудным значением 1 В.

- Измерьте значения входного и выходного напряжений (осциллограф способен измерять различные параметры сигнала, такие как частота, пиковая амплитуда и т. д.). Эта возможность активируется установкой галочки в поле «Display Measurements» для каждого из каналов. Результаты измерений можно увидеть в нижней части экрана осциллографа.

- Сопоставьте между собой полученные значения напряжений с ожидаемым результатом и сделайте вывод о правильности выполненной работы.

- На экране осциллографа измерьте фазовый сдвиг между сигналами в каналах 0 и 1 на этой частоте, для чего используйте курсоры, определяя время между сигналами (dT). Совпадает ли он с известным теоретическим значением для цепи первого порядка?

- Уменьшайте частоту генератора по сравнению с частотой среза цепи. Что происходит с изменением модуля коэффициента передачи и фазовым сдвигом цепи? Зафиксируйте полученные данные.

- Увеличивайте частоту генератора по сравнению с частотой среза цепи. Что происходит с изменением модуля коэффициента передачи и фазовым сдвигом цепи? Зафиксируйте полученные данные.

Чтобы автоматизировать просмотр изменений выходного напряжения и фазового сдвига при изменении частоты сигнала, переведем работу генератора в режим «сweeping» нажатием кнопки «Sweep». С этой целью, зная частоту среза цепи, установите начальное (Start Frequency) и конечное (Stop Frequency) значения частот для исследования цепи, а также шаг изменения частоты (Step) и временной интервал (Step Interval) между последовательными изменениями частоты генерируемого сигнала (рекомендуется устанавливать время более 1000 ms).

3.8. АЧХ/ФЧХ RC-цепи

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), или амплитудный отклик, – это зависимость модуля коэффициента передачи схемы, выраженного в относительных единицах или в децибелах, от частоты или десятичного логарифма частоты. Фазово-частотная характеристика (ФЧХ), или фазовый отклик, – это зависимость разности фаз между входным и выходным сигналами, выраженного в градусах или радианах от частоты или десятичного логарифма частоты.

При работе с анализатором Бode необходимо выключить панели управления генератора FGEN и осциллографа Scope.

- Проведите следующие изменения в схеме подключения исследуемой цепи (рис. 3.9): выходной разъем Fgen присоедините к входу AI1+; выходное напряжение схемы подается на контакты AI0+; выводы AI1- и AI0- подключаются на Ground макета.

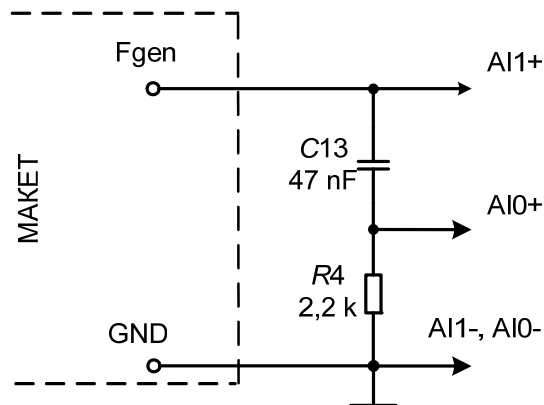


Рис. 3.9. Схема исследования RC -цепи с анализатором Боде

- Выберите функцию «Bode» (Bode Analyzer – анализатор Боде) из меню запуска инструментов NI ELVIS.
- Выберите в настройках анализатора: Stimulus Channel – AI1; Response Channel – AI0.
- Вместо подключений каналов AI<...> можно использовать каналы осциллографа CH 0 и CH 1 (рис. 3.8), тогда в настройках анализатора установите следующее: Stimulus Channel – CH 0; Response Channel – CH 1.
- Установите начальную частоту Start = 100 Гц, конечную – Stop = 35 кГц, а число шагов на декаду (Steps per decade) – Steps = 10.
- Используйте опцию из меню Graph Settings для установки шкалы Y в режим Autoscale. В меню Cursor Settings поставьте галочку для отображения курсоров на графиках АЧХ и ФЧХ, предназначенных для считывания значений частотных характеристик.
- Нажмите кнопку запуска «Run».
- Зафиксируйте полученные данные. Так как Oscilloscope и Bode Analyzer содержат кнопку Log, то при нажатии на эту кнопку данные, изображенные на графиках, будут записываться в текстовый файл на жесткий диск компьютера. Эти данные можно использовать для дальнейшего исследования с помощью Excel, LabVIEW или других программ анализа и построения данных.

3.9. Реакция RC -цепи на последовательность прямоугольных импульсов

Исследование поведения RC -цепи под воздействием входных однопольных импульсов с амплитудой 1 В позволяет оценить ее переходные характеристики как реакцию на положительный и отрицательный фронты, представленные единичными функциями.

- Для этого восстановите схему, изображенную на рис. 3.8.
- Из меню запуска инструментов NI ELVIS выберите функцию «FGEN» (функциональный генератор). Установите режим генерации

прямоугольных импульсов положительной полярности с амплитудой 1 В. Для обеспечения однополярных импульсов необходимо использовать смещение относительно нуля – DC Offset.

- Подсчитайте постоянную времени исследуемой цепи и на ее основе установите частоту следования импульсов с периодом $T \approx (2 \cdot \pi) \cdot 10 \cdot \tau$.

- Выберите функцию «Scope» из меню запуска инструментов NI ELVIS.

- Получите осциллограммы входного и выходного напряжений цепи и определите по ним постоянную времени. Сравните расчетное и экспериментальные значения постоянной времени. Поясните изменения выходного напряжения с помощью коммутационных законов электротехники. Произведите расчет переходной характеристики исследуемой цепи.

4. Контрольные вопросы к лабораторной работе

- 4.1. Каким образом включается и выключается аппаратура лабораторного комплекса, работающего в среде NI ELVIS?
- 4.2. Как выбрать и инициировать приборы и устройства (Digital Multimeter, Two-Wire Current Voltage Analyzer, Three-Wire Current Voltage Analyzer, Variable Power Supplies, Function Generator, Oscilloscope, Bode Analyzer) среди набора интерактивных инструментов, которые выполнены в LabVIEW?
- 4.3. Составьте схему измерения сопротивления без использования омметра (предложите несколько вариантов нахождения значения сопротивления).
- 4.4. Приведите на одном графике вольт-амперные характеристики маломощных кремниевого диода и диода Шоттки. Укажите ожидаемые значения напряжений.
- 4.5. Поясните работу схемы для снятия ВАХ диодов.
- 4.6. Изобразите и поясните работу схемы, с помощью которой снимаются выходные ВАХ транзистора.
- 4.7. По каким схемам снимаются входные ВАХ транзистора при различных значениях его выходного напряжения?
- 4.8. Как можно регулировать напряжение постоянного тока? Приведите схемы и рассчитайте значения токов в них.
- 4.9. Приведите схемы регулирования напряжения постоянного тока с помощью делителя напряжения с переменным сопротивлением (потенциометром).
- 4.10. Изобразите ожидаемые АЧХ и ФЧХ исследуемой RC-цепи.
- 4.11. Поясните работу лабораторной установки в режиме «свирированной» (качающейся или изменяющейся) частоты генера-

тора, когда можно просмотреть изменения амплитуды и фазы выходного напряжения в зависимости от частоты входного сигнала.

- 4.12. Рассчитайте значение фазового сдвига между входным и выходным напряжениями исследуемой RC -цепи на частоте среза?
- 4.13. Рассчитайте асимптоты значений модуля коэффициента передачи и фазового сдвига цепи, если частота сигнала стремится к нулю или к бесконечно большому значению.
- 4.14. Поясните, каким образом, используя осциллограф, можно измерять значения фазового сдвига между входным и выходным напряжениями.
- 4.15. Приведите расчет переходной характеристики RC -цепи.
- 4.16. Как по экспериментальным данным, полученным в ходе эксперимента по изучению воздействия последовательности прямоугольных импульсов на входе RC -цепи, определить постоянную времени исследуемой цепи? Приведите графические построения.
- 4.17. Как сохраняются и обрабатываются полученные при экспериментах данные? Приведите на конкретном примере алгоритм действий.
- 4.18. Как сохраняются и обрабатываются полученные при эксперименте графические данные? Приведите на конкретном примере алгоритм действий.

5. Требования к отчету

Отчет должен содержать схемы и результаты эксперимента, обработанные в соответствии с целями работы, выводы.

При оформлении отчета необходимо использовать рекомендации, изложенные в разделе 1.3 учебного пособия.

Лабораторная работа № 1.2

Диагностика структуры двухполюсника и определение параметров его элементов

1. Цель работы

Проверить остаточные знания студентов по анализу процессов, протекающих в пассивном двухполюснике, и умения проведения лабораторных испытаний простейших линейных цепей.

При выполнении лабораторной работы студент будет иметь дело с двухполюсниками, состоящими из различных элементов (конденсаторов, резисторов, катушек индуктивности), причем в каждом из двухполюсников находится не более двух разных и неизвестно как соединенных элементов.

Лабораторная работа является одним из тестов диагностического контроля в начале обучения электронных курсов после усвоения студентами таких дисциплин, как «электротехника», «теория электрических цепей и сигналов» или им подобных и предполагает наличие у студентов следующих базисных пониманий, знаний и умений:

- понимание различных конфигураций двухполюсников при заданных выше ограничениях;
- знаний основных законов нахождения отклика на заданное входное воздействие (включение постоянного тока, гармонического напряжения, импульсной последовательности);
- умений составления схем эксперимента с грамотной установкой источников сигналов, измерительных приборов и образцовых сопротивлений;
- умений спланировать простые алгоритмы, направленные на получение требуемой измерительной информации, а затем на ее обработку.

2. Задачи работы

Проверка подготовки студентов. Проверка студентов на их готовность к лабораторной работе может осуществляться по следующим контрольным вопросам:

- 2.1. Сколько существует вариантов двухполюсников, если они содержат не более двух разных элементов R , L , C ? Изобразите схемы этих двухполюсников.
- 2.2. Составьте дифференциальные уравнения для выбранного Вами двухполюсника, считая ток (напряжение) выходными, а напряжение (ток) входными переменными двухполюсника.
- 2.3. Используя символический метод анализа, определите входное сопротивление выбранного Вами двухполюсника. Изобразите АЧХ $Z_{\text{вх}}$.

- 2.4. В каких схемах двухполусников может наблюдаться явление резонанса при данных выше ограничениях?
- 2.5. Поясните с физических и математических позиций процесс резонанса напряжений. Какие требования к источнику гармонического сигнала необходимо предъявить, чтобы используемый источник не ухудшал избирательность (добротность) двухполусника.
- 2.6. Поясните с физических и математических позиций резонанс токов. Какие требования к источнику гармонического сигнала надо предъявить, чтобы он не ухудшил избирательные свойства (добротность) двухполусника?
- 2.7. Что такое переходная характеристика $h(t)$? Для выбранного Вами RC - или RL -двухполусника найдите и изобразите $h(t)$ как реакцию тока I на скачок единичного напряжения.
- 2.8. Поясните принципиальную возможность определения вида двухполусника и параметров входящих в него элементов, если тестовыми сигналами являются: напряжение постоянного тока; напряжение переменного тока с изменяющейся частотой, если они включены в момент t_0 , а измеряется ток двухполусника.
- 2.9. Как можно измерить ток в цепи, если в Вашем распоряжении имеются только вольтметры и известное сопротивление? Приведите схему.
- 2.10. Приведите возможную последовательность действий, направленных на определение вида двухполусника, если используется источник напряжения постоянного тока, а измеряется тем или иным способом ток.
- 2.11. Какие схемы из возможных двухполусников могут быть диагностированы по алгоритмам п. 2.10, если использованы: установившееся значение тока (без короткого замыкания источника); переходный процесс тока.
- 2.12. Приведите возможную последовательность действий для определения вида двухполусника, если используется источник напряжения переменного тока, частота которого может меняться.
- 2.13. Используя п. 12, приведите схему и расчетные соотношения, позволяющие для одной из возможных схем двухполусника определить его параметры.
- 2.14. Как упростить расчетные формулы, позволяющие рассчитать значения параметров элементов двухполусника, если использовать асимптоты в поведении АЧХ двухполусника в области низких и высоких частот.
- 2.15. Через образцовый резистор R_0 двухполусник подключен к источнику напряжения постоянного тока E . Какой вид может иметь двухполусник, если установившееся значение тока равно:
а) $I = E/R_0$; б) $I = 0$; в) $I < E/R_0$.

3. Краткие сведения для подготовки к лабораторной работе

3.1. Описание объекта исследования

Объектом исследования является двухполюсник, имеющий два доступных для внешних соединений зажима, но с неизвестной внутренней структурой и видом используемых элементов. Учитывая, что в двухполюснике находятся два разных элемента из базиса R , L , C и они могут соединяться последовательно или параллельно, можно найти все 6 вариантов структуры исследуемого «черного ящика».

3.2. Определение задач исследования

В соответствии с названием лабораторной работы во время исследований необходимо решить две задачи:

- 1) определить внутреннюю структуру соединений элементов и их вид, то есть диагностировать (провести структурную оптимизацию) один из 6-ти возможных вариантов двухполюсника;
- 2) провести лабораторные исследования над двухполюсником данного вида с целью расчета параметров входящих в него элементов, т. е. осуществить параметрическую оптимизацию.

Обе эти задачи могут быть решены путем тестирования двухполюсника воздействиями определенного вида и изучения откликов на эти воздействия. Для решения первой задачи достаточно в основном провести качественные исследования, а для второй – количественные с обработкой результатов измерений.

3.3. Возможная методика определения вида двухполюсника

В общем случае диагностировать вид двухполюсника можно, изучив выходной отклик на произвольно заданное входное воздействие. Такими воздействиями, реально осуществимыми в лаборатории, могут быть:

- напряжение постоянного тока от источников постоянного напряжения (+5 В, VPS);
- напряжение переменного тока с генератора гармонических сигналов (FGEN);
- напряжение с импульсного генератора (FGEN) в виде последовательностей прямоугольных импульсов с требуемой частотой и скважностью.

Пусть Вы выбрали самое простое воздействие на двухполюсник – включение в некоторый момент времени постоянного напряжения. Не зная вида двухполюсника, при проведении этого теста можно получить короткое замыкание для источника питания. Чтобы этого не происходило для любого источника сигнала, необходимо исследуемый двухполюсник включать через последовательно включенный резистор. Если временно исключить из схемы (закоротить) двухполюсник, то с помо-

щью измерительных приборов легко определить I_0 , $U_{\text{вх}}$ и R_0 . После включения двухполюсника в схему последовательно с сопротивлением R_0 возможны варианты установившегося значения постоянного тока:

1) $I \approx I_0$; 2) $I < I_0$; 3) $I = 0$.

Полученные результаты не позволяют однозначно диагностировать двухполюсник. Например, если $I = 0$, то исследуемый двухполюсник содержит два последовательно соединенных элемента – конденсатор и резистор или индуктивность.

Чтобы определить «свой» двухполюсник из двух возможных, необходимо дальнейшее тестирование. Критериями такого тестирования могут быть:

- обнаружение и изучение резонансных явлений в исследуемой схеме (использование Bode Analyzer);
- определение характера переходных процессов (использование генератора FGEN);
- изучение вида полученной в ходе проведения эксперимента амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Для выбранного Вами вида тестирования необходимо составить принципиальную схему эксперимента, выбрать источники сигналов и измерительные приборы, из имеющихся приборов в меню лаборатории NI ELVIS. При выборе последних помните, что при необходимости измерения параметров изменяющегося во времени тока лучше использовать и измерять падение напряжения на образцовом резисторе R_0 .

Например, выбрав способ тестирования двухполюсника в виде передачи воздействия с генератора гармонического напряжения и используя два измерителя напряжения в каналах CH 0 и CH 1 осциллографа (Scope), Вы можете по-разному последовательно соединить сопротивление R_0 и двухполюсник.

В одном случае можно исследовать АЧХ входной проводимости (сопротивления) двухполюсника. Проводя исследования по другой схеме, анализу подвергается АЧХ коэффициента передачи по напряжению.

Пусть, например, продолжая вышеприведенный пример, когда результатом тестирования схемы на постоянном токе явилось $I = 0$, можно прийти к двум вариантам схемы двухполюсника:

- 1) последовательное соединение R и C ;
- 2) последовательное соединение L и C .

Протестировав двухполюсник гармоническим сигналом по схеме, позволяющей определить его АЧХ, можно уточнить структуру двухполюсника по наличию или отсутствию резонансных явлений.

Отсутствие резонансных явлений фиксируется при монотонных изменениях выходного напряжения при неизменных значениях входного напряжения в полосе частот исследования. В этом случае диагностируется двухполюсник RC -типа, с последовательно включенными сопротивлением и емкостью.

Если при испытаниях обнаружено, что максимальный ток через сопротивление R_0 протекает на определенной частоте f_0 , то исследуемый двухполюсник обладает свойствами последовательного резонанса. Тогда он состоит из последовательно включенных индуктивности L и конденсатора C .

При тестировании двухполюсника за счет изучения характера переходных процессов необходимо генератор FGен переключить на генерацию последовательности прямоугольных импульсов со скважностью 2.

Как известно, в этом случае имеется возможность изменения периода (частоты следования) и длительности импульса. Для определения вида двухполюсника целесообразно также использовать двухканальный осциллограф, чтобы регистрировать виды переходных процессов на выходном импульсном напряжении.

Экспоненциальные виды переходного процесса указывают, что исследуемая цепь является схемой первого порядка. Наличие резонансных явлений можно обнаружить по колебательному переходному процессу.

Для облегчения обнаружения резонансных свойств лучше закоротить сопротивление R_0 (убрать его) с целью увеличения добротности последовательного колебательного контура. Следует также подобрать частоту следования генератора, близкую к резонансной частоте контура.

Аналогичные рассуждения и эксперименты следует проводить для уточнения вида двухполюсника после его первого тестирования на постоянном токе, когда имеют место варианты: $I \approx I_0$ или $I < I_0$.

Результатом домашней подготовки является наработка возможных методик определения вида двухполюсника (определение одного из шести возможных вариантов) с указанием принципиальных схем и алгоритмами тестирования.

3.4. Возможная методика расчета параметров элементов двухполюсника

Прежде всего, обратим внимание на то, что неизвестными являются два параметра двух элементов двухполюсника. Значит, для их определения необходима система из двух независимых уравнений, полученных на основе проведенных экспериментов.

Задача упрощается, если так продумать исследования, чтобы в каждом из уравнений было только одно неизвестное. Для некоторых из возможных схем двухполюсников такое «разделение» можно осуществить

при тестировании схемы по значению установившегося постоянного тока. Например, если в эксперименте получено значение тока $I < I_0$, то это означает, что исследуется один из двух возможных двухполюсников:

- 1) последовательное соединение R и L ;
- 2) параллельное соединение R и C .

Для обоих случаев, измерив токи I и I_0 , определим

$$R = R_0 \cdot \frac{I_0 - I}{I}.$$

Возможность определения параметра элемента при одном тестировании проявляется и в экспериментах на переменном токе.

Так, для двухполюсника из последовательно соединенных сопротивлений R и емкости C , с которого снимается выходной сигнал и на который напряжение с генератора подается через сопротивление R_0 , коэффициент передачи по напряжению практически определяется только значениями сопротивлений R_0 и R на частотах, когда $\omega \cdot C \cdot R \gg 1$. Этот случай внешне проявляется практической независимостью выходного напряжения (коэффициента передачи) от частоты. Тогда

$$R \approx R_0 \cdot \frac{K}{1 - K},$$

где $K = \frac{U_2}{U_1}$, а U_1 , U_2 – значения входных и выходных напряжений.

Другая асимптота коэффициента передачи имеет место для этой схемы, когда $R_0 \gg R$ и $\omega \cdot C \cdot R \ll 1$. В этом случае

$$\dot{K} = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau},$$

где $\tau = C \cdot (R + R_0) \approx C \cdot R_0$ и двухполюсник является инерционным звеном первого порядка, частота среза (то есть частота, на которой $|\dot{K}| = 0,707$) которого равна

$$\omega_{\text{ср}} = 1/(C \cdot R) \ll 1/\tau \approx 1/(C \cdot R_0).$$

Тогда $C \approx 1/(\omega_{\text{ср}} \cdot R_0)$.

Аналогичные выкладки имеют место для двухполюсника, состоящего из сопротивления R и индуктивности L , параллельно соединенной сопротивлению. В области верхних частот, когда $\omega \cdot L \gg R$, коэффициент передачи по напряжению при тех же условиях практически определяется соотношением R и R_0 . Значение индуктивности L определим, выполнив дополнительные испытания на переменном токе.

В том случае, если исследуемый двухполюсник обладает свойствами резонанса напряжений или резонанса токов, то есть представлен последовательно или параллельно соединенными индуктивностью и емкостью, определение L и C можно осуществлять, устанавливая резонансную частоту и полосу пропускания на уровне -3 дБ относительно поведения схемы на резонансной частоте.

Известно, что резонансные свойства контуров лучше проявляются при большей их добротности. С этой целью в экспериментах по исследованию резонанса напряжения целесообразно R_0 уменьшать, а в схеме с резонансом тока – увеличивать. В первом случае резонансная частота f_0 может быть зафиксирована по максимуму тока и минимуму напряжения на двухполюснике. Во втором случае, расстроив частоту генератора по обе стороны относительно f_0 , когда затухание достигнет -3 дБ ($1/\sqrt{2} = 0,707$) относительно значений на резонансной частоте, определим f_n и f_v и полосу пропускания $(2 \cdot \Delta f) = f_v - f_n$.

Найденные значения используются для определения L и C на основе уравнений:

$$\begin{cases} f_0 \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \\ 2 \cdot \Delta f \approx \frac{f_0}{Q} \end{cases},$$

где Q – добротность контура.

Если в ходе эксперимента достигнута погрешность $\pm 20\%$ в определении значений параметров двухполюсника, то лабораторные исследования можно считать завершенными.

4. Программа лабораторной работы

- 4.1. Получить допуск к лабораторной работе, ответив на один контрольный вопрос из перечня вопросов подготовки.
- 4.2. Собрать схемы и провести эксперименты по выбранной и разработанной в результате самостоятельной внеаудиторной работы методике определения вида двухполюсника.
- 4.3. Провести эксперименты, исследуя схемы, наработанные в ходе самостоятельной подготовки для определения параметров элементов двухполюсника.
- 4.4. Зафиксировать экспериментальные данные, необходимые для выполнения задачи.
- 4.5. Рассчитать значения параметров элементов и сверить их значения.

Работа считается завершенной, если значения параметров элементов двухполюсника не отличаются от реальных их параметров в пределах $\pm 20\%$.

Если рассчитанные значения параметров элементов двухполюсника существенно отличаются от реальных, а работа проведена корректно, то необходимо вновь провести эксперимент. При этом нужно изменить модель индуктивного элемента двухполюсника, учитывая его омическое сопротивление.

5. Требования к отчету

Отчет должен содержать: цель работы, методику проведенных исследований с выводом необходимых расчетных соотношений для определения параметров элементов, использованные в экспериментах схемы и полученные при исследованиях данные, расчет параметров элементов по полученным данным, выводы.

При оформлении отчета необходимо использовать рекомендации, изложенные в разделе 1.3 учебного пособия.

Модуль 2. Исследование активных элементов и простых схем по их применению

Лабораторная работа № 2.1

Исследование диодов и диодных схем

1. Цель работы

- овладеть методикой снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов;
- освоить расчет основных параметров диодов, характеризующих их как нелинейные элементы;
- получить практические навыки исследования схем лабораторной работы.

2. Задачи работы

- подготовиться к лабораторной работе, т. е. знать и понимать процессы, происходящие в исследуемых схемах;
- проработать разделы порядка выполнения работы, отвечая по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- ответить на контрольные вопросы методических указаний;
- качественно обработать полученные экспериментальные данные, подготовить и защитить отчет.

3. Краткие сведения для подготовки к лабораторной работе

Чтобы снять вольт-амперную характеристику диода при его прямом включении, необходимо изменять значения тока в диодной цепи в пределах, меньших его предельных значений, и измерять значения токов и падений напряжений на диоде.

В программно-аппаратной среде NI ELVIS данный процесс автоматизирован за счет использования анализатора вольт-амперных характеристик двухполюсников (Two-Wire Current Voltage Analyzer).

Ввиду того, что такие исследования проводились в первой лабораторной работе, то данные и графики ВАХ различных диодов снимаются в этой работе только в случае утери первых.

Дополнительно обратите внимание, что отличительным свойством выпрямительных диодов является их вентильное свойство, т. е. способность хорошо проводить ток при прямом включении и практически не проводить в обратном включении.

Вентильные свойства выпрямительных диодов широко используются в схемах выпрямителей и ограничителей напряжения.

Как известно, вольт-амперная характеристика диода (ВАХ) нелинейная, поэтому в любой ее точке имеют место свои значения статического и дифференциального сопротивлений диода (рис. 3.10):

$$R_{\text{ст}} = \left(\frac{U}{I} \right)_A = \text{ctg } \alpha, \quad R_d \approx \left(\frac{\Delta U}{\Delta I} \right)_A = \text{ctg } \beta.$$

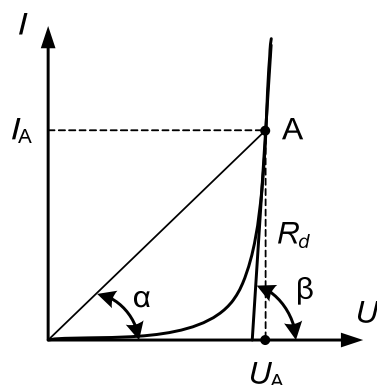


Рис. 3.10. Статическое и дифференциальное сопротивления диода для рабочей точки A

При питании диодных цепей гармоническим напряжением можно различить режимы «большого» и «малого» сигналов.

В первом случае организуется нелинейный режим работы диода, когда амплитуда переменного напряжения на нем значительно в схеме (рис. 3.11) превышает напряжение отсечки при кусочно-линейной аппроксимации ВАХ диода.

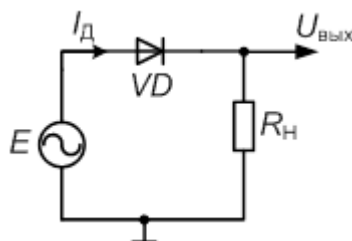


Рис. 3.11. Режим «большого» сигнала в схеме выпрямителя, работающего на активную нагрузку

Как известно, в этом режиме нагрузочная прямая, положение которой определяется сопротивлением нагрузки, будет перемещаться параллельно самой себе при изменениях мгновенных значений напряжения источника входного сигнала.

Абсцисса рабочих точек показывает значение напряжения U , падающего на диоде.

При открытом диоде (после E_0) напряжение на нагрузке будет повторять форму тока $I_D(t)$, а амплитуда его в первом приближении будет отличаться от E_M на значение порядка напряжения отсечки E_0 (рис. 3.12). Угол отсечки Θ тока I_D и напряжения U_{RH} при этом будет меньше 90° .

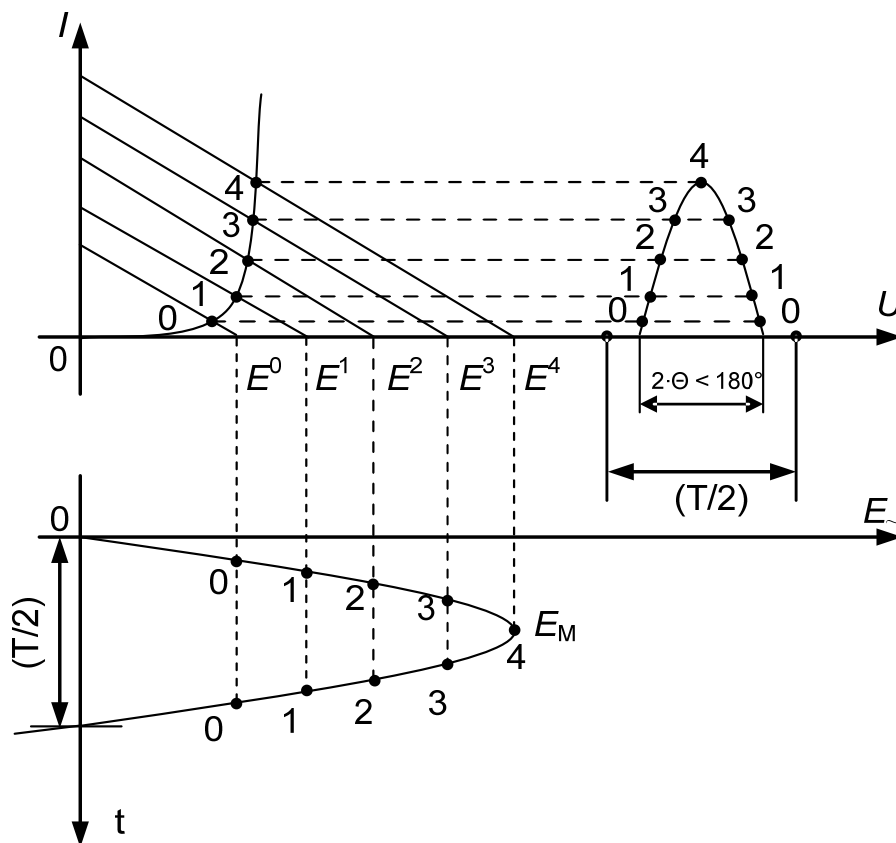


Рис. 3.12. Графические построения на ВАХ диода выпрямителя с активной нагрузкой

Итак, в указанном режиме работы диода – в режиме большого сигнала – его нелинейность и вентильные свойства проявляются в отсечке тока, когда ток в цепи практически отсутствует на отрицательной полуволне входного гармонического сигнала и на части его положительной полуволны.

Определив в ходе выполнения лабораторной работы начало и конец протекания тока диода (во времени или через углы $\omega \cdot t$), найдите путем разложения в ряд Фурье сначала постоянную составляющую тока, а затем и выходного напряжения на нагрузке.

Схема однофазного выпрямителя, работающего на активную нагрузку, используется редко, так как создает сильно пульсирующий ток в нагрузке. Если простота однофазной схемы заставляет отдать ей предпочтение по сравнению с многофазными схемами выпрямителей, то используют схему с дополнительным конденсатором фильтра (рис. 3.13).

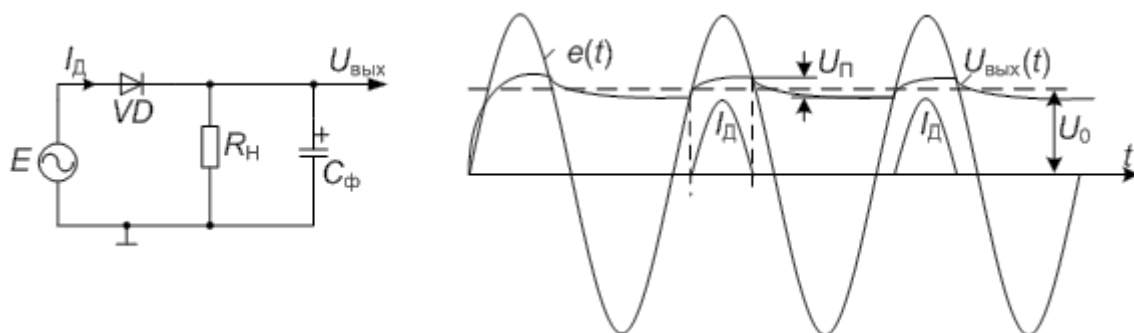


Рис. 3.13. Схема однополупериодного выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой и временные диаграммы сигналов

Как видно из рисунка, диод открывается только на положительной полуволне напряжения с генератора, когда в первом приближении сравниваются входное и выходное напряжения. Угол отсечки тока диода в выпрямителе с активно-емкостной нагрузкой при тех же условиях меньше, чем в схеме выпрямителя с активной нагрузкой.

Если нагрузку отключить в схеме рисунка 3.13, то угол отсечки тока диода устремится к нулю, выходное напряжение приблизится к амплитудному значению входного сигнала, а схема будет называться амплитудным или пиковым детектором. При увеличении входного напряжения диод открывается и постоянная времени цепи будет малой и близкой к значению $\tau_3 \approx R_d \cdot C_F$. Наоборот, при уменьшении входного напряжения диод закрывается. Тогда постоянная времени цепи будет большой и близкой к значению $\tau_P \approx R_H \cdot C_F \gg \tau_3$. Таким образом, пиковый детектор характеризуется различной инерционностью при обработке изменений входного напряжения на его увеличение или уменьшение.

Напряжение на нагрузке (рис. 3.13), а значит и ток через нее, при фиксированных параметрах элементов схемы пульсируют около среднего значения тем меньше, чем меньше время, в течение которого емкость разряжается на нагрузку, т. е. выше частота генератора. С другой стороны, при фиксированной частоте генератора напряжение пульсаций $U_{\text{П}}$ уменьшается при увеличении емкости фильтра.

Наряду с различными схемами выпрямителей вентильные свойства диодов широко используются в других схемах и, в частности, в ограничителях.

Такие схемы используются, когда требуется направленно исказить гармонический сигнал, чтобы резко обогатить спектр и получить возможность выделить нужную гармоническую составляющую, отсутствующую во входном сигнале. Наиболее часто ограничители применяются для целей защиты электрических цепей, чтобы в нужном месте схемы значение сигнала не превышало заданного.

Примером может служить схема последовательного ограничителя, приведенная на рис. 3.14.

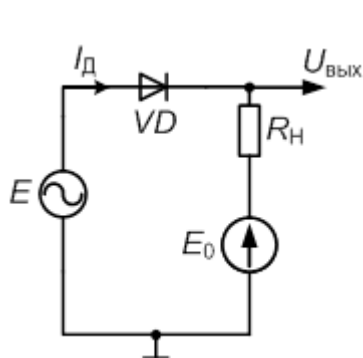


Рис. 3.14. Схема последовательного ограничителя сигналов

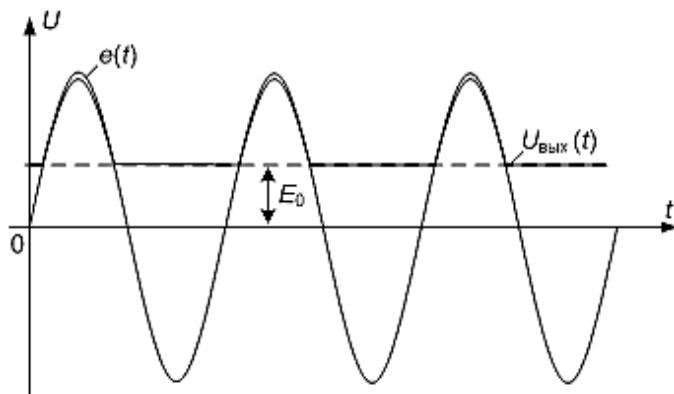


Рис. 3.15. Временные диаграммы сигналов в схеме последовательного ограничителя

Если в первом приближении диод открывается при $U_d \geq 0$ и имеет значение дифференциального сопротивления R_d , то при $E \geq E_0$ приращения входного напряжения передаются на выход с коэффициентом передачи $K_E = R/(R + R_d) \approx 1$, рис. 3.15.

Приращения же напряжения постоянного тока относительно E_0 передаются на выход с коэффициентом

$$K_E = R/(R + R_d) \approx 0.$$

Когда диод закрыт, то есть $(R_d)_{\text{ОБР}} \gg R$, передача переменного напряжения с входа на выход практически не осуществляется, а передача напряжения постоянного тока приближается к значению, близкому к единице. В этом случае на выходе имеем напряжение порядка E_0 . Таким образом, на выходе схемы не появится сигнал меньший, чем напряжение E_0 .

Появление множества гармоник в спектре выходного сигнала, связанных с нелинейной работой диодной цепи в режиме «большого» сигнала, может быть использовано для получения с помощью избирательного усилителя гармонических сигналов на частотах, отсутствующих в спектре входного сигнала. В ходе лабораторной работы можно в этом

убедиться, если Вы освоите анализатор спектра (Dynamic Signal Analyzer – DSA).

Наоборот, режим «малого» сигнала (рис. 3.16) имеет место тогда, когда, например, с помощью источника напряжения постоянного тока рабочая точка выведена на линейный участок диода, а источник напряжения переменного тока изменяет токи и напряжения в окрестностях рабочей точки (рис. 3.17).

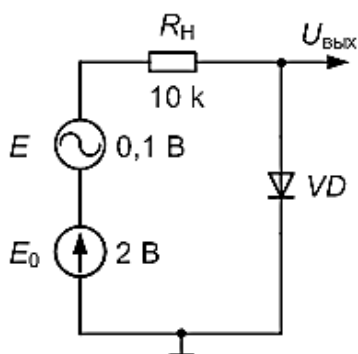


Рис. 3.16. Схема, обеспечивающая режим «малого» сигнала выпрямительного диода

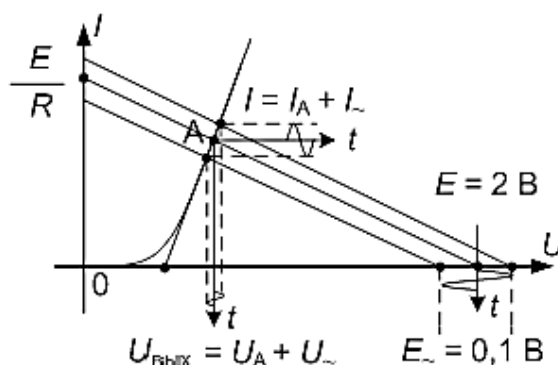


Рис. 3.17. Построения на ВАХ диода, иллюстрирующие режим «малого» сигнала выпрямительного диода

При известной вольт-амперной характеристике диода проведите ее кусочно-линейную аппроксимацию и определите параметры его эквивалентной схемы E_0 и R_d (рис. 3.18).

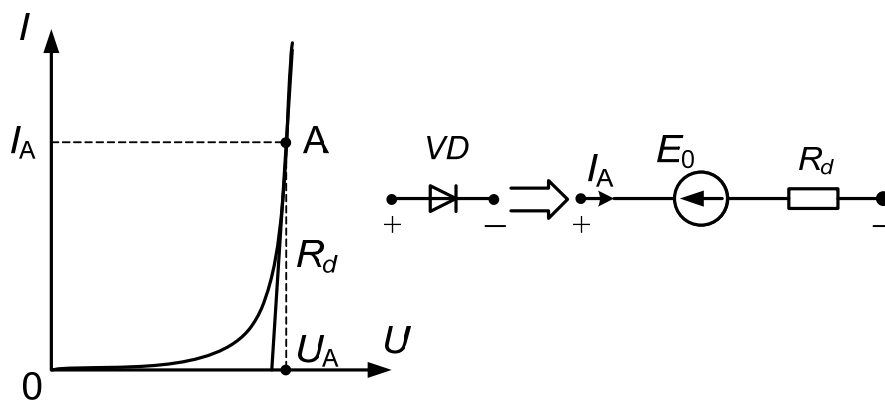


Рис. 3.18. Пример кусочно-линейной аппроксимации диода

Если мгновенное значение напряжения переменного тока равно нулю, то определите значение постоянной составляющей тока диода и напряжения на диоде, используя схему замещения диода (рис. 3.19).

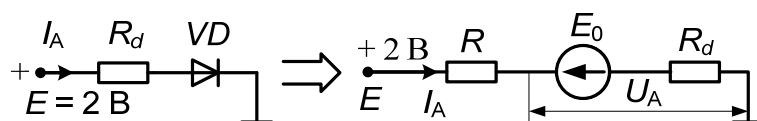


Рис. 3.19. Схема для расчета тока диода I_A и напряжения U_A

В практике аналоговой электроники широкое распространение также получили кремниевые стабилитроны, разработанные для стабилизации напряжения постоянного тока.

Чтобы осуществить такую стабилизацию, на ВАХ элемента должен находиться участок, на котором при значительных переменах тока изменения напряжения были бы незначительными. Такими свойствами (малого дифференциального сопротивления) обладают участки ВАХ кремниевых диодов, где при обратном включении развивается тот или иной вид пробоя p - n -перехода с током, ограниченным внешним резистором.

Простейший аналоговый стабилизатор напряжения постоянного тока – параметрический стабилизатор – изображен на рис. 3.20.

Суть процесса стабилизации заключается в том, что любое изменение входного напряжения E и/или сопротивления нагрузки R_H приводят к изменениям общего тока и перераспределению токов между диодом и нагрузкой. При этом $U_H = U_{СТ}$ практически не изменяется, благодаря работе стабилитрона на участке ВАХ с малым дифференциальным сопротивлением и изменением падения напряжения на балластном резисторе R .

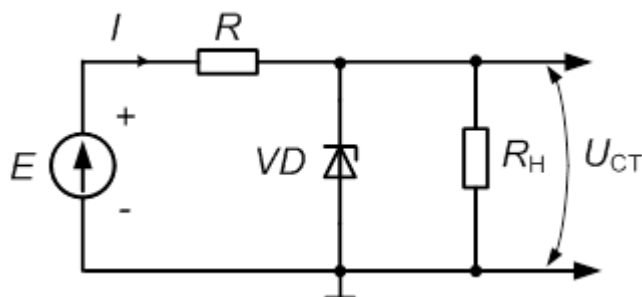


Рис. 3.20. Схема параметрического стабилизатора положительного напряжения

Среди параметров, характерных для стабилизаторов напряжения, наиболее распространенными являются:

- нестабильность выходного напряжения по сети (Line regulation) – процентное изменение выходного напряжения в ответ на изменение входного напряжения

$$K_L = \text{Line Reg.} = \frac{U_{O(hi-in)} - U_{O(lo-in)}}{U_{O(nom-in)}} \cdot 100 \%,$$

где использованы сокращения: O – *out*, hi – *high*, lo – *low*, in – *input*, т. е. речь идет об изменении выходного напряжения при высоком и низком уровнях входного, отнесенного к выходному напряжению, при номинальном входном – *nom-in*;

- нестабильность выходного напряжения по нагрузке (Load regulation) – процентное изменение выходного напряжения в ответ на изменение тока в нагрузке от половины до полного номинального значения

$$K_L = \text{Load Reg.} = \frac{U_{O(full\ load)} - U_{O(half\ load)}}{U_{O(rated\ load)}} \cdot 100 \%,$$

где $U_{O(rated\ load)}$ – номинальное выходное напряжение на холостом ходу при номинальном $U_{in(nom)}$;

- общий КПД (Overall efficiency), показывающий разработчику, сколько тепла будет выделяться внутри изделия и потребуется ли в физической конструкции какой-либо теплоотвод

$$\text{КПД} = \frac{P_{out}}{P_{in}}.$$

При определении указанных параметров стабилизатора на макете находим соответствие: входные напряжения $U_{in}(E)$ изменяются с помощью перестраиваемого источника VPS, выходное напряжение $U_{CT} = U_{out}$.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Исследование схем однополупериодного выпрямителя

- Осуществите запуск программного обеспечения NI ELVIS и его инициализацию.
- Соберите схему (рис. 3.3) для снятия ВАХ диодов с помощью анализатора вольт-амперных характеристик двухполюсников (Two-Wire Current Voltage Analyzer): $VD2$ – кремниевого точечного диода, $VD3$ – диода Шоттки и $VD4$ – кремниевого стабилитрона. Обратите особое внимание на правильную установку границ и инкремента изменений напряжений (Start, Stop, Increment) при снятии характеристик, которые не приводят к превышению токовых пределов (Current Limits, mA). Сохраните данные по ВАХ в виде файлов с целью дальнейшего использования и распечатки для отчета. Пункт выполняется, если утеряны данные, полученные в лабораторной работе № 1.

- Используя табличные данные (Log) вольт-амперной характеристики $VD2$, произведите расчет и постройте зависимости статического и дифференциального сопротивлений диода от тока.
- Соберите схему однополупериодного выпрямителя, работающего на активную нагрузку (рис. 3.21). В качестве источника переменного напряжения используйте генератор FGEN (выводы Fgen и GND). Установите на генераторе амплитуду гармонического сигнала $E = U_{B\sim} = 2,5$ В и частоту $f = 1$ кГц.

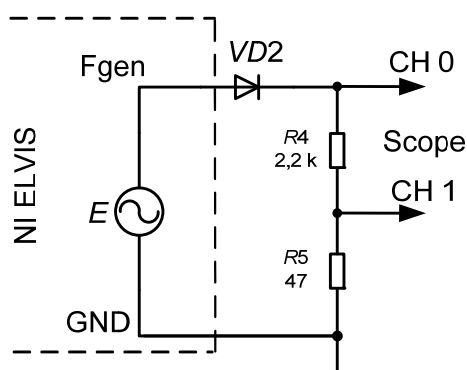


Рис. 3.21. Схема для исследования выпрямителя с активной нагрузкой

- Иницируйте генератор и осциллограф и наблюдайте временные диаграммы выходного напряжения (CH 0) и тока диода (CH 1) выпрямителя. Измерьте осциллографом амплитуды выходного напряжения и тока. Определите период входного напряжения и временной интервал ненулевого тока диода. Через полученные данные найдите значение угла отсечки тока Θ . Данные зафиксируйте для их дальнейшей обработки. Временные диаграммы входного напряжения и полученных сигналов синхронизируйте.
- Последовательно устанавливая амплитуду гармонического сигнала ($E = 2; 1,5; 1$ В), определяйте амплитуды выходного напряжения и тока и значения углов отсечки тока Θ . На основе произведенных измерений рассчитайте постоянные составляющие выходного напряжения, используя выражения для определения средней составляющей периодического несинусоидального сигнала при разложении его в ряд Фурье. Полученные значения представьте в виде функции от действующего значения входных гармонических напряжений, т. е. получите преобразовательную характеристику выпрямителя.
- Соберите схему выпрямителя (рис. 3.21), заменив кремниевый диод $VD2$ на диод Шоттки $VD3$. Снова проделайте предыдущих два пункта. Объясните причину изменения угла отсечки диодного тока. Почему зафиксирована вариация наклона преобразовательной характеристики выпрямителя на разных диодах? Сделайте выводы в отчете.

- Изменяйте частоту гармонического напряжения с генератора и наблюдайте на повышенных частотах (десятки и сотни килогерц), проявляются ли инерционные свойства диода $VD2$. Зафиксируйте временные диаграммы выходного напряжений и тока диода и синхронизируйте их с входным гармоническим сигналом. Поясните в отчете, какие изменения наблюдаются в форме выходного напряжения и в чем проявляются инерционные свойства диода.

- Соберите схему однополупериодного выпрямителя (рис. 3.22), работающего на активно-емкостную нагрузку. Установите на генераторе амплитуду гармонического сигнала $E_{\sim} = U_{B\sim} = 2,5 \text{ В}$ и частоту $f = 1 \text{ кГц}$. При сборке схемы можете использовать четыре соединенные друг с другом гнезда для увеличения количества подключаемых приборов/элементов к одной точке макета.

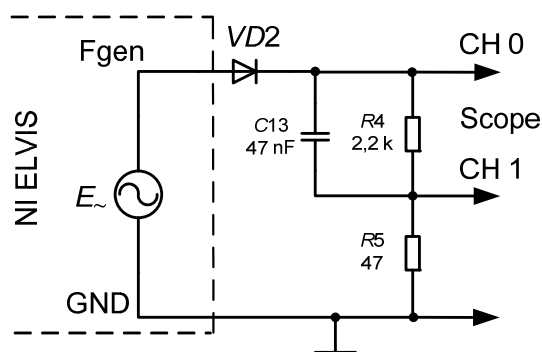


Рис. 3.22. Схема для исследования выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой

- Пронаблюдайте временные диаграммы выходного напряжения (CH 0) и тока диода (CH 1) выпрямителя. Зафиксируйте и синхронизируйте их с входным гармоническим сигналом. Определите значение напряжения пульсаций $U_{\text{п}}$. Как, по-вашему, Вы исследуете хороший выпрямитель или нет? Приведите объяснения в отчете.

- Изменяйте частоту гармонического напряжения с генератора и наблюдайте, как с увеличением частоты изменяется амплитуда пульсаций. Полученные данные об амплитудах пульсаций $U_{\text{п}}$, как минимум на трех частотах, зафиксируйте. Если на выходном напряжении пульсации плохо наблюдаются, то закройте вход канала (CH 0) осциллографа (переведите его из режима DC в режим AC) и увеличьте чувствительность по этому каналу.

- Установите частоту генератора $f = 1 \text{ кГц}$, а вместо емкости $C13$ установите емкость $C3 = 10 \text{ мкФ}$. Почему резко снизились пульсации выходного напряжения (объяснения приведите в отчете)? Полученные данные для двух значений емкостей зафиксируйте.

- Установите $f = 10$ кГц и снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, изменяя амплитуду входного напряжения генератора $U_{\text{ВХ}} \sim$ от 2,5 до 1,1 В через 0,2 В. Значения $U_{\text{ВЫХ}}$ получайте или в виде данных с канала CH 1 осциллографа, или иницируя вместо осциллографа цифровой вольтметр DMM. Сформируйте массив данных и сохраните их для построения в отчете преобразовательной характеристики выпрямителя. Укажите в отчете, недостатки полученной характеристики исследуемого выпрямителя по сравнению с идеальной.

4.2. Исследование диодной цепи, работающей в режиме «малого» сигнала

- Соберите схему для исследования режима «малого» сигнала работы диодной цепи (рис. 3.23). Напряжение источника VPS устанавливает координату рабочей точки на ВАХ диода, а относительно малое переменное напряжение обусловит вариацию токов и напряжений в окрестностях рабочей точки.

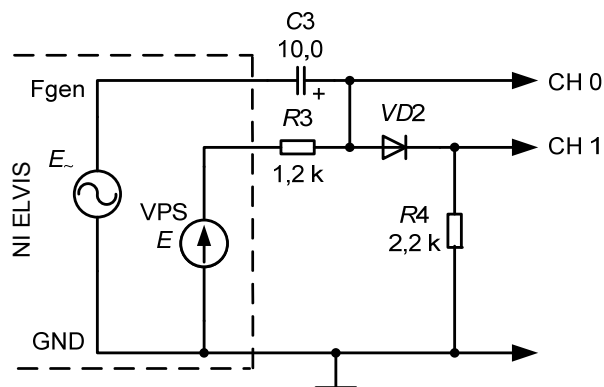


Рис. 3.23. Схема для исследования для режима «малого» сигнала

- Иницируйте источник напряжения постоянного тока VPS, генератор FGEN и осциллограф Scope.
- Рассчитайте значение E источника VPS при условии, что необходимо обеспечить координаты рабочей точки на ВАХ диода ($I = 2,5$ мА, $U = 0,6$ В). Установите рассчитанное значение VPS.
- Обеспечьте выдачу гармонического напряжения с амплитудой в пределах от 20 до 50 мВ на частоте 1 кГц.
- Определите по заданным координатам рабочей точки дифференциальное сопротивление диода, используя массив данных вольт-амперной характеристики или ранее полученную зависимость дифференциального сопротивления диода от его тока.
- Получите из принципиальной схемы эксперимента (рис. 3.22) схему для расчета амплитуды переменного напряжения на сопротивлении $R4$ и найдите ожидаемое значение этой амплитуды.

- Получите на экране двухканального осциллографа осциллограммы входного и выходного напряжений, синхронизируйте их и определите их амплитуды. Обратите внимание и объясните необходимость использования закрытого входа каналов осциллографа (режим – AC). Сравните полученное значение с ожидаемым результатом. В отчете сделайте мотивированные выводы относительно линейаризованного режима работы нелинейной цепи.

4.3. Исследование работы схемы последовательного ограничителя

- Соберите схему последовательного ограничителя, изображенную на рис. 3.24.

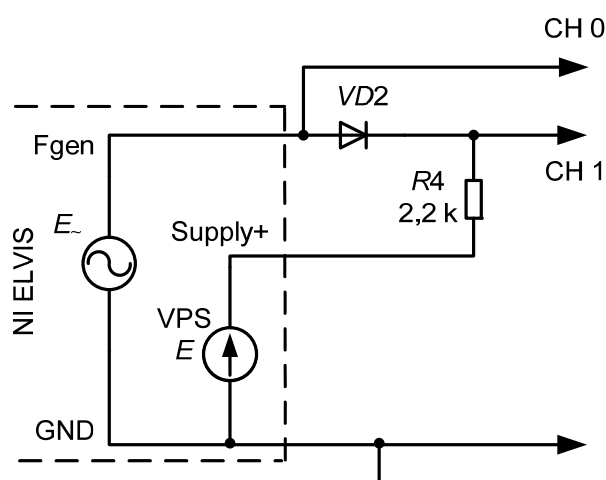


Рис. 3.24. Схема последовательного диодного ограничителя

- Иницируйте генератор, регулируемый источник питания VPS и осциллограф. Установите амплитуду гармонического сигнала $E_{\sim} = 2,5$ В на частоте $f = 1$ кГц и значение напряжения источника VPS $E = \text{Supply+} = 1$ В.

- Исследуйте работу схемы последовательного ограничителя, изучив временные диаграммы сигналов на входе и выходе при различных значениях и полярности подпирающего напряжения E (от двух до четырех значений по выбору; для смены полярности используйте источник SUPPLY-). В отчете дайте объяснения причин различия выходных сигналов (CH 1) по форме и по значению.

- Установите значение напряжения E источника SUPPLY+, равное 1 В, и восстановите значение амплитуды ($E_{\sim} = 2,5$ В) гармонического сигнала с генератора.

- Получите аналитические выражения для расчета коэффициентов передачи по напряжению сигналов с выхода генератора и с выхода источника VPS после открывания и закрывания полупроводникового диода VD2.

- Используя осциллограф, определите значение напряжения E_0 , а также приращения амплитуд входного и выходного напряжений относительно уровня E_0 (рис. 3.24). Сохраните для отчета полученные в ходе экспериментов данные и сравните результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

4.4. Исследование работы схемы параметрического стабилизатора

- Соберите схему параметрического стабилизатора в режиме холостого хода, изображенную на рис. 3.25.

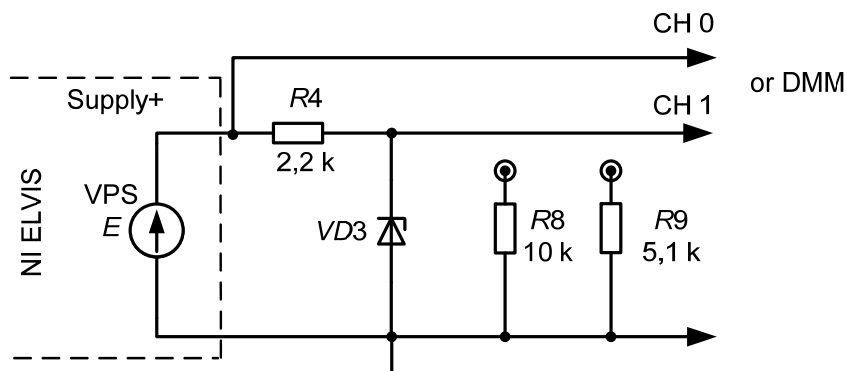


Рис. 3.25. Схема параметрического стабилизатора напряжения

- Иницируйте для питания схемы параметрического стабилизатора источник VPS положительной полярности и цифровой вольтметр DMM или осциллограф Score для измерения выходного напряжения.

- Измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения K_L , считая что номинальное выходное напряжение имеет место при $E = 10$ В, а максимальное и минимальное значения фиксируются при $E = 12$ В и $E = 8$ В соответственно.

- Подключите к выходу стабилизатора нагрузку $R8$ и измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения K_L , повторив предыдущий пункт.

- Изменяйте схему стабилизатора (рис. 3.40). Полную нагрузку реализуйте подключением резистора $R9 = 5,1$ кОм, а при половинной нагрузке используйте сопротивление $R8 = 10$ кОм. Измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения по нагрузке (Load regulation). Значение $U_{O(rated\ load)}$ получите как номинальное выходное напряжение на холостом ходу при номинальном $U_{in(nom)} = 10$ В.

- Сравните нестабильности выходных напряжений от вариаций E в режимах холостого хода и под половинной нагрузкой. Сделайте заключение.

- Установите номинальное входное напряжение $E = 10$ В и измерьте выходное напряжение параметрического стабилизатора на холо-

стом ходу (U_1) и под нагрузкой R_8 (U_2). На основе проведенного эксперимента рассчитайте $R_{\text{вых}}$ стабилизатора. Используя ВАХ стабилитрона, определите его дифференциальное сопротивление в рабочей точке при номинальном входном напряжении. Сравните полученные теоретическое и экспериментальное значения $R_{\text{вых}}$ и сделайте выводы.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Как по ВАХ диода определить значения E_0 и R_d схемы замещения диода при кусочно-линейной аппроксимации (рис. 5.9)?
- 5.2. Определите статическое и дифференциальное сопротивления в выбранной Вами рабочей точке на ВАХ диода.
- 5.3. Изобразите ожидаемую зависимость $R_{\text{ст}} = f(I)$.
- 5.4. Изобразите ожидаемую зависимость $R_d = f(I)$.
- 5.5. Что такое режим малого сигнала?
- 5.6. Покажите, почему в режиме малого сигнала формы входного и выходного сигналов практически совпадают.
- 5.7. Поясните работу схемы выпрямителя, работающего на активную нагрузку, используя временные диаграммы сигналов.
- 5.8. Почему в схеме выпрямителя с активной нагрузкой угол отсечки тока диода меньше 90° ?
- 5.9. Приведите формулы для расчета среднего за период периодического несинусоидального напряжения на активной нагрузке выпрямителя.
- 5.10. При работе выпрямителя с активной нагрузкой угол отсечки тока практически равен 90° . Амплитуда напряжения на нагрузке равна 3,14 В. Рассчитайте среднее за период напряжение на нагрузке.
- 5.11. Поясните работу схемы выпрямителя, работающего на активную емкостную нагрузку, используя временные диаграммы сигналов.
- 5.12. Что можно сделать, чтобы уменьшить амплитуду пульсаций выходного напряжения?
- 5.13. Что означает работа полупроводникового диода в режиме «малого» сигнала?
- 5.14. Приведите и объясните графические построения на вольт-амперной характеристике стабилитрона, приводящие к линеаризованному режиму работы диода.
- 5.15. Приведите и поясните расчет координат рабочей точки на ВАХ диода.
- 5.16. Выведите аналитическое выражение, позволяющее рассчитать значение выходного переменного напряжения.
- 5.17. С какой целью используются ограничители напряжения?

- 5.18. Как работает схема последовательного ограничителя напряжения (использовать временные диаграммы сигналов)?
- 5.19. Как изменится диаграмма выходного сигнала, если в схеме последовательного ограничителя поменять полярность источника E ?
- 5.20. С какой целью предлагается использовать спектральный анализатор при экспериментальных исследованиях работы схемы ограничителя?
- 5.21. Что можно было бы наблюдать на экране спектрального анализатора при исследовании входного и выходного напряжений ограничителя?
- 5.22. Какая ветвь ВАХ стабилизатора обычно используется с целью стабилизации напряжения?
- 5.23. Почему для стабилизации напряжения используется область пробоя p - n -перехода стабилитрона?
- 5.24. Как в заявленной рабочей точке определить статическое и дифференциальное сопротивления стабилитрона?
- 5.25. Приведите графические построения на ВАХ стабилитрона, поясняющие работу стабилизатора при изменениях E_1 (VPS), когда $R_H = \text{const}$.
- 5.26. Приведите графические построения на ВАХ стабилитрона, поясняющие работу стабилизатора при изменениях R_H , когда $E_1 = \text{const}$.
- 5.27. Что необходимо предпринять в схеме параметрического стабилизатора напряжения, чтобы уменьшить коэффициент неустойчивости выходного напряжения K_L ?
- 5.28. Выведите формулу для расчета выходного сопротивления $R_{\text{вых}}$ параметрического стабилизатора.
- 5.29. Каким образом экспериментально определяется выходное сопротивление стабилизатора напряжения постоянного тока?

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать схемы и результаты эксперимента, обработанные в соответствии с целями работы.

При оформлении отчета необходимо использовать рекомендации, изложенные в разделе 1.3 учебного пособия.

Модуль 2. Исследование активных элементов и простых схем по их применению

Лабораторная работа № 2.2

Исследование режимов работы биполярного транзистора

1. Цель работы

- получение практических навыков схемного введения биполярного транзистора в заданный режим покоя;
- определение основных свойств транзистора в усилительном и ключевых режимах работы;
- овладение методикой работы в учебной лаборатории в программно-аппаратной среде NI ELVIS.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемых схемах;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- освоение методики снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) биполярного транзистора $VT1$, используя анализатор вольт-амперных характеристик четырехполюсников (Three-Wire Current Voltage Analyzer), и сохранение данных для отчета;
- приобретение навыков исследования режимов работы транзистора с привлечением регулируемого источника питания (VPS), цифрового мультиметра (DMM), функционального генератора (FGEN) и осциллографа (Scope);
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

3.1. Усилительный режим биполярного транзистора

Усилительный режим реализуется тогда, когда эмиттерный переход транзистора открыт, а коллекторный переход закрыт. Такой режим транзистора обычно устанавливается в усилительных каскадах усилителя.

Режимом покоя усилителя назовем состояние, которое имеет место после переходного процесса при включении источника питания, когда сигнал от источника сигнала в схему не поступает.

По завершении переходного процесса на всех элементах схемы (и через все элементы) образуются установившиеся значения постоянных напряжений (и протекают установившиеся значения постоянных токов).

Для усилительного элемента – биполярного транзистора – значения токов и напряжений характеризуют положение рабочей точки на семействах вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора – входных и выходных.

Выбор рабочей точки как исходного режима работы усилительного каскада важен по многим причинам:

- Безопасности работы транзистора – рабочая точка выбирается так, чтобы ток и напряжение коллектора и базы не выходили за пределы максимально допустимых значений. Область безопасной работы транзистора (ОБР, SOA) на выходных ВАХ определяет границы его надежной работы без захода в область одного из видов пробоя.
- Необходимости обеспечения линейного режима работы транзистора для требуемых максимальных значений переменных напряжений и токов на нагрузке.
- Требования к получению желаемых энергетических соотношений – коэффициентов использования токов, напряжений, КПД.
- Необходимости обеспечения желаемого класса работы транзистора (A , AB , B , C) – в данной работе класса A , когда отсутствует отсечка коллекторного тока.

Анализ каскада по постоянному току проводят графоаналитическим методом, основанным на использовании соответствующих построений и расчетных соотношений, выполняемых на выходных (коллекторных) характеристиках транзистора.

Входные и выходные характеристики транзистора, размещенного в схеме на Вашем лабораторном макете, должны быть получены Вами в ходе первой лабораторной работы с использованием анализатора ВАХ двухполюсников «2-Wire» и анализатора вольт-амперных характеристик четырехполюсников «3-Wire».

Проверьте, что входные характеристики транзистора по схеме «общий эмиттер» (ОЭ) получены при значении выходного напряжения $U_{кэ} = +5$ В с максимальными значениями тока базы до (200–400) мкА. Обратите также внимание на правильный ход полученных характеристик.

В выходных ВАХ транзистора желательно иметь количество кривых порядка 6–7 при шаге базового тока 15 мкА (или 10 при шаге базового тока 10 мкА). Максимальное значение выходного напряжения должно достигать 9 В при условии, что не вызвано превышение тока коллектора по сравнению со значением, равным 10 мА, обозначенным на виртуальной панели анализатора.

ВАХ транзистора в виде массива данных и графиков будут использованы по ходу данной лабораторной работы и при составлении отчета.

3.2. Получение требуемых значений координат рабочей точки биполярного транзистора в режиме покоя

В качестве исходной информации используйте полученные ранее данные о выходной характеристике транзистора (рис. 3.26).

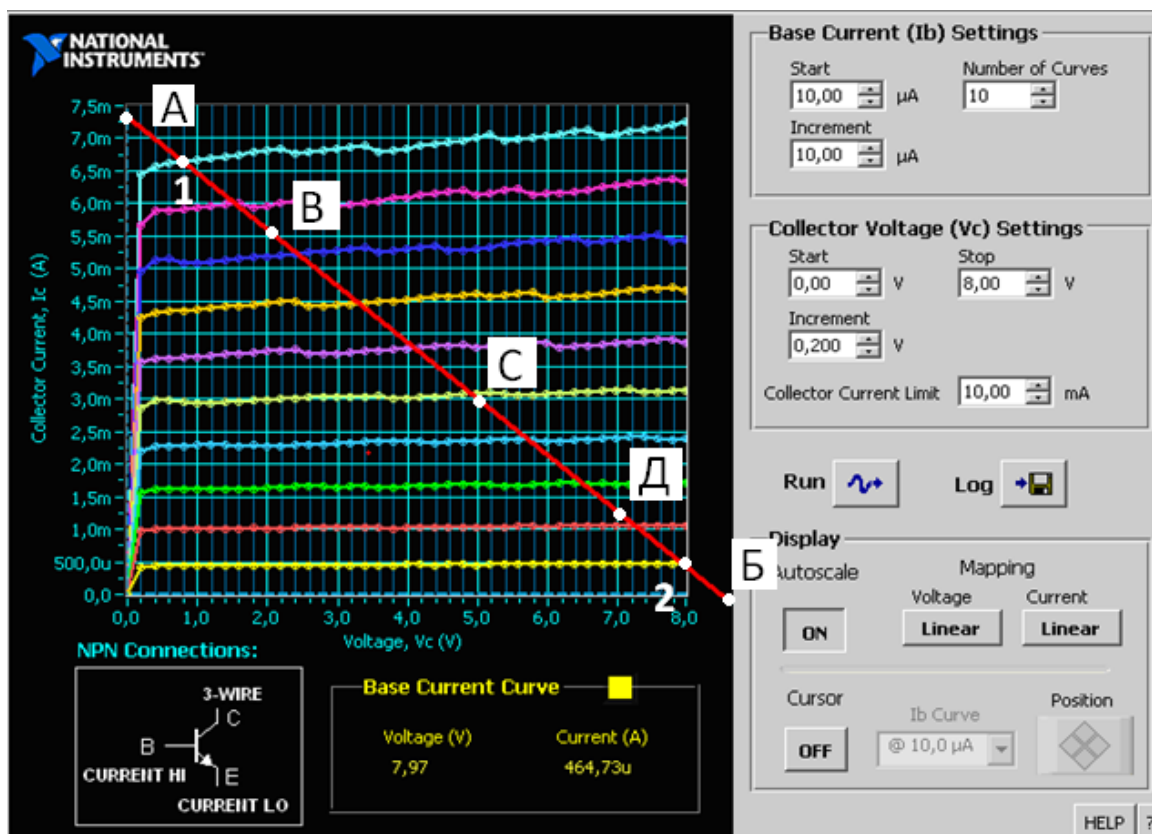


Рис. 3.26. Выходная вольт-амперная характеристика транзистора

Перенесите ВАХ в графический редактор (например, Paint), чтобы изобразить на ней нагрузочную прямую по постоянному току для схемы, предназначенной для исследования режимов работы транзистора (рис. 3.27).

Ввиду того, что выходная характеристика показывает зависимости коллекторного тока от напряжения между коллектором и эмиттером, для нахождения уравнения нагрузочной прямой необходимо обойти по второму закону Кирхгофа контур протекания коллекторного тока.

В результате обхода контура получим равенство:

$$I_K \cdot R_3 + U_{KЭ} = E_K.$$

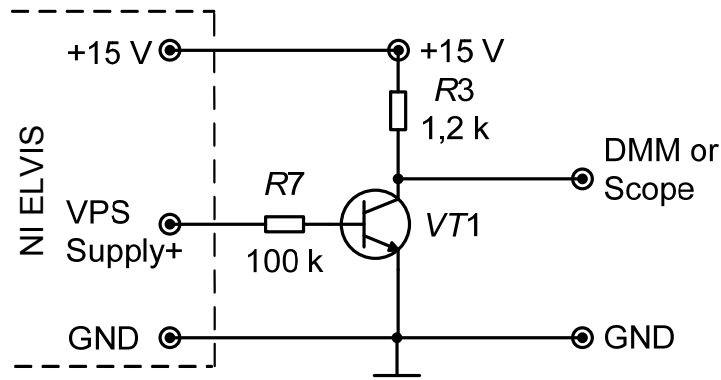


Рис. 3.27. Схема для исследования режимов работы биполярного транзистора

Преобразуем полученное выражение в уравнение прямой линии:

$$I_K = -\frac{1}{R_3} \cdot U_{KЭ} + \frac{E_K}{R_3}.$$

Эту линию проще всего построить по двум точкам на осях ВАХ с координатами $(0; E_K/R_3; E_K; 0)$ на оси токов и оси напряжений соответственно (рис. 3.26, точки А и Б).

Заказанные в работе рабочие точки усилительного режима транзистора ($U_{KЭ} = 2$ В, $U_{KЭ} = 5$ В, $U_{KЭ} = 7$ В) будут располагаться на соответствующих перпендикулярах ($U_{KЭ} = \text{const}$) к оси напряжений выходной ВАХ транзистора (точки В, С, Д). По расположению этих точек определите ориентировочные значения токов базы и коллектора транзистора, а также напряжение источника VPS – Supply+.

Все полученные значения напряжений и токов занесите в таблицу 3.1

Таблица 3.1

Параметры координат рабочих точек

$U_{KЭ}, \text{В}$	$I_{KЭ}, \text{мкА}$	$I_K, \text{мА}$	Supply+, В
2	85	5,5	9,05
5	50	3,0	5,53
7	23	1,2	2,81

Значения базового тока транзистора задает источник VPS, а обойдя по второму закону Кирхгофа контур протекания базового тока, получим:

$$\text{Supply+} = I_B \cdot R_7 + U_{БЭ}.$$

Для нахождения напряжения $U_{БЭ}$ воспользуемся входной характеристикой транзистора, снятой при $U_{KЭ} = +5$ В (рис. 3.28).

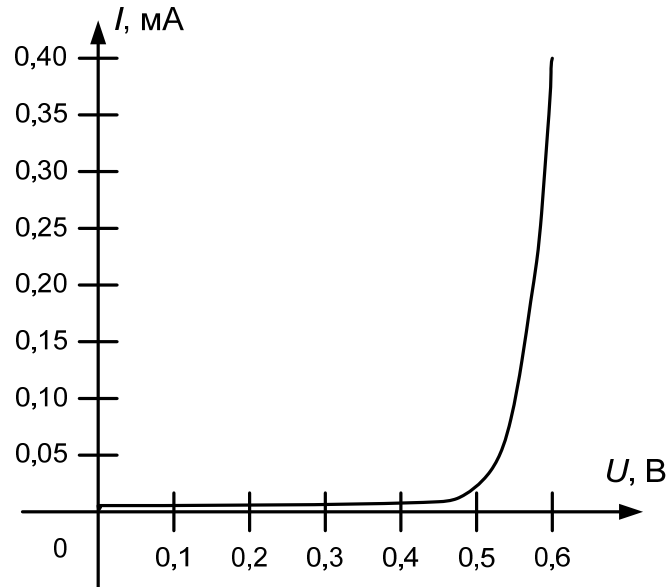


Рис. 3.28. Входная вольт-амперная характеристика транзистора при $U_{КЭ} = +5 \text{ В}$

Вас не должен смущать тот факт, что характеристика снята при одном значении напряжения $U_{КЭ}$, а будет использоваться при других значениях этого напряжения. Из теории работы транзисторов известно, что если напряжение на коллекторном переходе много больше, чем температурный потенциал ϕ_T , то кривые ВАХ при разных значениях $U_{КЭ}$ практически совпадают.

Так, для рабочей точки С (рис. 3.26) имеем ток базы 50 мкА, которому соответствует напряжение $U_{БЭ} = 0,52 \text{ В}$. Тогда напряжение источника $\text{Supply} = I_B \cdot R_7 + U_{БЭ} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 + 0,53 = 5,52 \text{ В}$.

Для указанной рабочей точки на основе массива данных (Log), полученных при получении ВАХ транзистора, рассчитайте его h -параметры, которые будут востребованы при анализе каскада на переменном токе.

Расчет этих параметров по конечным приращениям токов и напряжений вблизи рабочей точки транзистора для схемы ОЭ проводится следующим образом:

$$h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} ; \quad h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} .$$

$$h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = \text{const}} ; \quad h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = \text{const}} .$$

Параметр $h_{11Э}$ схемы с ОЭ на входной характеристике транзистора в рабочей точке А (обязательно указывайте координату рабочей точки) находят по формулам в соответствии со следующими графическими построениями (рис. 3.29):

$$h_{11Э} = \left| \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} = \frac{U_{БЭК} - U_{БЭФ}}{I_{БК} - I_{БФ}}.$$

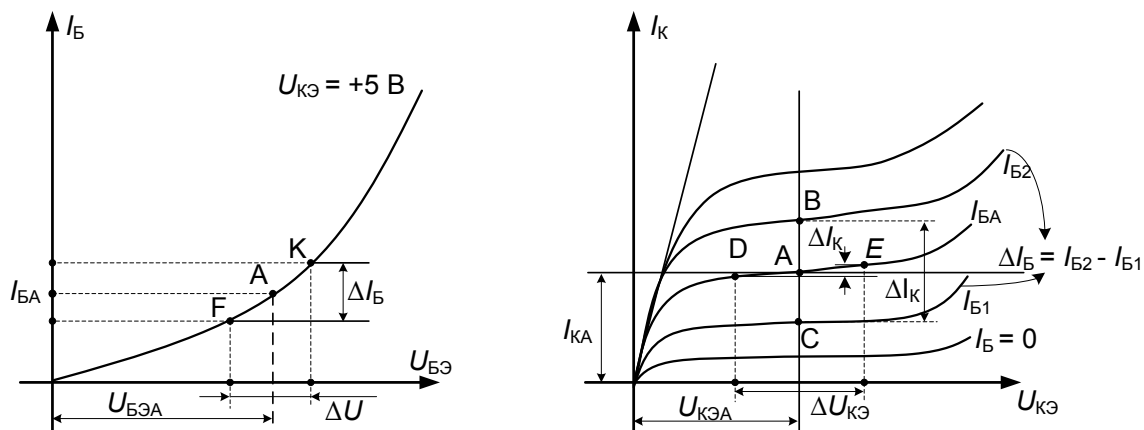


Рис. 3.29. Графические построения для определения h -параметров

В рабочей точке А на выходных характеристиках транзистора параметры $h_{21Э}$ и $h_{22Э}$ определяют следующим образом:

$$h_{21Э} = \left| \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭА}} = \frac{I_{В} - I_{С}}{I_{Б2} - I_{Б1}};$$

$$h_{22Э} = \left| \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{БА}} = \frac{I_{Е} - I_{Д}}{U_{Е} - U_{Д}}.$$

В заключение отметим, что конкретные значения координат рабочей точки определяются требованиями, предъявляемыми к усилительному каскаду на переменном токе. В частности, такими требованиями является достижение заданных максимальных значений переменных напряжений и токов на нагрузке при реализации режима работы транзистора без отсечки коллекторного тока, т. е. в режиме класса А.

3.3. Работа транзистора на переменном токе

При определении координаты рабочей точки на ВАХ транзистора будем предполагать сохранность формы выходного сигнала по сравнению с входным, т. е. малые нелинейные искажения, вносимые каскадом. В одноконтурных схемах это означает работу транзистора в режиме

класса А, когда угол отсечки коллекторного тока будет составлять 180° , т. е. отсечка выходного тока отсутствует. На рис. 3.30 в качестве иллюстрации режима показаны коллекторный ток и напряжение на транзисторе.

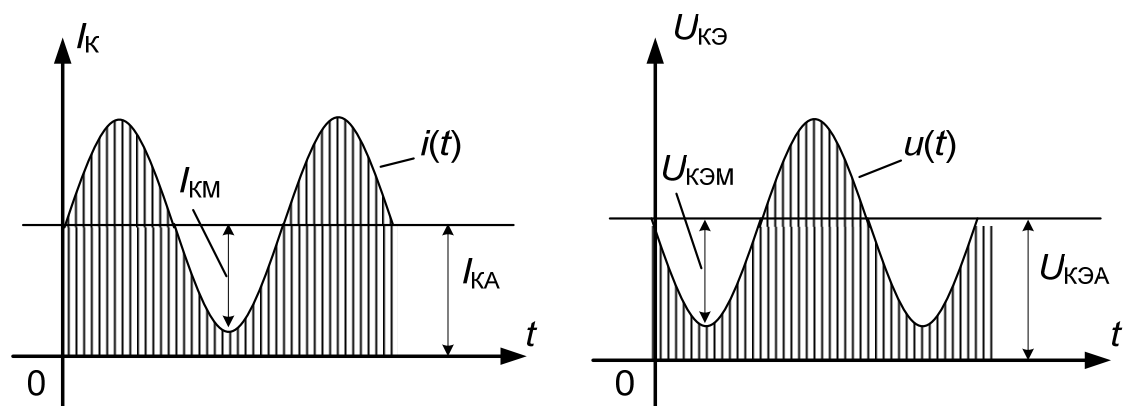


Рис. 3.30. Временные диаграммы тока и напряжения при работе транзистора в усилительном режиме класса А

При этом переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как переменные составляющие суммарных тока и напряжения, накладывающиеся на их постоянные составляющие I_{KA} и $U_{KЭA}$.

Связь между переменными и постоянными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, полученных в рабочей точке режима покоя, т. е. $I_{KA} \geq I_{KM}$ и $U_{KЭA} \geq U_{KЭМ}$.

Если эти условия не будут выполняться, ток I_K в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведет к искажению формы выходного сигнала.

Усиительные свойства транзистора в рассматриваемой схеме (рис. 3.31) основываются на следующем. При подаче входного напряжения от источника сигнала FGEN в коллекторном токе создается переменная составляющая, вследствие чего между коллектором и эмиттером транзистора также образуется переменная составляющая напряжения. Усиительные свойства проявляются тем сильнее, чем больше сказывается влияние входного сигнала на выходной ток и чем сильнее проявляется воздействие изменения тока в выходной цепи на изменение напряжения на управляемом элементе (т. е. чем выше сопротивление R_3).

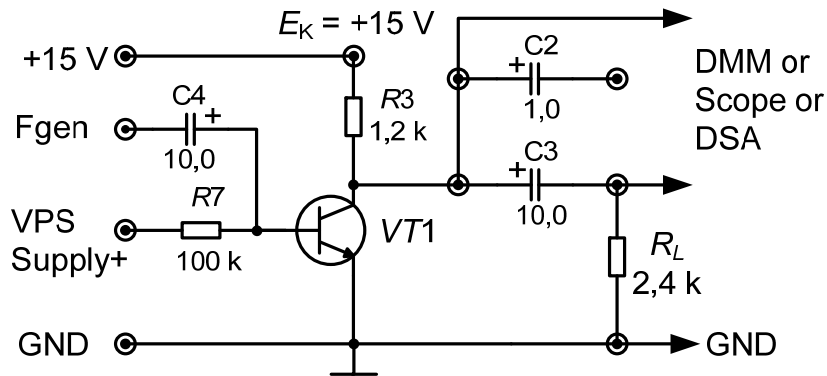


Рис. 3.31. Схема для исследования усилительного режима транзистора

Наглядность связи параметров режима покоя каскада с амплитудными значениями его переменных составляющих (выходного напряжения $U_{\text{выхн}}$ и тока $I_{\text{км}}$) можно увидеть при использовании следующих графических построений (рис. 3.32).

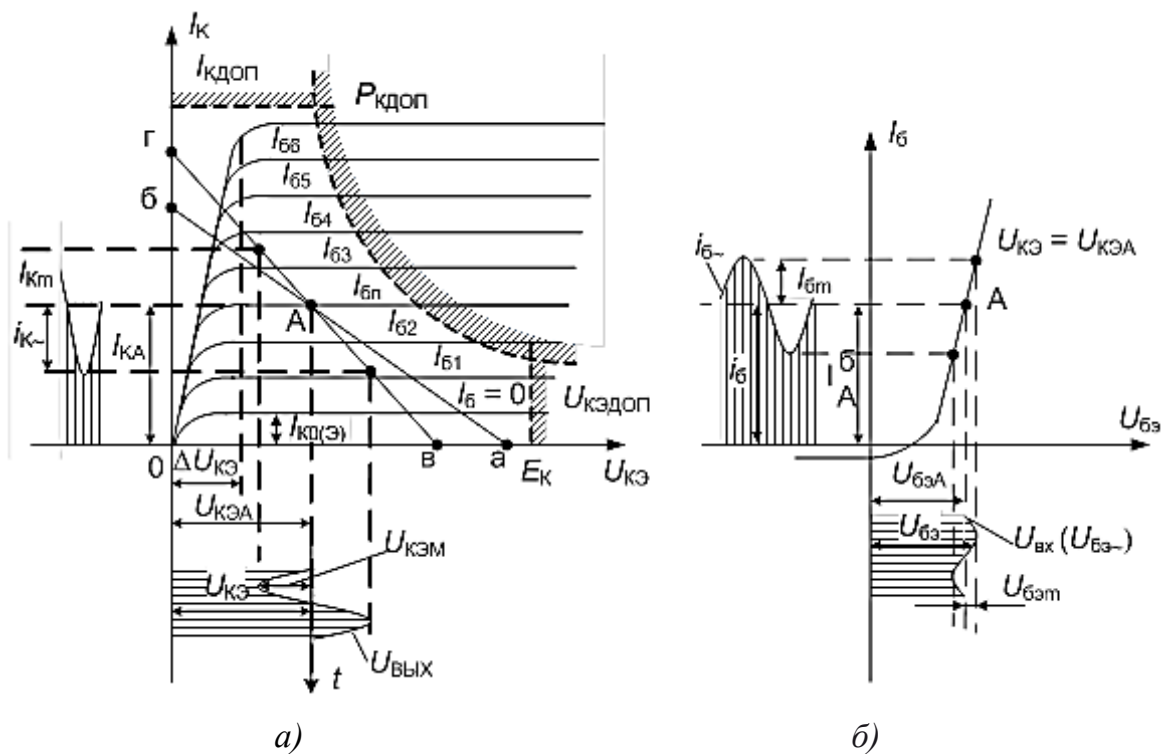


Рис. 3.32. Графическое определение режима покоя каскада ОЭ на коллекторной (а) и базовой (б) характеристиках транзистора

В реальных усилительных каскадах на их выходах может подключаться нагрузка R_L (рис. 3.31). Если учесть, что сопротивление источника питания E_K по переменному току близко к нулю, то окажется, что сопротивление каскада по переменному току определяется сопротивлени-

ями или резистора R_3 , или резисторов R_3 и R_L , включенных параллельно, т. е. $R_{H\sim} = R_3 \parallel R_L$. Таким образом, при подключенном R_L сопротивление нагрузки каскада по постоянному току $R_{H-} = R_3$ больше, чем по переменному току. Другими словами, в этом случае нагрузочная прямая по переменному току (прямая б–в) на выходных ВАХ транзистора пойдет круче к оси напряжения, чем по постоянному току (прямая г–а), что и отражено на рис. 3.32.

Если нагрузка R_L не подключается, т. е. реализуется режим холостого хода, то нагрузочные прямые по постоянному и переменному токам для рассматриваемой схемы совпадают.

Как отмечалось выше, при подключении нагрузки R_L необходимо строить нагрузочную прямую переменному току. Эта прямая всегда проходит через рабочую точку А. Вторую точку (в), через которую пройдет прямая, расположим на оси напряжений, т. е. при нулевом токе коллектора ее координаты:

$$U_{KЭА} + I_{КП} \cdot R_{H\sim},$$

где $U_{KЭА}$ и $I_{КП}$ – напряжение и ток рабочей точки режима покоя.

При подаче на вход каскада напряжения $U_{ВХ}$ от генератора FGEN в базовой цепи транзистора создается переменная составляющая тока I_B (рис. 3.32, б). Ввиду того, что ток коллектора через коэффициент β ($h_{21Э}$) пропорционально зависит от тока базы, в коллекторной цепи транзистора создаются переменная составляющая тока $I_{K\sim}$ (рис. 3.32, а) и переменное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$, связанное с током $I_{K\sim}$ линией нагрузки по переменному току. При этом линия нагрузки по переменному току характеризует изменение мгновенных значений тока коллектора I_K и напряжения на транзисторе $U_{KЭ}$ или, как говорят, перемещение рабочей точки.

Рабочая точка перемещается вверх от точки покоя А по нагрузочной прямой переменного тока при положительной полуволне входного напряжения (при увеличении базового тока) и вниз – при отрицательной полуволне (при уменьшении базового тока). При движении рабочей точки вверх происходит увеличение коллекторного тока и уменьшение коллекторного напряжения. При движении вниз – наблюдается обратная картина (уменьшение коллекторного тока и увеличение напряжения на коллекторе).

Обратите внимание, что для рассматриваемого каскада, как простейшего представителя схем с резистивными нагрузками, напряжение на коллекторе транзистора принципиально не может превышать напряжения источника питания E_K .

Построение нагрузочных прямых переменному току производится на частотах, на которых практически не учитываются линейные искажения, вносимые каскадами.

Для усилителей постоянного тока такие построения производятся на частотах, стремящихся к нулю; для усилителей переменного напряжения – в области средних частот; для избирательных – на частотах резонанса или квазирезонанса.

При указанных условиях рассматриваемый каскад «общий эмиттер» производит инверсию фазы выходного напряжения относительно входного, т. е. сдвиг фазы на 180° (рис. 3.30 и 3.32).

Очевидно, для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка при перемещении вверх по линии нагрузки не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз – в область начальных токов коллектора $I_{K0(\text{Э})} = I_{K0}^*$. Работа каскада без искажений выходного сигнала достигается за счет обеспечения соответствующего значения входного сигнала и правильного выбора режима (точки) покоя.

Для исключения возможных искажений усиливаемого сигнала параметры режима покоя должны удовлетворять следующим условиям (рис. 3.32, а):

$$U_{KЭА} > U_{\text{ВЫХ.м}} + \Delta U_{KЭ}, I_{KA} > I_{Km} + I_{K0(\text{Э})\text{max}},$$

где $\Delta U_{KЭ}$ – напряжение на коллекторе, соответствующее области нелинейных начальных участков выходных характеристик транзистора; $I_{K0(\text{Э})\text{max}}$ – тепловой ток коллектора в схеме ОЭ, соответствующий максимальной температуре.

Меняя положение рабочей точки за счет изменения напряжения регулируемого источника питания (VPS) рабочей станции NI ELVIS и изменяя значение входного напряжения с помощью функционального генератора (FGEN), можно с помощью цифрового вольтметра (DMM) или осциллографа (Scope) провести анализ влияния режима покоя на параметры выходного сигнала.

Возможные геометрические построения нагрузочных прямых переменному току для разных рабочих точек в координатных осях выходных ВАХ транзистора иллюстрирует рис. 3.33.

Сопоставляя рис. 3.32 и 3.33, легко понять, что для рабочей точки A_2 при увеличении входного сигнала произойдет сначала ограничение отрицательной полуволны выходного напряжения, а для A_3 – положительной.

Симметричного ограничения полуволн синусоиды, а значит и максимальной амплитуды выходного напряжения, лучше всего достичь, если режим покоя характеризуется рабочей точкой A_1 .

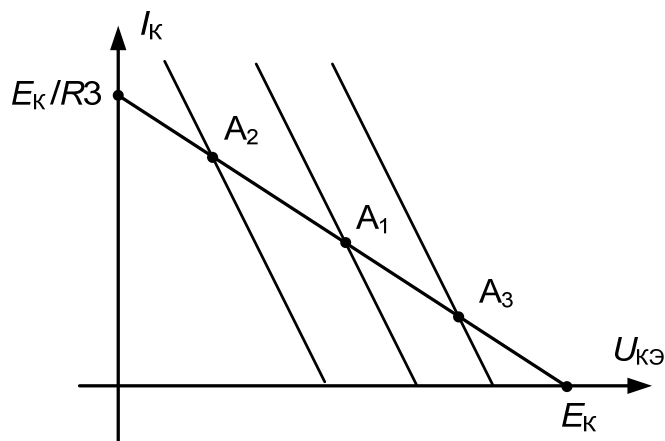


Рис. 3.33. Различные положения рабочих точек на выходных ВАХ транзистора

Следует понять, что максимальная амплитуда отрицательной полуволны определяется максимальной разностью в координатах рабочей точки и остаточным напряжением транзистора $\Delta U_{КЭ}$ (рис. 3.32, а). Максимальная амплитуда положительной полуволны определяется значениями тока покоя в рабочей точке и сопротивлением каскада по переменному току.

Таким образом, выбор расположения рабочей точки на выходных ВАХ транзистора и соответствующий расчет режима покоя на постоянном токе должны быть тесно увязаны с требованиями, предъявляемыми к каскаду по переменному току.

При исследовании биполярного транзистора в усилительном режиме следует уяснить, что это управляемый нелинейный элемент, у которого изменение входного тока (базы) приводит к изменениям выходного тока (коллектора или эмиттера).

Кроме того, транзистор является усилительным элементом, т. е. мощность, выделяемая в выходной цепи, существенно больше мощности во входной цепи. Это происходит за счет энергии источников питания.

Чтобы рассчитать параметры и характеристики усилительного каскада в линейном режиме на переменном токе, необходимо знать параметры транзистора в окрестности рабочей точки режима покоя.

Пусть нам известны значения входного сопротивления транзистора ($h_{11Э}$), коэффициента усиления по току ($h_{21Э}$) и выходной проводимости транзистора ($h_{22Э}$).

Тогда при гармоническом сигнале, учитывая, что $R_7 \ll h_{11Э}$ и $R_3 \ll (1/h_{22Э})$ при отсутствии нагрузки R_L , получим значения входной и выходной мощности и коэффициента усиления по мощности на основе заданной амплитуды входного сигнала и измеренной амплитуды выходного напряжения:

$$P_{\text{вх}} = \frac{1}{2} \cdot U_{\text{вх. М}} \cdot I_{\text{БМ}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{вх. М}}^2}{h_{11Э}}; \quad P_{\text{вых}} = \frac{1}{2} \cdot U_{\text{вых. М}} \cdot I_{\text{КМ}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{вых. М}}^2}{R_3};$$

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых. М}}}{U_{\text{вх. М}}} \cdot \frac{I_{\text{КМ}}}{I_{\text{БМ}}} = |K_U| \cdot K_I,$$

где $K_I = h_{21Э}$; $K_U = -h_{21Э} \cdot R_3 / h_{11Э}$, а $-1 = e^{i(2n-1)\pi}$ (n – целые числа натурального ряда) по формуле Эйлера отражает инверсию выходного сигнала относительно входного.

Легко убедиться, что в рассматриваемой схеме усиление по мощности осуществляется за счет усиления и по току, и по напряжению.

3.4. Ключевые режимы работы

К этим режимам относятся режим отсечки и режим насыщения биполярного транзистора. Первый реализуется, когда оба перехода транзистора закрыты, т. е. находятся в обратном включении, а второй – когда переходы открыты.

Транзисторные ключи (ТК) являются одним из наиболее распространенных элементов импульсных устройств. Главное назначение транзистора, работающего в ключевом режиме, – замыкание и размыкание цепи, его усилительные свойства в этом режиме отсутствуют. Разомкнутому состоянию ключа соответствует режим отсечки транзистора (транзистор заперт), а замкнутому – режим насыщения (транзистор открыт).

Ключевой каскад содержит источник питающего напряжения, нагрузочный (в простейшем случае резистор R) и ключевые элементы. При одном состоянии ключевого элемента ток в цепи нагрузки минимален, при другом принимает максимальное значение.

В первом случае на выходе ключа формируется высокий уровень напряжения, что в положительной логике цифровой электроники будет трактоваться как логическая единица, а во втором случае – низкий уровень, сигнализирующий о наличии на выходе логического нуля.

Электронный ключ можно считать известной аналогией механического ключа, рис. 3.34.

Ключ (К) замыкается и размыкается под действием внешней силы P . Сопротивление идеального ключа в замкнутом состоянии равно нулю, а в разомкнутом – бесконечности. Его ВАХ совпадает с осями координат декартовой плоскости.

В действительности ключи, в том числе электронные, не являются идеальными. Они имеют малое сопротивление r во включенном и большое сопротивление R в выключенном состоянии, а ВАХ ключа не совпадает с осями координат, а имеет углы наклона (рис. 3.35).

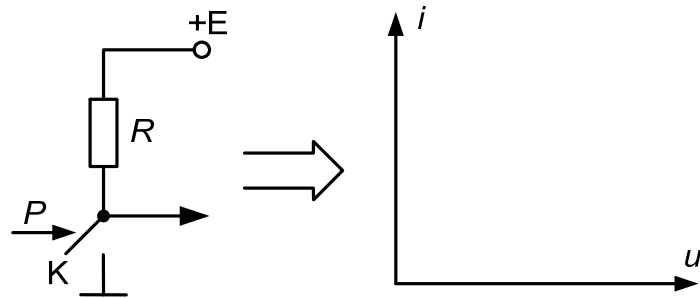


Рис. 3.34. Механический эквивалент ТК и ВАХ идеального ключа

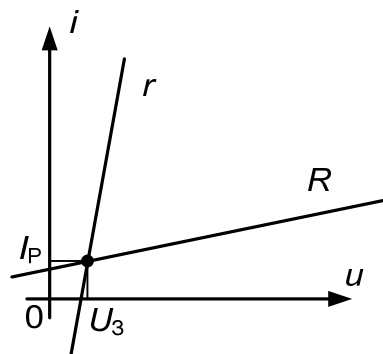


Рис. 3.35. ВАХ реального транзисторного ключа

Как видно из рис. 3.35, имеет место смещение их ВАХ относительно начала координат на величину остаточных параметров: тока разомкнутого ключа I_P и напряжения замкнутого ключа U_3 . Эти параметры могут создавать проблемы при передаче малых сигналов через последовательные транзисторные ключи.

Принципиальная схема параллельного транзисторного ключа ОЭ и характеристики транзистора изображены на рис. 3.36.

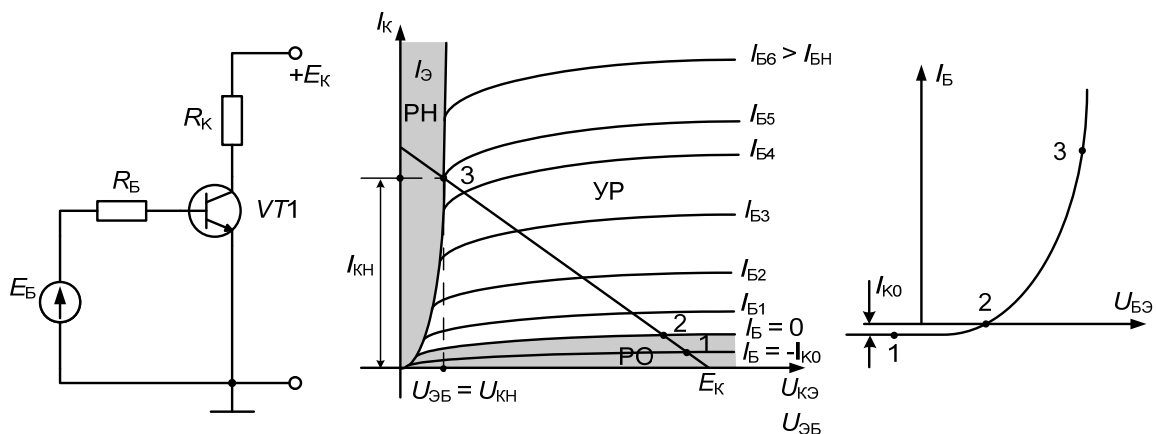


Рис. 3.36. Транзисторный ключ ОЭ и характеристики транзистора

Входной сигнал E_B , задающий базовый ток транзистора, играет ту же роль, что и сила P в схеме рисунка 3.34, а сам транзистор VT играет роль ключевого элемента K . Управляемой является коллекторная цепь с источником питания E_K и нагрузкой в виде R_K .

При действии отрицательного входного сигнала транзистор запирается, а при действии положительного сигнала он открывается и может быть насыщен.

На выходной характеристике транзистора (рис. 3.36) запертое состояние транзистора (режим отсечки) отмечен зоной РО, а режим насыщения зоной РН. Между этими зонами, между точками 1 и 3, находится усилительный режим транзистора УР.

Рассмотрим сначала режим отсечки транзистора в схеме простейшего ТК. В этом режиме оба перехода смещены в обратном направлении и токи транзистора (как входной базовый, так и выходной коллекторный) малы и равны I_{K0} . Тогда эмиттерный ток практически отсутствует, а эмиттер на схеме замещения транзистора не соединен с другими его выводами (рис. 3.37).

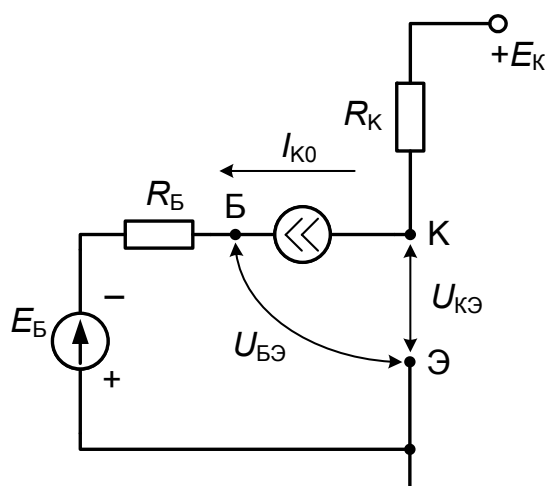


Рис. 3.37. Схема замещения ТК с транзистором в режиме отсечки

Условие надежного запираания транзистора по модулю E_B имеет вид $R_B \leq E_B/I_{K0\max}$. Неравенство должно выполняться во всем диапазоне рабочих температур, включая и максимальную температуру $t_{\max}$, при которой ток I_{K0} максимален и равен $I_{K0\max}$.

Напряжение на нагрузке R_K определяется как: $U_K = I_{K0} \cdot R_K$. Так как значение I_{K0} мало, то им пренебрегают, и можно считать, что $U_{KЭ} = E_K$.

Практически обеспечить надежное запираание транзистора можно и в режиме неглубокой отсечки, когда $E_B = 0$. Несмотря на то, что токи транзистора несколько возрастают, в первом приближении можно считать, что $U_{KЭ} = E_K$, и на выходе формируется высокий уровень напряже-

ния. На выходной характеристике транзистора режиму глубокой отсечки соответствует точка 1, а режиму неглубокой отсечки – точка 2.

Приближенно значение токов на границе режима отсечки можно оценить как:

$$\begin{cases} I_{\text{Э}} = \beta \cdot I_{\text{К0}}, \\ I_{\text{К}} = (1 + \beta) \cdot I_{\text{К0}}, \\ I_{\text{Б}} = -I_{\text{К0}}, \end{cases}$$

где β – коэффициент усиления по току транзистора.

Теперь подадим положительное напряжение $E_{\text{Б}}$. По мере увеличения напряжения транзистор отпирается и входит в усилительный режим. Начинает протекать базовый ток $I_{\text{Б}} > 0$ и пропорциональный ему коллекторный ток $I_{\text{К}}$, а потенциал коллектора соответственно уменьшается. Ввиду того, что токи эмиттера и коллектора приблизительно равны ($I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$), нанесем входную характеристику $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{БЭ}})$ на выходную – $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}})$.

В точке 3 при токе базы $I_{\text{Б5}}$ напряжения $U_{\text{КЭ}}$ и $U_{\text{БЭ}}$ становятся равными; инжекция коллектора начинает препятствовать дальнейшему увеличению коллекторного тока, и этот ток остается далее практически неизменным. Такой максимальный ток коллектора называют током насыщения и обозначают $I_{\text{КН}}$. Соответственно и режим двойной инжекции, характерный для открытого состояния ключа, называют режимом насыщения транзистора. Ток насыщения $I_{\text{КН}}$ протекает через транзистор и резистор $R_{\text{К}}$ и равен:

$$I_{\text{КН}} = (E_{\text{К}} - U_{\text{КН}}) / R_{\text{К}},$$

где $U_{\text{КН}}$ – остаточное напряжение на транзисторе в открытом состоянии. Остаточное напряжение $U_{\text{КН}}$, являющееся существенным параметром транзистора в импульсном режиме работы, должно быть минимальным.

Следовательно, в первом приближении, ввиду относительно малого остаточного напряжения по сравнению с $E_{\text{К}}$, транзистор может быть замещен эквипотенциальной точкой (рис. 3.38), а расчет тока $I_{\text{КН}}$ производится по приближенной формуле:

$$I_{\text{КН}} = E_{\text{К}} / R_{\text{К}}.$$

Условие насыщения транзистора имеет вид:

$$I_{\text{КН}} \leq \beta \cdot I_{\text{Б}} \text{ или } I_{\text{Б}} \geq I_{\text{БН}}.$$

Оно определяется не значениями токов (как видно из формул), а их соотношением и может иметь место при весьма малых токах.

Ток базы в режиме насыщения простого ТК равен $I_{\text{Б}} = E_{\text{Б}} / R_{\text{Б}}$.

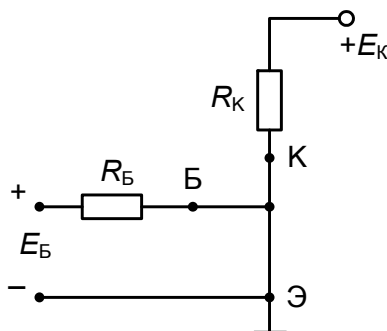


Рис. 3.38. Схема замещения ТК с транзистором в режиме насыщения

Подставляя токи базы и коллектора (I_B , I_{KH}) в условие насыщения, получим:

$$\frac{E_K}{R_K} \leq \beta \cdot \frac{E_B}{R_B}.$$

Откуда:

$$R_B \leq \beta \cdot \frac{E_B}{E_K} \cdot R_K.$$

Это неравенство является критерием насыщения транзистора простейшего транзисторного ключа ОЭ.

Удобно иметь не только критерий насыщения, но и количественную характеристику «глубины» насыщения. Такой параметр называется степенью насыщения $S = I_B / I_{BH}$.

Используя S и критерий насыщения для нашего простейшего ТК, получим:

$$R_B = \beta \cdot E_B \cdot R_K / (S \cdot E_K).$$

Обычно обеспечивается S от 1,5 до 3; при больших коэффициентах S транзистор также находится в режиме насыщения, однако при этом снижается быстродействие ключевого каскада за счет увеличения времени рассасывания.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Получение ВАХ транзистора VT1

Пункт выполняется при утере информации о ВАХ транзистора, полученной в лабораторной работе № 1.1.

- Соберите схему для снятия выходных ВАХ биполярного транзистора VT1, рис. 3.5.
- В меню запуска инструментов NI ELVIS выберите функцию «3-Wire» (трехпроводный вольт-амперный анализатор).
- Получите семейство выходных ВАХ транзистора с нужным количеством кривых в характеристиках.

- Соберите схему для снятия входной ВАХ транзистора. Входные характеристики получайте для значения выходного напряжения $U_{КЭ} = +5$ В (рис. 3.5).
- В меню запуска инструментов NI ELVIS выберите функцию «2-Wire» (двухпроводной вольт-амперный анализатор). Получите входную ВАХ транзистора.

4.2. Исследование усилительного режима транзистора

4.2.1. Регулирование координат рабочей точки покоя

- Соберите схему эксперимента (рис. 3.39).

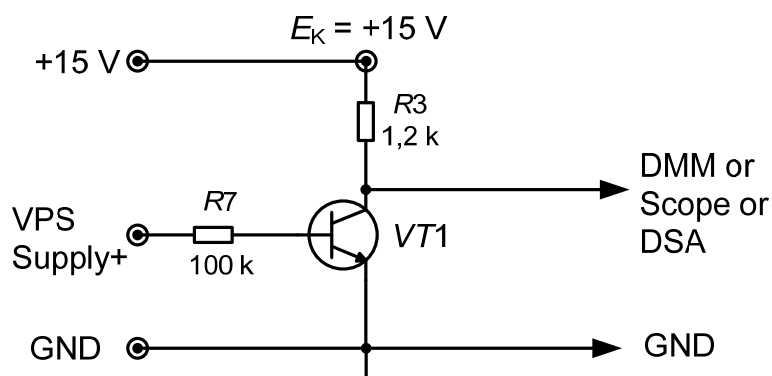


Рис. 3.39. Схема эксперимента для измерения координат рабочих точек транзистора

- Обращаем внимание на то, что вывод +15 В резистора $R3$ должен быть присоединен к источнику питания +15 В лабораторного макета!
- Вызовите из меню NI ELVIS регулируемый источник питания (VPS), цифровой мультиметр (DMM) в режиме измерения напряжения постоянного тока ($U_{=}$) или осциллограф (Scope) при открытом его входе (режим работы – DC).
- Включите питание макетной платы на лицевой панели станции. На виртуальной панели источника VPS осуществить сброс напряжения источника VPS на нуль, используя Reset или установив 0,00 В в окне. При этом транзистор $VT1$ закрыт. Проверьте, что напряжение на коллекторе транзистора должно быть близко к напряжению +15 В.
- На выходных ВАХ транзистора, полученных ранее, постройте нагрузочную прямую по постоянному току.
- Произведите расчет ориентировочных значений напряжений Supply+ для трех рабочих точек с координатами $U_{КЭ1} = 2$ В, $U_{КЭ2} = 5$ В, $U_{КЭ3} = 7$ В, используя выражение:

$$\text{Supply+} = I_B \cdot R7 + U_{БЭ}.$$

Определите и зафиксируйте значения коллекторного тока в каждой рабочей точке.

- На виртуальной панели источника VPS изменяйте значения Supply+ до получения требуемых значений $U_{КЭ1}$, $U_{КЭ2}$, $U_{КЭ3}$.

Полученные данные по координатам рабочих точек зафиксируйте.

Необходимо добиться устойчивого понимания, что изменения напряжения Supply+ ведут к изменению координат рабочей точки. При этом изменения их положения происходят по нагрузочной прямой по постоянному току.

- Задайтесь координатой рабочей точки транзистора при $U_{КЭ2} = 5$ В и найденного ранее значения коллекторного тока I_K и определите в окрестностях этой точки значения h -параметров транзистора.

- Зафиксируйте изменения координат рабочей точки с помощью осциллографа. Для этого (по рисунку 3.39) отключите цифровой мультиметр DMM и включите осциллограф. Используйте открытый вход осциллографа. Грамотно выбрав масштаб, наблюдайте на экране осциллографа изменение координаты $U_{КЭ}$ рабочей точки при вариации напряжения Supply+. Установите последовательно значения Supply+, соответствующие изучаемым рабочим точкам, и с помощью курсора определите $U_{КЭ1}$, $U_{КЭ2}$, $U_{КЭ3}$. Сравните их с данными предыдущих пунктов.

4.2.2. Исследование усилительного режима транзисторного каскада

- Постройте на выходных ВАХ транзистора три нагрузочные прямые по переменному току, соответствующие включенной дополнительной нагрузке R_L для трех режимов покоя при $U_{КЭ1} = 2$ В, $U_{КЭ2} = 5$ В, $U_{КЭ3} = 7$ В.

- Для каждой рабочей точки определите максимальную амплитуду и действующее значение выходного гармонического напряжения при выключенной и включенной нагрузке R_L . Полученные значения занесите в верхнюю строку табл. 3.2.

Таблица 3.2

Сравнение максимальных значений выходного напряжения для разных рабочих точек на ВАХ транзистора

Значение $U_{\text{выхmax}}$	Значение $U_{КЭ}$					
	$U_{КЭ1} = 2$ В		$U_{КЭ2} = 5$ В		$U_{КЭ3} = 7$ В	
	$R7$	$R7, R_L$	$R7$	$R7, R_L$	$R7$	$R7, R_L$
Теоретическое						
Практическое						

- Соберите схему эксперимента (без R_L), изображенную на рис. 3.40.

- Установите рабочую точку, иницируя VPS, с координатой $U_{КЭ2} = 5$ В, учитывая требуемое значение Supply+. На коллектор транзистора включите осциллограф Scope при открытом входе.

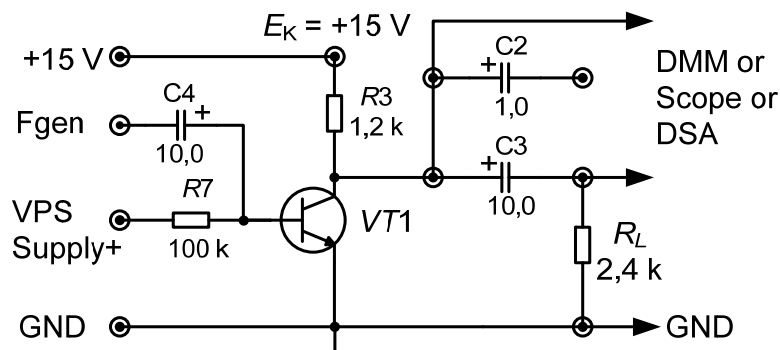


Рис. 3.40. Схема усилительного каскада ОЭ на биполярном транзисторе

- Выберите из меню функциональный генератор FGEN. Установите частоту гармонического сигнала 1 кГц и 10 мВ (амплитудное значение). Проверьте включение питания макетной платы. Просмотрите выходной сигнал на экране осциллографа. С помощью включенного курсора определите значение выходного сигнала. Определите коэффициент усиления каскада. Сравните полученное значение с теоретически рассчитанным значением, используя ранее определенные h -параметры для этой рабочей точки.

- Очень полезно проследить за увеличением спектрального состава выходного напряжения по мере увеличения нелинейных искажений сигнала. С этой целью вызовите анализатор спектра (DSA) и определите состав спектра по гармоникам. Рассчитайте коэффициент гармоник K_{Γ} по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1},$$

где U_1 – значение первой гармоники, U_i – значения гармоник, начиная со второй.

- Подключите дополнительную нагрузку R_L и повторите действия предыдущих двух пунктов. Сравните полученные значения выходных напряжений и коэффициентов усиления. Сделайте выводы.

- Установите выходное напряжение Fgen, равным 20 мВ. Сравните полученную осциллограмму с предыдущей, зафиксируйте и объясните появления нелинейных искажений выходного напряжения и его отсечки, если она появилась. Сделайте выводы о причинах появления

нелинейных искажений выходного сигнала и изменениях показаний спектрального анализатора.

- Устанавливайте последовательно выходное напряжение F_{gen} с амплитудой 30, 40, 50 мВ, ... и повторите предыдущий пункт. Зафиксируйте уровень входного напряжения, при котором появилась отсечка выходного напряжения. Считайте, что Вы определили максимальное выходное напряжение для исследуемой рабочей точки. Заполните средние столбцы таблицы 3.2.

- Установите рабочую точку с координатой $U_{кэ3} = 7$ В. Повторите действия, аналогичные ранее проделанным действиям с рабочей точкой $U_{кэ2} = 5$ В. Заполните правые столбцы таблицы 3.2.

- Установите рабочую точку с координатой $U_{кэ1} = 2$ В. Повторите действия, аналогичные ранее проделанным действиям с рабочей точкой $U_{кэ2} = 5$ В. Заполните левые столбцы таблицы 3.2.

- Выберите на основании проделанного анализа координату рабочей точки, с которой можно получить максимальную амплитуду выходного гармонического напряжения без отсечки. Зафиксируйте это значение с помощью осциллографа и сравните со значением, полученным при графических построениях на ВАХ транзистора с нагрузочными прямыми, определяемыми R_7 и R_L . Сделайте выводы.

- Какую рабочую точку в режиме покоя целесообразно выбрать, если будут усиливаться однополярные входные сигналы в виде прямоугольных импульсов: а) положительной полярности; б) отрицательной полярности? Установите эти рабочие точки, меняя напряжение $Supply+$, переведите источник сигнала $FGEN$ на требуемую форму сигнала, посмотрите и измерьте выходной сигнал. Сделайте выводы.

4.2.3. Исследование ключевого режима транзистора

4.2.3.1. Исследование режима отсечки транзистора

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.41.

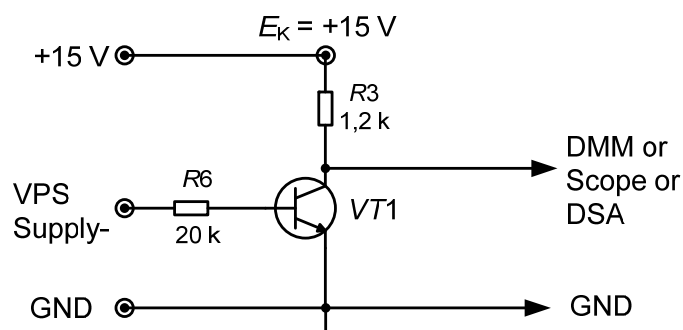


Рис. 3.41. Схема транзисторного ключа ОЭ для реализации режима глубокой отсечки

- Установите значение управляющего напряжения Supply- равным -5 В , обеспечив режим глубокой отсечки. С помощью вольтметра DMM или осциллографа с открытым входом измерьте напряжение на коллекторе транзистора. Убедитесь, перебросив вольтметр или осциллограф на вывод $+15\text{ В}$, что эти напряжения очень мало отличаются друг от друга, так как через R_6 протекает малый ток I_{K0} закрытого транзистора. Если значения напряжений различаются, то рассчитайте значение тока I_{K0} .

- Постепенно уменьшая (по модулю) управляющее напряжение до нуля с помощью VPS и измеряя коллекторное напряжение, подтвердите, что оно сохраняет высокий уровень порядка напряжения источника питания. Другими словами, подтвердите, что в режиме отсечки транзистор потерял свои усилительные свойства, а на его выходе формируется логическая единица, когда на входе действует логический ноль.

4.2.3.2. Исследование режима насыщения

- Переключите полярность напряжения управления VPS в схеме рисунка 3.41, установив на входе вместо Supply- источник Supply+ = 0 В .

Постепенно увеличивая управляющее напряжение с помощью VPS и измеряя коллекторное напряжение, удостоверьтесь, что транзистор работает в усилительном режиме, когда увеличение напряжения $U_{БЭ}$ ведет к уменьшению выходного напряжения $U_{КЭ}$. Значения $U_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$ измеряйте, используя двухканальный осциллограф с открытым входом. В таблицу 3.3 занесите данные ($U_{БЭ}$, $U_{КЭ}$, I_K) для различных рабочих точек усилительного режима транзистора. Последние данные должны соответствовать рабочей точке 3 (рис. 3.36), когда выполняется условие границы ($U_{БЭ} = U_{КЭ}$) между усилительным режимом и режимом насыщения, а рассчитанные токи коллектора и базы в этой точке являются токами насыщения I_{KH} и I_{BH} транзистора.

Таблица 3.3

Значения токов и напряжений на транзисторе

Значение напряжения Supply+	0					
Напряжение $U_{БЭ}$, В						
Ток базы I_B и I_{BH} , мкА						
Напряжение $U_{КЭ}$, В						
Ток коллектора I_K и I_{KH} , мА						

- Удостоверьтесь, что в режиме насыщения транзистор практически потерял свои усилительные свойства. С этой целью рассчитайте значения базового тока, соответствующие степеням насыщения S , равными 1; 2; 3; 4; 5.

- Затем определите по второму закону Кирхгофа значения напряжений Supply+, используя входную характеристику транзистора и значение сопротивления R_6 .

Последовательно изменяя напряжение Supply+ с VPS, фиксируем значения напряжения насыщения транзистора $U_{кэн}$. Данные приведите в отчете. При анализе табличных данных подтвердите, что и в режиме насыщения транзистор практически потерял усилительные свойства, а на выходе схемы формируются низкие уровни напряжения, которые соответствуют зоне логического нуля.

4.2.3.3. Исследование ключа ОЭ

- Переберите схему рисунка 3.41, заменив в ней источник сигнала управления. Вместо источника постоянного напряжения VPS подключите функциональный генератор FGEN. Вместо резистора R_3 в коллекторную цепь ключа поставьте более высокоомный резистор $R_{12} = 10$ кОм, чтобы ввести транзистор в режим насыщения при ограниченных амплитудных возможностях генератора FGEN (2,5 В) по сравнению с VPS (12 В).

- Используя упрощенную схему замещения (рис. 3.37), рассчитайте значения токов насыщения $I_{кн}$ и $I_{бн}$, считая что транзистор имеет коэффициент усиления по току $\beta = 50$. Рассчитайте также значения амплитуд напряжения генератора FGEN для обеспечения степеней насыщения транзистора S равными 2; 4; 7 при резисторе $R_6 = 20$ кОм.

- Выберите из меню FGEN, установите прямоугольную форму сигнала (Waveform), установите частоту 1 кГц, нулевое значение смещения (DC Offset). Амплитуду импульсов (Amplitude) последовательно изменяйте в соответствии с рассчитанными значениями, начиная с минимального значения при $S = 2$ и заканчивая амплитудой, равной 2,5 В.

- Подключите осциллограф Scope каналом CH 0 к входу схемы, а каналом CH 1 к выходу ключа ОЭ.

- Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы при разных значениях степеней насыщения транзистора. Попытайтесь по мере увеличения скорости развертки осциллографа просматривать участок выходного напряжения при переходе транзистора от режима насыщения в режим отсечки, зафиксировать увеличение времени рассасывания. Сделайте выводы.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Изобразите семейство входных и выходных характеристик биполярного $n-p-n$ -транзистора.
- 5.2. При каких напряжениях на переходах транзистора реализуется усилительный режим? Чем он характеризуется?
- 5.3. Области каких режимов можно выделить на выходной ВАХ транзистора в схеме ОЭ?
- 5.4. Что называется режимом покоя и рабочей точкой транзистора?
- 5.5. При известных координатах рабочей точки приведите алгоритм ее нанесения на семейства входных и выходных характеристик транзистора.
- 5.6. Как рассчитать в заданной рабочей точке параметр $h_{11Э}$? Приведите необходимые графические построения и пояснения.
- 5.7. Как рассчитать в заданной рабочей точке параметр $h_{21Э}$? Приведите необходимые графические построения и пояснения.
- 5.8. Как рассчитать в заданной рабочей точке параметр $h_{22Э}$? Приведите необходимые графические построения и пояснения.
- 5.9. Чем надо руководствоваться при выборе рабочей точки режима покоя в каскаде для усиления гармонического сигнала?
- 5.10. За счет чего образуется отсечка выходного напряжения? Приведите графические пояснения.
- 5.11. Как влияет изменение сопротивления нагрузки по переменному току на максимальное значение выходного напряжения? Приведите графические пояснения.
- 5.12. На холостом ходу (без нагрузки R_L) отсечки в выходном напряжении не наблюдалось. При нагрузке R_L появилась отсечка. Объясните почему.
- 5.13. Поясните, каким образом в ходе лабораторной работы Вы докажете, что транзистор в усилительном режиме является управляемым элементом.
- 5.14. Поясните, каким образом в ходе лабораторной работы Вы докажете, что транзистор в усилительном режиме обеспечивает усиление сигнала по мощности.
- 5.15. Для гармонического сигнала получите выражение для коэффициента усиления по мощности.
- 5.16. В чем отличие электронного ключа от механического ключа?
- 5.17. Что является остаточным током и напряжением в транзисторном ключе?
- 5.18. В каком случае транзистор $n-p-n$ -типа находится в более глубокой отсечке?
- 5.19. Поясните, как в схеме ключа ОЭ ввести транзистор в режим насыщения.

- 5.20. Приведите последовательность действий в ходе лабораторной работы для получения значений токов насыщения $I_{\text{кн}}$ и $I_{\text{бн}}$.
- 5.21. Что произойдет со степенью насыщения S в схеме ключа ОЭ, если уменьшить значение базового сопротивления R_7 ?
- 5.22. Как при проведении исследований доказать, что и в режиме отсечки, и в режиме насыщения транзистор потерял усилительные свойства?
- 5.23. Какие индикаторы отображают готовность макетной платы ELVIS к работе?
- 5.24. Укажите все возможные способы ввода/вывода исследуемого сигнала при работе с установкой ELVIS.
- 5.25. Какие источники (уровни напряжения) можно использовать для обеспечения работы собранных электрических схем (непосредственно с установки)?
- 5.26. В каких режимах возможно осуществлять управление генератором и источниками питания установки ELVIS?
- 5.27. Возможен ли режим одновременной работы DMM и осциллографа?
- 5.28. Разрешено ли использовать одновременно режимы измерения тока и напряжения DMM?
- 5.29. Какое предварительное действие необходимо выполнить для того, чтобы DMM производил измерения более точно?
- 5.30. Какой прибор ELVIS используется для исследования характеристик двухполюсника?
- 5.31. Какой прибор ELVIS используется для исследования характеристик транзистора? Какого типа транзистор можно исследовать при помощи данного устройства?
- 5.32. Какой прибор используется для спектрального исследования сигнала, как это осуществить? Какие входы ELVIS II при этом могут быть задействованы?

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы,
- исследуемые электрические схемы,
- порядок проведения исследований, таблицы с результатами измерений, графиками и необходимыми графическими построениями на них,
 - расчеты и значения величин, полученных при обработке экспериментальных данных,
 - выводы.

При оформлении отчета необходимо использовать рекомендации, изложенные в разделе 1.3.

Модуль 3. Усилительные каскады на транзисторе

Лабораторная работа № 3.1

Исследование усилительного каскада ОЭ

1. Цель работы

Овладение методикой исследования частотных свойств усилительного каскада в программно-аппаратной среде NI ELVIS.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования усилительного каскада в частотной области (АЧХ, ФЧХ) с использованием функционального генератора (FGEN), осциллографа (Scope) и анализатора Боде (Bode Analyzer);
- сравнение частотных и фазовых характеристик каскада при различных значениях его элементов. Оценка влияния обратной связи;
- приобретение навыков измерения входного и выходного сопротивлений усилителя;
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

3.1. Назначение элементов каскада

Схема усилительного каскада ОЭ изображена на рис. 3.42. Резисторы R_1 , R_2 используются для задания режима покоя каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, коллекторный ток покоя $I_{КА}$ создается заданием соответствующего значения тока покоя базы $I_{БА}$. Резистор R_1 предназначен для создания цепи протекания этого тока. Совместно с R_2 резистор R_1 обеспечивает исходное напряжение на базе $U_{БА}$ относительно зажима «–» источника питания. Резистор $R_э$ является элементом отрицательной обратной связи, предназначенным для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры. Конденсатор $C_э$ шунтирует резистор $R_э$ по переменному току, исключая проявление ООС в каскаде по переменным составляющим в большей части частотного диапазона.

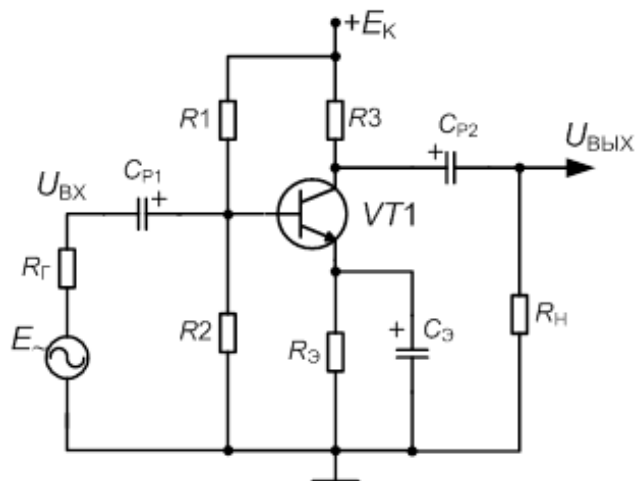


Рис. 3.42. Принципиальная схема усилительного каскада ОЭ

Резистор R_K является коллекторной нагрузкой, по которой протекает ток покоя I_{KA} и часть переменной составляющей коллекторного тока.

В лабораторной работе Вам необходимо на основе измерений напряжений в схеме каскада определить положение рабочей точки на ВАХ транзистора, рассчитав ее координаты. Осуществив построение нагрузочной прямой по постоянному току, нужно убедиться, что она обязательно проходит через рабочую точку режима покоя.

Помощь в этой части лабораторного эксперимента можно найти в кратких теоретических разделах практических занятий по расчету транзисторных каскадов для обеспечения режима покоя.

Название схемы «с общим эмиттером» означает, что вывод эмиттера транзистора по переменному току в большей части диапазона частот практически является общим для входа и выхода каскада.

3.2. Частотные характеристики каскада

Важными показателями каскада являются его коэффициент усиления по напряжению K , входное $R_{вх}$, выходное $R_{вых}$ сопротивления. Задача определения этих показателей для линейного его режима решается при расчете усилительного каскада по переменному току. Анализируя АЧХ или ФЧХ усилительного каскада, необходимо рассчитать зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты при неизменных значениях амплитуды входного сигнала. Из-за наличия в схеме реактивностей коэффициент будет комплексным. Зависимость модуля даст выражение для АЧХ, а фазового сдвига – для ФЧХ.

Ручной метод расчета основан на замене транзистора и всего каскада его линеаризованной схемой замещения по переменному току. Упрощенная эквивалентная схема каскада, справедливая для всего диапазона частот усилителя, приведена на рис. 3.43.

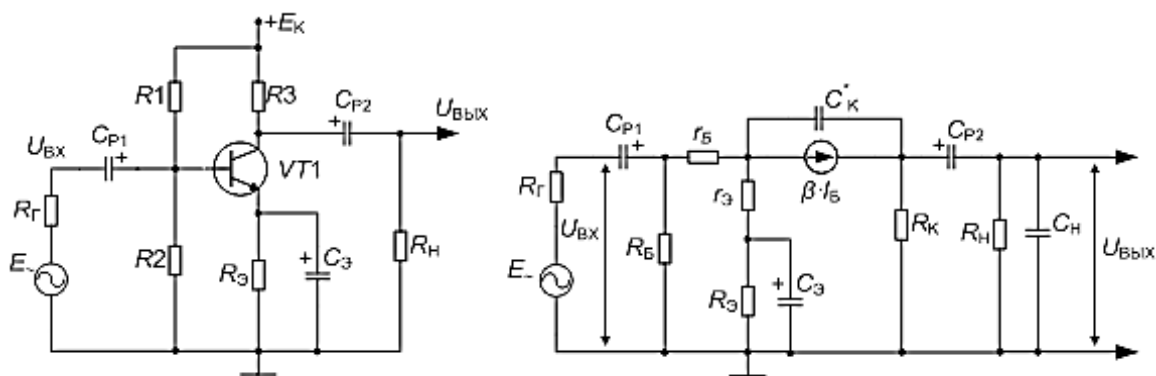


Рис. 3.43. Схема замещения каскада ОЭ с линеаризованной моделью транзистора

Полный анализ такой системы без привлечения компьютерных программ сложен и не позволяет четко выявить влияние каждого реактивного элемента на частотную и фазовую характеристики каскада. По этой причине весь рабочий диапазон частот усилителя условно разбивается на области нижних, средних и высоких частот и анализ ведется по соответствующей каждой области частот эквивалентной схеме.

Итак, лабораторное исследование поведения коэффициента усиления каскада проводится в полосе рабочих частот, используя принципиальную схему каскада, а теоретический анализ схемы осуществляется порознь для различных областей частот частотного диапазона.

Примеры такого анализа, необходимого для сличения с данными лабораторного эксперимента, приведены в части учебного пособия для практических занятий по теме «Расчет параметров и характеристик усилительных каскадов на транзисторах».

В ходе лабораторного эксперимента использована методика получения АЧХ и ФЧХ каскада при использовании анализатора Боде (Bode Analyzer), прямо отражающая их определение.

Сущность работы анализатора заключается в следующем. В составе анализатора находится генератор гармонического сигнала FGEN, выход (Fgen) которого соединен с входом объекта исследования и на котором поддерживается сигнал с неизменной амплитудой, обеспечивающей линейный режим работы каскада в полосе частот исследования. Генератор вводится в режим «сweeping», когда частота сигнала изменяется в заданных Вами пределах и с нужным пользователю количеством частотных точек в декаде частотного диапазона (рис. 2.12). Выходное напряжение каскада поступает на вход анализатора и совместно с входным сигналом обрабатывается, чтобы получить частотные зависимости модуля и фазового сдвига коэффициента усиления.

Если указанные характеристики необходимо было бы получить вручную, то для нахождения АЧХ нужно было бы использовать генератор, с помощью которого выставлялись бы частота и амплитуда входного сигнала и вольтметр, гарантирующий неизменность $U_{вх}$ и измеряющий значение выходного напряжения.

3.3. Определение $R_{вх}$ и $R_{вых}$

Аналитическое определение входного и выходного сопротивлений каскадов в области средних частот было проведено различными методами в материале для практического занятия по расчету параметров и характеристик усилительных каскадов на транзисторах.

При экспериментальных исследованиях широко используется метод, схема которого изображена на рис. 3.44.

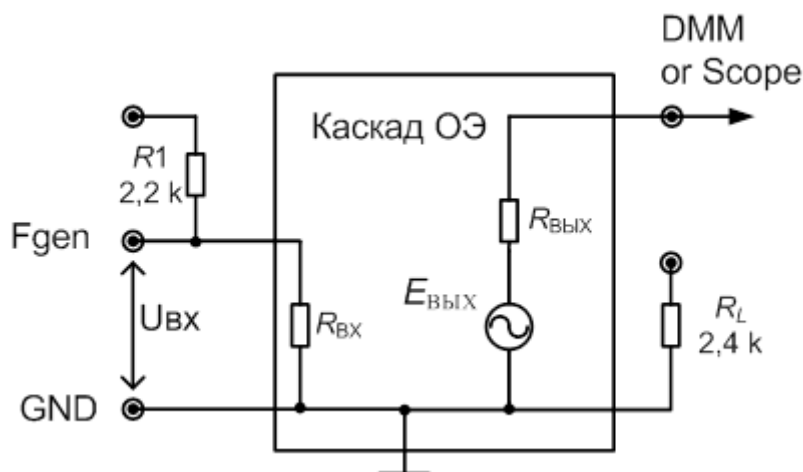


Рис. 3.44. Схема, поясняющая методы экспериментального определения входного и выходного сопротивлений каскада

3.3.1. Определение $R_{вх}$

Для нахождения входного сопротивления дополнительно используют резистор $R1$ с нормированным значением сопротивления (2,2 кОм). Первоначально сигнал с генератора подаем на вход каскада и, обеспечив линейный режим работы усилителя, фиксируем значение выходного напряжения $U_{вых1}$. Не меняя значения напряжения генератора $E_{\sim}$ (Fgen), подключаем его к входу усилителя через резистор $R1$ и зафиксировем значение напряжения на выходе $U_{вых2}$. Зная усиление $K_0 = U_{вых1} / E_{\sim}$, находим:

$$U_{вых2} = K_0 \cdot \frac{R_{вх}}{R1 + R_{вх}}.$$

Из последнего выражения можно определить $R_{вх}$.

3.3.2. Определение $R_{\text{вых}}$

Определение выходного сопротивления можно осуществить, используя режим холостого хода и нагрузку $R_L = 2,4 \text{ кОм}$. В первом эксперименте: $U_{\text{вых1}} = E_{\text{вых}}$. Во втором при включении R_L напряжение $U_{\text{вых2}}$ снижается за счет работы делителя, состоящего из $R_{\text{вых}}$ и R_L .

Оба эксперимента дают систему из двух уравнений, решение которой позволяет определить $R_{\text{вых}}$.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.
- Осуществите вызов цифрового вольтметра DMM или осциллографа Scope.

4.2. Анализ режима покоя

- Соберите на макетной плате часть схемы усилительного каскада (рис. 3.45), обеспечивающая режим работы транзистора по постоянному току. Сопротивление $R2^*$ подбирается при настройке режима каскада на каждой макете: его номинал лежит в пределах $(2,4\text{--}3,3) \text{ кОм}$.

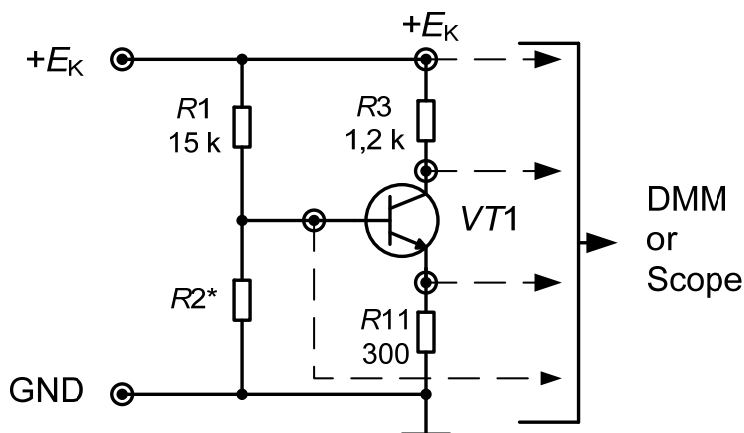


Рис. 3.45. Схема для исследования режима покоя транзистора

- Последовательно измерьте с помощью вольтметра или осциллографа напряжение питания схемы, а также напряжения на коллекторе, базе и эмиттере транзистора.
- Рассчитайте падение напряжения на коллекторном сопротивлении и определите ток покоя в рабочей точке транзистора.
- Определите значение напряжения между коллектором и эмиттером транзистора $U_{\text{кэ}}$.

- Используйте выходную ВАХ транзистора, полученную при выполнении первой лабораторной работы (заготовьте при подготовке к лабораторной работе), и на ней проставьте рабочую точку по координатам, полученным в предыдущих двух пунктах.

- Проведите на выходной ВАХ нагрузочную прямую по постоянному току. Проверьте, прошла ли она через рабочую точку.

4.3. Определение максимальных значений выходного гармонического напряжения

4.3.1. Теоретическая оценка (проводится дома при подготовке к лабораторной работе)

При выполнении этого пункта полезно вспомнить или вновь проработать теоретический материал к лабораторной работе «Исследование режимов биполярного транзистора».

- Проведите через рабочую точку на выходных ВАХ транзистора нагрузочные прямые по переменному току для двух случаев: на холостом ходу и с подключенной нагрузкой R_L .

- Определите теоретическое значение максимальной амплитуды выходного гармонического напряжения для двух вышеобозначенных построений, как максимальное расстояние, выраженное в вольтах, между точкой пересечения нагрузочной прямой и координатой точки покоя или этой координатой и остаточным напряжением транзистора.

- Полученные значения используйте как верхний предел амплитуды выходного гармонического сигнала, при котором реализуется линейный режим работы усилительного каскада.

4.3.2. Экспериментальное определение

- Соберите схему усилительного каскада ОЭ, изображенную на рис. 3.46, установив режим холостого хода.

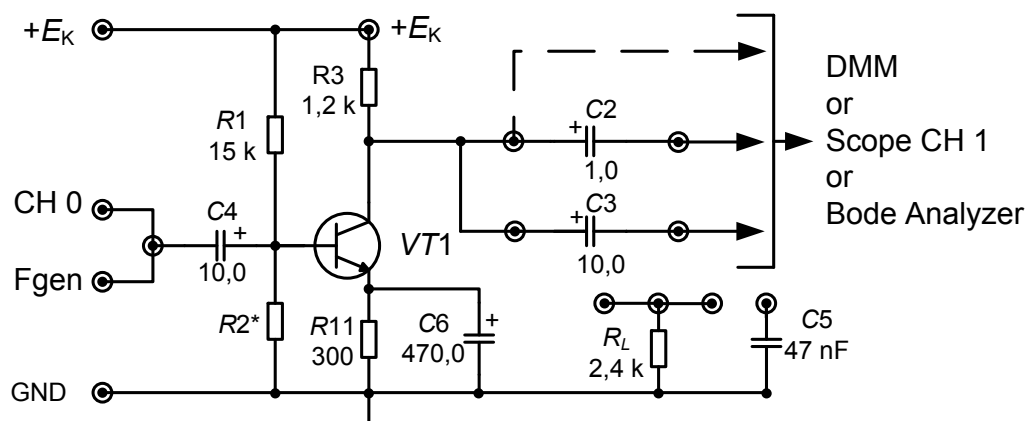


Рис. 3.46. Схема усилительного каскада ОЭ. При использовании Bode Analyzer выход Fgen необходимо соединить с CH 0, а выход каскада – с CH 1

- Отключите цифровой вольтметр (если он использовался) и вызовите из меню генератор FGEN и осциллограф Scope, установив ему режим открытого входа.
- Восстановите данные по значениям $h_{11Э}$ и $h_{21Э}$, полученные при выполнении лабораторной работы «Исследование режимов биполярного транзистора», или определите указанные параметры по приведенной в ней методике.
- Рассчитайте коэффициенты усиления по напряжению на холостом ходу и с нагрузкой R_L . Определите ориентировочные значения амплитуд входного напряжения, учитывая ранее полученные оценки амплитуд выходного напряжения, чтобы гарантировать линейный режим работы схемы.
- Активизируйте функциональный генератор FGEN. Установите частоту гармонического сигнала 1 кГц и рассчитанное ранее значение входного сигнала. Учитывая, что дискретность установки амплитуды напряжения с генератора составляет 10 мВ, ориентировочные значения входного напряжения, полученные ранее, округлите в большую сторону, а затем с помощью осциллографа проверьте отсутствие отсечки в выходном напряжении.
- Активизируйте осциллограф в режиме открытого входа и просмотрите выходной сигнал на экране осциллографа. Увеличивайте амплитуду выходного напряжения генератора до появления отсечки выходного напряжения или явно выраженных нелинейных искажений. Определите экспериментальное значение выходного переменного напряжения. Сравните полученное значение с ранее рассчитанным теоретическим значением.
- Подключите сопротивление нагрузки. Проведите аналогичные действия. Сделайте выводы из проведенного эксперимента и сравнений.
- Постепенно, используя возможности генератора по дискретности изменения его гармонического напряжения, увеличивайте входное напряжение каскада. Наблюдайте появление отсечки в выходном сигнале. Зафиксируйте, где сначала появляется отсечка: сверху или снизу? Или отсечка симметричная? Поясните результаты эксперимента, используя графические построения на выходных характеристиках транзистора.
- При желании вызовите анализатор спектра DSA и определите состав спектра выходного сигнала по гармоникам. Рассчитайте коэффициент гармоник K_Γ по формуле:

$$K_\Gamma = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1},$$

где U_1 — значение первой гармоники, U_i — значения гармоник, начиная со второй.

- Пронаблюдайте, как при увеличении отсечки нарастают число и амплитуды гармонических составляющих выходного напряжения и увеличивается коэффициент гармоник K_{Γ} .

4.4. Исследование АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ

4.4.1. Получение характеристик базового варианта

- Будем считать базовым вариантом схему, изображенную на рис. 3.46, в которой подключена нагрузка R_L через конденсатор C_3 , а конденсатор нагрузки C_5 отключен.
- При использовании анализатора Боде на макетной плате выход генератора FGEN (Fgen) подключите к входу исследуемой схемы и к каналу CH 0. Выход схемы подсоедините к каналу CH 1.
- Вызовите из меню NI ELVIS анализатор Боде и установите начальное значение частоты 5 Гц, конечное значение частоты 35 кГц и число шагов за декаду изменения частоты равным 5.
- Амплитуду входного сигнала, получаемую с выхода генератора Fgen и обеспечивающую линейный режим работы усилительного каскада во всей полосе рабочих частот, выберите на основании ранее проведенного эксперимента в п. 5.3.2.
- Для автоматической регулировки диапазона значений по оси Y (Gain, Phase) в подразделе Graph Settings можно установить режим Autoscale, а также выбрать логарифмический (Logarithmic) или линейный (Linear) масштаб отображения шкалы.
- Запустите программу кнопкой запуска Run, получите характеристики. Из-за большой погрешности вычисления функции арктангенса иногда наблюдается на ФЧХ резкое изменение фазы при переходе к области средних частот. Если это имеет место, то разделите всю область частот на две части, вырезав частоты, на которых наблюдается резкое изменение фазы.
- Определите конечное значение частоты для исследования характеристик в ОНЧ и ОСЧ (начальное значение частоты – 5 Гц). Запустите программу кнопкой запуска Run, получите характеристики.
- Определите начальное значение частоты для исследования характеристик в ОСЧ и ОВЧ. Конечное значение частоты – 35 кГц. Запустите программу кнопкой запуска Run, получите характеристики.
- При необходимости получения значений коэффициентов усиления или фазового сдвига каскада на разных частотах используйте Cursors. Сохранение результатов осуществляйте кнопкой Log на виртуальной панели Bode Analyzer. Сохраните графики для отчета.

4.4.2. *Исследование изменений характеристик каскада из-за влияния выходного разделительного конденсатора*

- Проведите теоретическую оценку изменения усиления и фазового сдвига в ОНЧ при различных разделительных конденсаторах. Расчет произвести дома при подготовке к лабораторной работе.
- В схеме усилительного каскада, приведенной на рис. 3.46, нагрузку R_L подключите через конденсатор $C2$ (конденсатор $C3$ отключите!), а конденсатор нагрузки $C5$ отключите.
- Получите характеристики каскада, используя программу исследований предыдущего подраздела. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта. Сформируйте выводы относительно влияния разделительного конденсатора на характеристики каскада, если емкость изменилась в 10 раз.

4.4.3. *Исследование изменений характеристик каскада из-за подключения к выходу каскада дополнительной емкости нагрузки*

- При подготовке к лабораторной работе рассчитайте, как изменится модуль сопротивления нагрузки в исследуемой схеме на частоте 35 kHz, если к параллельно включенным сопротивлениям R_L и $R3$ в исходном состоянии дополнительно присоединить $C5$.
- В схеме усилительного каскада, изображенной на рис. 3.46, нагрузку R_L вновь подключите через $C3$ и параллельно нагрузке установите дополнительную емкость $C5 = 47$ нФ.
- Получите характеристики каскада, используя вышеприведенную программу исследований. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта. Сформируйте выводы относительно влияния емкости нагрузки.

4.4.4. *Исследование изменений характеристик каскада из-за введения отрицательной обратной связи*

- При подготовке к лабораторной работе уясните, что произойдет с характеристиками каскада при введении последовательной отрицательной обратной связи по току за счет отключения блокировочного конденсатора $C6$.
- Учитывая резкое уменьшение модуля коэффициента усиления по напряжению до значения порядка $|K_0| = (R_L \parallel R3)/R11$ в ОСЧ (выведите эту формулу на основе теории обратной связи), необходимо почти на два порядка увеличить Peak Amplitude на выходе Fgen генератора на панели Bode Analyzer.
- Убедитесь, что при выбранной Вами амплитуде входного сигнала усилитель работает в линейном режиме (воспользуйтесь осциллографом).

- Получите характеристики каскада, используя вышеприведенную программу исследований. Сформируйте выводы относительно влияния обратной связи на характеристики исследуемого каскада.

- Изобразите в отчете на одном графике три нормированных АЧХ, полученных в ходе экспериментального исследования каскада.

Сравните полученные характеристики с характеристикой базового варианта.

4.4.5. Определение $R_{вх}$ и $R_{вых}$

- Вернитесь к схеме базового варианта каскада.
- Отключите Bode Analyzer. Вызовите из меню NI ELVIS генератор FGEN и осциллограф Scope.

- Используйте метод определения сопротивлений, иллюстрированный рис. 3.44. По полученным в процессе подготовки к лабораторной работе формулам рассчитайте сопротивления и сравните их с теоретическими значениями, также найденными при подготовке к занятию.

4.4.6. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований частотных искажений базового варианта каскада в ОНЧ

- Возьмите за основу базовый вариант схемы усилительного каскада, для которого получена нормированная АЧХ. Тогда на частоте, на усилении которой произведено нормирование, в относительных единицах усиление равно единице, а в децибельном исчислении – 0 дБ.

- Определите нижнюю частоту f_H полосы пропускания, на которой усиление снизилось в $\sqrt{2}$ раз, или на 3 дБ, т. е. $M_{НЭКСП} = 1,41$.

- На этой частоте определите значения коэффициентов частотных искажений M_H из-за цепей с разделительными емкостями $C3$ и $C4$ и $M_{НБЛ}$ из-за цепи с блокировочной емкостью $C6$:

$$M_{НБЛ} = \frac{\sqrt{(1 + S \cdot R_{11})^2 + (\omega_H \cdot C_6 \cdot R_{11})^2}}{\sqrt{1 + (\omega_H \cdot C_6 \cdot R_{11})^2}},$$

где $S = h_{21Э} / h_{11Э}$ – крутизна транзистора в рабочей точке.

- Определите теоретическое значение частотных искажений $M_{НТЕОР}$ как произведение полученных значений частных значений коэффициентов частотных искажений. Сравните полученные теоретическое и экспериментальное значения искажений M_H и сделайте выводы.

5. Контрольные вопросы

5.1. Объясните назначение элементов каскада.

5.2. Какие требования предъявляются к значениям элементов каскада, обеспечивающих стабильность координаты рабочей точки в режиме покоя?

- 5.3. Каким образом по значениям напряжений, измеренным в схеме каскада в режиме покоя, определить координаты рабочей точки?
- 5.4. При известных координатах рабочей точки определите ожидаемое значение максимальной амплитуды выходного напряжения на холостом ходу и при подключении нагрузки R_L .
- 5.5. Поясните алгоритм построения нагрузочных прямых по постоянному и переменному токам.
- 5.6. Каким образом осуществляется экспериментальная проверка теоретически определенного значения максимальной амплитуды выходного напряжения?
- 5.7. Каким образом, имея экспериментальные данные для входной и выходной характеристик транзистора, определить его h -параметры в рабочей точке?
- 5.8. Теоретически определите значение амплитуды входного напряжения, которое в ОСЧ приведет к найденной Вами максимальной амплитуде выходного напряжения.
- 5.9. Установите, что произойдет с коэффициентом усиления каскада в ОСЧ и с максимальной амплитудой выходного напряжения при подключении нагрузки R_L .
- 5.10. Поясните последовательность Ваших действий при получении отсечки в выходном напряжении.
- 5.11. Каким образом на основе известной информации определить вид первичной отсечки выходного сигнала (сверху? снизу?)
- 5.12. Поясните, зачем при экспериментальных исследованиях используется анализатор гармоник.
- 5.13. Какие действия необходимо предпринять, чтобы провести исследования каскада с целью определения его АЧХ и ФЧХ?
- 5.14. Каким образом и с учетом каких положений можно условно разделить диапазон рабочих частот на ОНЧ, ОСЧ и ОВЧ?
- 5.15. Какими причинами обусловлены частотные и фазовые искажения в ОНЧ в рассматриваемой схеме каскада?
- 5.16. Каково назначение разделительных конденсаторов? Выведите выражение для расчета линейных искажений из-за цепи с выходными разделительными конденсаторами C_2 и C_3 .
- 5.17. В ходе экспериментальных исследований каскада в ОНЧ Вы получили данные о поведении АЧХ базового варианта схемы с C_2 и схемы с C_3 . Как проверить, что на выбранной частотной точке проведенные исследования корректны?
- 5.18. Поясните назначение блокировочного конденсатора C_6 .

- 5.19. Вызывает ли установка в схему каскада блокировочного конденсатора линейные искажения в области нижних частот? Дайте мотивированный ответ.
- 5.20. Почему после удаления из схемы C_6 наблюдается уменьшение усиления каскада? Приведите вывод выражения для коэффициента усиления по напряжению такой схемы.
- 5.21. Какими причинами обусловлены частотные и фазовые искажения в ОВЧ в рассматриваемой схеме каскада?
- 5.22. Приведите вывод формулы, показывающей изменение модуля сопротивления нагрузки ($R_L // C_5$) каскада от частоты в ОВЧ. Поясните, почему рассматриваемый фактор является одной из причин появления линейных искажений в ОВЧ.
- 5.23. Объясните методику эксперимента для определения $R_{\text{вх}}$. Как рассчитать ожидаемое значение $R_{\text{вх}}$ по схеме каскада?
- 5.24. Объясните методику определения $R_{\text{вых}}$. Как рассчитать ожидаемое значение $R_{\text{вых}}$ по схеме каскада?
- 5.25. Зачем при изображении АЧХ вариантов исследованных схем усилительного каскада целесообразно применение нормированного вида этих характеристик?
- 5.26. Каждый параметр линеаризованного усилителя при частотном анализе определяется соответствующим комплексным набором возмущения и отклика:
- 1-я группа:
1. Коэффициент усиления по напряжению.
 2. Входное сопротивление.
 3. Выходное сопротивление.
- 2-я группа:
- а) $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$; б) $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$;
- в) $R_{\text{вых}} = U_{\text{вых, КЗ}} / I_{\text{вых, КЗ}}$; г) $R_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$.

Найдите правильное соответствие между элементами групп.

- 5.27. Классические характеристики для коэффициента усиления по напряжению при использовании метода комплексных амплитуд определяются следующим образом:
- 1-я группа:
1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).
 2. Фазочастотная характеристика (ФЧХ).
 3. Амплитудная характеристика (АХ).
- 2-я группа:
- а) $U_{\text{вых}} = \Phi(U_{\text{вх}})|_{f=\text{const}}$; б) $U_{\text{вых}} = \Phi(\varphi_K)|_{f=\text{const}}$;

$$\text{в) } \varphi_K = \Phi(U_{\text{вх}}) \Big|_{f = \text{const}}; \text{ г) } \varphi_K = \Phi(f) \Big|_{U_{\text{вх}} = \text{const}};$$

$$\text{д) } |\dot{K}| = \Phi(f) \Big|_{U_{\text{вх}} = \text{const}}.$$

Докажите правильное соответствие между элементами групп.

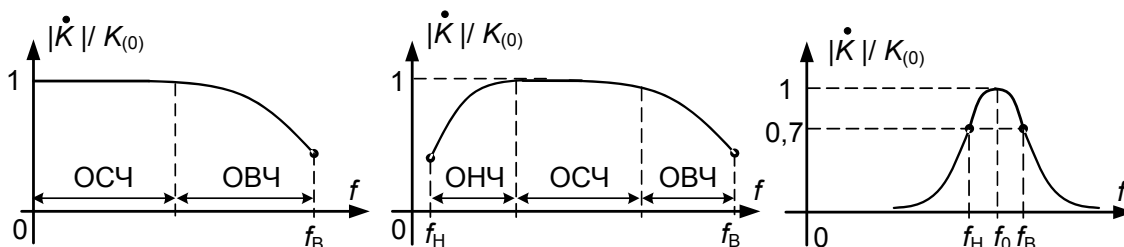
5.28. Нормированные АЧХ соответствуют следующим типам усилителей:

1-я группа:

1. Усилитель переменного напряжения.
2. Усилитель постоянного тока.
3. Избирательный усилитель (полосовой фильтр).

2-я группа:

а); б); в).



а)

б)

в)

Докажите правильное соответствие между элементами групп.

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы,
- исследуемые электрические схемы,
- таблицы с результатами измерений, графиками и необходимыми графическими построениями на них,
- расчеты и значения величин, полученных при обработке экспериментальных данных,
- выводы.

Модуль 3. Усилительные каскады на транзисторе

Лабораторная работа № 3.2

Передача импульсных сигналов в резистивном усилительном каскаде

1. Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде NI ELVIS переходных искажений импульсных сигналов в резистивном усилительном каскаде.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования переходных искажений импульсных сигналов в усилительном каскаде с использованием функционального генератора (FGEN) и осциллографа (Scope);
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

Свойства усилителя в импульсном режиме работы удобно описывать переходной характеристикой как отклика на входное воздействие в виде единичной функции. Из-за наличия реактивных элементов в схеме даже в линейном режиме работы усилитель вносит линейные искажения:

- при передаче фронта единичной входной функции $1(t)$, т. е. искажения в области малых времен (ОМВ), когда усилитель неправильно передает участки сигналов с большими производными;
- при передаче вершины импульса, представленного суммой единичных функций, причем вторая (отрицательная), задержана относительно первой на время длительности импульса. Данные искажения происходят на вершине импульса, т. е. в области больших времен (ОБВ), где на импульсе находится участок сигнала с малой производной.

Нахождение переходной характеристики $h(t)$, как реакции усилителя на единичную функцию $1(t)$, обычно осуществляется с помощью операторного метода анализа переходных процессов.

Считая, что этот метод освоен Вами в курсе «Электротехника», напомним важное для данной работы свойство преобразования Лапласа – значения функции времени $a(t)$ при $t = 0$, т. е. в ОМВ и $t = \infty$, т. е. в ОБВ могут быть найдены с помощью предельных соотношений для изображения $A(p)$ передаточной функции:

$$a(t = 0) = \lim_{p \rightarrow \infty; \operatorname{Re}(p) > 0} p \cdot A(p); \quad a(t = \infty) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot A(p).$$

Понимая комплексное число p как комплексную частоту, приходим к выводу, что анализ каскада в области низких частот частотного метода и анализ в ОБВ временного метода должны осуществляться по одной расчетной схеме. В первом случае (ОНЧ) определяются линейные частотные и фазовые искажения, во втором – искажения по передаче вершины импульсного сигнала.

Аналогично одна и та же расчетная схема ответственна за линейные частотные и фазовые искажения в области верхних частот и линейные переходные искажения в ОМВ при передаче фронтов импульсов.

3.1. Передача фронта импульса

При анализе в области малых времен (ОМВ) искажения на переходной характеристике, обусловленные работой усилительного каскада (рис. 3.47), могут быть представлены временем установления t_y и выбросом δ .

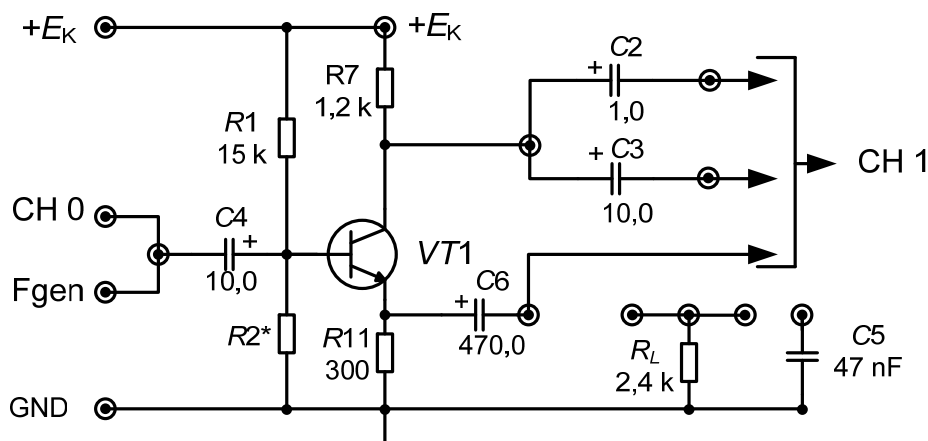


Рис. 3.47. Схема резистивных каскадов для исследования переходных искажений

Физические основы понимания причин появления указанных искажений обусловлены коммутационными законами, действующими в цепях с реактивностями. Необходимые пояснения к рассматриваемому усилительному каскаду приведены в части учебного пособия для прак-

тических занятий по теме «Расчет параметров и характеристик усилительных каскадов на транзисторах».

В первом приближении будем считать, что комплексный коэффициент усиления резистивного каскада равен:

$$\dot{K}_B = \frac{K_0}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_B},$$

где $K_0 \approx -\beta \cdot \frac{R_H \parallel R_K}{h_{113}}$ – коэффициент усиления в ОСЧ;

$\tau_B = F(f_T, C_K, R \sim, C_H, \dots)$ – эквивалентная постоянная времени, являющаяся функцией граничной частоты транзистора, емкости его коллекторного перехода и активной и реактивной составляющими нагрузки.

Тогда изображение $K(p) = \frac{K_0}{1 + p \cdot \tau_B}$ и нормированная (относитель-

но K_0) переходная характеристика имеют вид: $h(t) = 1 - e^{-t/\tau_B}$.

В этом случае выброс (δ) на переходной характеристике $h(t)$ отсутствует и линейные искажения в ОМВ определяются только временем установления $t_y = t_2 - t_1$, т. е. интервалом, в течение которого $h(t)$ изменяется от уровня 0,1 (при t_1) до уровня 0,9 (при t_2) своего установившегося значения: $t_y \approx 2,2\tau_B$ (рис. 3.81).

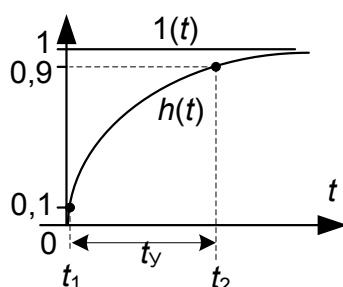


Рис. 3.48. Единичная функция и переходная характеристика в системе первого порядка с нормированной передачей $K(p)_H = 1/(1+p\tau)$

Из рисунка видно, что любое увеличение постоянной времени τ_B , например из-за дополнительного шунтирования нагрузки конденсатором $C5$, приведет к увеличению τ_B , а значит и t_y .

Чтобы экспериментально просматривать фронты входного и выходного сигналов в ходе экспериментального исследования, необходимо использовать быстрые развертки осциллографа. При этом можно судить о качестве фронтов сигнала, генерируемого генератором FGEN учебного комплекса NI ELVIS, и исследуемого каскада.

3.2. Передача вершины импульса

Так же как при исследовании искажений в ОНЧ при частотном анализе, искажения в ОБВ во временном анализе рассматривают отдельно для каждой цепи, влияющей на передачу вершины импульса, т. е. для каждого из разделительных или блокировочных конденсаторов исследуемой схемы.

Учет влияния каждой из разделительных емкостей производится по обобщенной схеме (рис. 3.49).

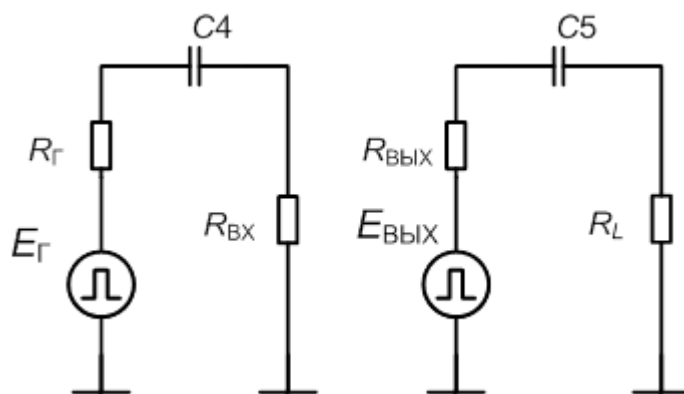


Рис. 3.49. Схемы замещения для расчета переходных искажений в ОБВ из-за наличия разделительных конденсаторов во входной и выходной цепях каскада

Чтобы понять, почему при подаче на вход каскада импульса длительностью $t_{\text{и}}$ имеет место спад вершины импульса, вновь обратимся к коммутационным законам электротехники.

Когда проходит передний фронт входного импульса, в любой из приведенных выше схем замещения разделительная емкость закорочена и ток в цепи максимальный. В дальнейшем по мере зарядки емкости ток в цепи экспоненциально уменьшается, а значит, экспоненциально уменьшается и выходное напряжение схемы, обуславливая спад вершины импульса.

Тогда нормированное изображение передаточной функции имеет вид

$$\frac{K(p)}{K_0} = \frac{p \cdot \tau_{\text{H}}}{1 + p \cdot \tau_{\text{H}}},$$

где τ_{H} – постоянная времени $\tau_{\text{H1}} = C4 \cdot (R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}})$, $\tau_{\text{H2}} = C5 \cdot (R_{\text{ВЫХ}} + R_L)$ (рис. 3.49), $R_{\text{ВХ}} = R1 \parallel R2 \parallel h_{11\text{Э}}$, $R_{\text{ВЫХ}} = R3$ – для схемы с коллекторной нагрузкой.

Если сигнал снимается с эмиттера транзистора, т. е. исследуется схема эмиттерного повторителя, то в этом случае приблизительно: $R_{\text{ВХ}} = R1 \parallel R2$; $R_{\text{ВЫХ}} = 1/S$, где $S = \beta/h_{11\text{Э}}$ – крутизна биполярного транзистора, а $\tau_{\text{H2}} = C5(1/S + R_L)$.

Уравнение переходной характеристики (рис. 3.50) для каждой из цепей равно: $h(t) = e^{-t/\tau_H}$.

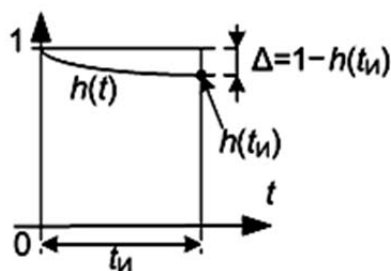


Рис. 3.50. Прямоугольный импульс и переходная характеристика в системе первого порядка с нормированной передачей $K(p)_H = p\tau/(1+p\tau)$

Известно, что для усилителя с малым спадом вершины импульса длительностью t_H после разложения $h(t)$ в степенной ряд и использования первых двух членов линейного разложения спад импульса равен $\Delta = 1 - h(t_H) \approx t_H/\tau_H$.

В первом приближении общий спад вершины выходного импульса равен сумме частных спадов импульса от различных цепей схемы.

Таким образом, спад вершины Δ может улучшаться или при уменьшении длительности импульса t_H (увеличении частоты следования), или за счет установки цепей с большой постоянной времени τ_H .

Последнее требование, к сожалению, обычно выполняется за счет увеличения значения емкости разделительных и блокировочных конденсаторов, что нежелательно по многим соображениям.

По возможности лучшим решением по ликвидации искажений при передаче вершины импульса является устранение в схеме всех таких емкостей, т. е. переход к усилителям постоянного тока.

3.3. Общие замечания по выполнению работы

При выполнении лабораторной работы Вам придется исследовать схемы усилительных каскадов, в которых введены обратные связи. Вначале исследуется каскад ОЭ с последовательной обратной связью по току (рис. 3.51).

Чтобы грамотно провести эксперимент и определить амплитуду входного напряжения, не приводящую к нелинейному режиму работы исследуемой схемы, необходимо оценить при подготовке к лабораторной работе коэффициент усиления каскада с обратной связью для спектральных составляющих импульсного входного сигнала средней частоты.

С этой целью получим схему замещения (рис. 3.52), из которой можно увидеть, что в схеме действительно есть обратная связь, что можно рассчитать коэффициент усиления исходного усилителя, коэф-

коэффициент передачи четырехполюсника обратной связи и коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

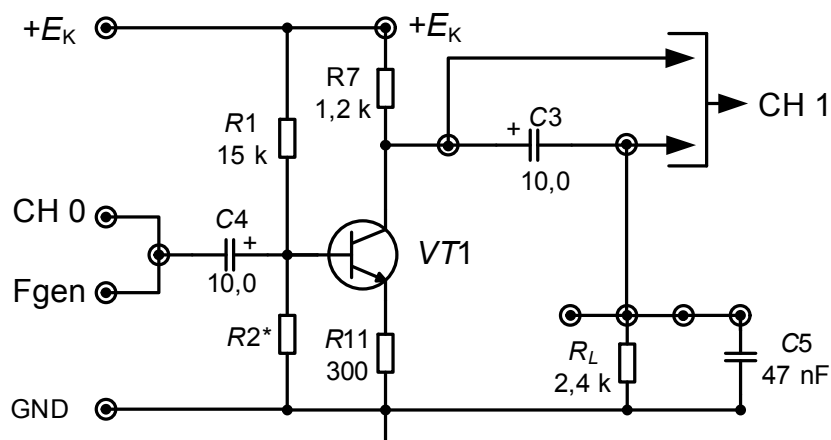


Рис. 3.51. Схема каскада ОЭ с последовательной обратной связью по току

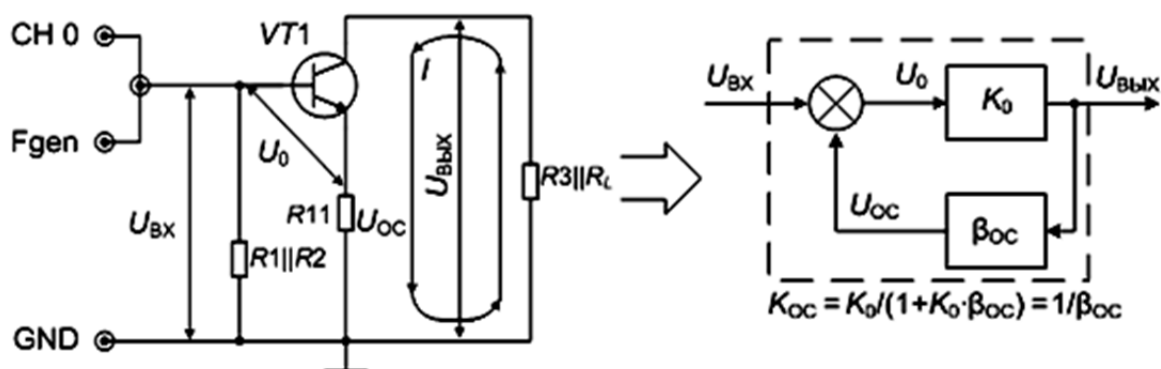


Рис. 3.52. Схема замещения для переменных составляющих сигналов каскада ОЭ с последовательной обратной связью по току

Исходный усилитель (без обратной связи) получился бы тогда, когда сопротивление R_{11} в цепи эмиттера было бы закорочено по переменному току емкостью C_6 каскада (рис. 3.47). В этом случае весь входной сигнал управлял бы работой транзистора, так как напряжение обратной связи отсутствовало. Как известно (смотрите, например, предыдущие две лабораторные работы), коэффициент усиления такого

усилителя равен $K_0 = -\frac{h_{21Э} R_3 // R_L}{h_{11Э}}$ и по модулю имел бы значение

порядка сотни. В этом случае амплитуда входных импульсов для сохранения линейного режима работы не должна превышать несколько десятков милливольт.

Оценим значение коэффициента передачи четырехполюсника обратной связи. Из рис. 3.52 видно, что и выходное напряжение, и напряжение обратной связи образуются за счет протекания одинаковых токов, так как в усилительном режиме транзистора его токи эмиттера и коллектора практически одинаковы. Тогда

$$\beta_{OC} = U_{OC} / U_{вых} = \frac{R_{11}}{R_3 // R_L} = \frac{300}{800} \approx 0,38,$$

и в схеме присутствует глубокая обратная связь, при которой $K_{OC} \approx 1 / \beta_{OC} = 8 / 3 \approx 2,7$. Снова приняв во внимание значение максимальной амплитуды выходного напряжения по положению рабочей точки на ВАХ транзистора, можно видеть, что придется значительно поднять амплитуду импульсов с выхода генератора FGEN из-за резкого снижения усиления.

Для понимания переходных процессов в схеме и грамотного расчета постоянных времени цепей, влияющих на их ход, необходимо проработать раздел теории обратных связей, объясняющий ее влияние на параметры и характеристики схемы. Так, рассматриваемая последовательная отрицательная обратная связь (ООС) по току, если она грамотно реализована, может привести к увеличению как входного, так и выходного сопротивлений каскада.

Такие изменения значений сопротивлений ведут к изменению значений постоянных времени τ_H и τ_B , влияющих соответственно на переходные процессы в ОБВ и ОМВ, по сравнению с их поведением в схеме без обратной связи.

Реализовать схему без обратной связи можно, если в схеме каскада (рис. 3.47) резистор R_{11} зашунтировать емкостью C_6 . Для этой схемы входное сопротивление каскада равно $R_{вх} = R_1 // R_2 // h_{11Э}$, где входное сопротивление транзистора $h_{11Э}$ является наименьшим по значению, а выходное сопротивление $R_{вых} = R_3$.

Введя обратную связь, получим увеличение входного сопротивления каскада до уровня $R_{вх} = R_1 // R_2$, а выходное сопротивление практически не увеличится, оставаясь на прежнем значении $R_{вых} = R_3$. Ясно, что постоянная времени цепи с разделительной емкостью C_4 увеличится и эта цепь будет создавать спад вершины импульса в ОБВ несколько меньше, чем она давала спад в схеме без обратной связи.

Для выходной емкости C_3 постоянная времени цепи не изменится, несмотря на введение обратной связи, так как выходное сопротивление схем практически не изменилось.

По такой же причине останется на прежнем уровне и составляющая постоянной времени из-за емкости $C5$ нагрузки, в значительной степени определяющая время установления каскада в ОМВ.

Аналогичные процедуры необходимо выполнить для корректного эксперимента со схемой со 100%-й последовательной обратной связью по напряжению – со схемой эмиттерного повторителя, рис. 3.53.

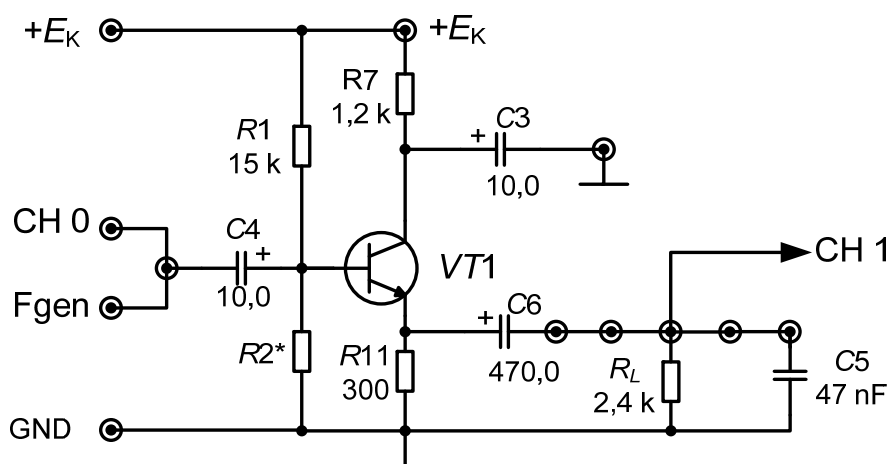


Рис. 3.53. Схема каскада со 100%-й последовательной обратной связью по напряжению

Для эмиттерного повторителя, в котором использована 100%-я последовательная обратная связь по напряжению, когда выходное напряжение и напряжение обратной связи совпадают, схема замещения изображена на рис. 3.54.

Передача повторителя по напряжению принципиально меньше единицы; это надо учесть при выборе амплитуды входного напряжения, получаемого с выхода генератора.

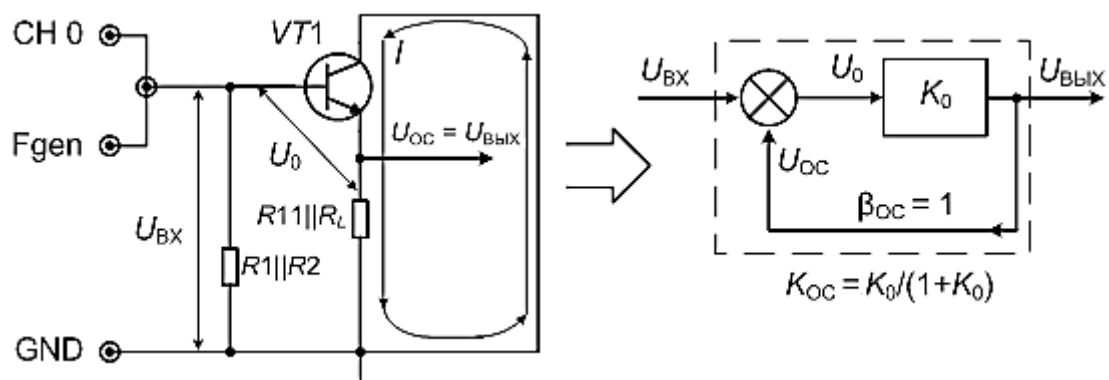


Рис. 3.54. Схема замещения для переменных составляющих сигналов повторителя напряжения

Как известно, обозначенная обратная связь приведет к увеличению входного сопротивления каскада также как и в предыдущем случае до уровня $R_{\text{вх}} = R1 \parallel R2$ и к уменьшению выходного сопротивления до значения $R_{\text{вых}} = 1/S$. Чтобы спад вершины импульсов из-за емкости, связывающей выход каскада с нагрузкой R_L , не был бы чрезмерным при резком уменьшении выходного сопротивления, в схеме повторителя используется разделительная емкость $C6$ существенно большего номинала, чем у емкости $C3$. А вот благодаря резкому уменьшению выходного сопротивления постоянная времени, влияющая на передачу фронта, уменьшается при тех же значениях емкости $C5$ нагрузки. Поэтому при тех же условиях повторитель будет лучше передавать фронты прямоугольных импульсов.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.
- Осуществите вызов из меню генератора FGEN и осциллографа Scope, установив ему режим открытого входа.
- В поле «Waveform Settings» переведите генератор FGEN в режим выдачи сигналов в виде последовательности прямоугольных импульсов – кнопка «Square Wave». Установите амплитуду импульсов 1 В и нулевое смещение, используя ручки управления «Amplitude» и «DC Offset».
- Установите чувствительность используемого канала осциллографа (например, CH 1) по оси Y на уровне 2 В на деление.

4.2. Просмотр импульсных сигналов

- Соберите схему резистивного усилительного каскада с нагрузкой в цепи коллектора, охваченного последовательной ООС по току, используя рис. 3.47. Подключите нагрузку R_L к разделительному конденсатору $C3$.
- Для просмотра входного напряжения, подаваемого с генератора FGEN используйте канал осциллографа – CH 0. После выполнения этого пункта Вы должны заметить, что на самой быстрой развертке видно, что выдаваемые FGEN сигналы не идеальны и имеют конечные длительности фронтов. Измерьте их.
- Просмотр выходных сигналов осуществляйте или с коллектора транзистора или с сопротивления нагрузки R_L .

В первом случае вход осциллографа (CH 1) должен быть открытым (режим работы – DC), так как в режиме покоя там присутствует посто-

янная составляющая напряжения порядка 5 В. Во втором случае, вход может быть закрыт (режим работы – АС), и можно в несколько раз поднять чувствительность осциллографа.

- Изменяйте частоту следования последовательности прямоугольных импульсов с генератора, не забывая грамотно управлять разверткой и синхронизацией осциллографа, и просмотрите, как проявляются искажения при передаче фронтов и вершин импульсов. Если искажения фронтов импульсов мало заметны по сравнению с теми, что выдает генератор, то подключите в исследуемой схеме емкость нагрузки $C5$.

- По результатам проведенного эксперимента зафиксируйте:
 - частоту, на которой лучше всего исследовать искажения фронта импульсов;
 - декаду частот, на которых лучше всего исследовать искажения при передаче вершины импульсов.

4.3. Исследование линейных искажений в ОМВ при передаче фронта импульса

4.3.1. Резистивный каскад с последовательной обратной связью по току

- Используйте прежнюю схему эксперимента.
- Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора FGEN.

- Получите на канале В осциллографа изображение переднего (заднего) фронта импульса, выделяемого на нагрузке R_L , используя максимальную скорость развертки сигнала, регулируемую ручкой Time/Div или устанавливаемую в окне ниже.

- Проведите измерения времени установления импульса, пользуясь масштабной сеткой, без емкости нагрузки $C5$ и с ней. Сделайте выводы о качестве передачи фронтов импульсного сигнала через усилитель в исследованных условиях работы.

4.3.2. Резистивный каскад с последовательной 100 % обратной связью по напряжению (эмиттерный повторитель)

- Измените схему эксперимента. Правый вывод емкости $C3$ заземлите, тем самым заземляя коллектор транзистора по переменному току.

Нагрузку R_L подключите через емкость $C6$ к эмиттеру транзистора.

- Повторите пункты методики по просмотру и измерению фронтов импульсных сигналов для нового резистивного каскада, увеличив их амплитуду до 2,5 В. Выполните сравнение полученных данных, учитывая, что при домашней подготовке к работе Вы могли определить и сопоставить значения постоянных времени для двух исследуемых схем.

4.4. Исследование линейных искажений в ОБВ при передаче вершины импульса

4.4.1. Резистивный каскад с последовательной обратной связью по току

- Соберите схему резистивного усилительного каскада с нагрузкой в цепи коллектора, охваченного последовательной ООС по току, используя рис. 3.51, но при этом подключите нагрузку R_L к разделительному конденсатору $C2$.

- Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора FGен из определенной ранее декады частот. Установите амплитуду входного импульса 1 В.

- Определите составляющую спада вершины импульса из-за влияния цепи с разделительным конденсатором $C4$, подав на вход осциллографа сигнал с коллектора транзистора и используя открытый вход Scope (режим работы – DC).

- Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор $C2$. Определите спад вершины импульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

- Используя домашнее определение постоянных времени цепей и соответствующих спадов вершин, найдите, соответствует ли суммарный спад экспериментально полученным спадам из-за $C4$ и $C3$. По какому закону определяется общий спад через отдельные его составляющие?

- Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор $C3 = 10 \cdot C2$. Определите спад вершины импульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

- Используя домашнее определение постоянных времени цепей и соответствующих спадов вершин, найдите, соответствует ли суммарный спад экспериментально полученным спадам из-за $C4$ и $C3$.

- Переберите схему каскада и подайте на вход осциллографа сигнал с коллектора транзистора, используя открытый вход Scope.

- Изменяйте частоту последовательности входных импульсов (5–10 точек в декаде частот) и определяйте значение спада на каждой частоте. Подчиняются ли полученные экспериментальные данные теории? Сведите данные в таблицу и постройте график.

- Попробуйте, просматривая фронты выходного напряжения, определить время установления t_y и сравнить полученное значение с ожидаемым результатом.

4.4.2. Резистивный каскад с последовательной 100 % обратной связью по напряжению (эмиттерный повторитель)

- Переберите схему эксперимента. Правый вывод емкости $C3$ заземлите, тем самым заземляя коллектор транзистора по переменному току.

Нагрузку R_L подключите через емкость C_6 к эмиттеру транзистора.

- Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора FGEN из определенной ранее декады частот. Установите амплитуду входного импульса 2,5 В.

- Определите составляющую спада вершины импульса из-за влияния цепи с разделительным конденсатором C_4 , подав на вход осциллографа сигнал с эмиттера транзистора и используя открытый вход Scope. Объясните, почему один и тот же конденсатор дает разные значения спадов вершин в разных схемах?

- Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор C_6 . Определите спад вершины импульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

- Зная закон суммирования спадов, найдите спад вершины импульсов из-за разделительного конденсатора C_6 . Сравните полученное значение с тем, что Вы получили дома. Сделайте выводы.

- Попробуйте, просматривая фронты выходного напряжения, определить время установления t_y и сравнить полученное значение с ожидаемым результатом.

5. Контрольные вопросы

5.1. На основе коммутационных законов объясните появление линейных искажений в выбранной схеме каскада при передаче фронтов прямоугольного импульса.

5.2. Объясните, почему цепи с разделительным конденсатором вызывают линейные искажения при передаче вершины импульса.

5.3. Проиллюстрируйте использование операторного метода при определении $h(t)$ и t_y , если $K = K_0 / (1 + \tau_B)$.

5.4. Используя операторный метод, найдите значение $h(t)$ и Δ , если

$$\dot{K} = K_0 \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot \tau}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau}.$$

5.5. Как на экране осциллографа определить время установления t_y ?

5.6. Как на экране осциллографа определить спад вершины импульса Δ ?

5.7. Приведите условия, при которых на переходной характеристике каскада отсутствует линейное искажение в виде выброса.

5.8. Приведите расчет постоянной времени цепи с C_4 для каскада без обратной связи.

5.9. Приведите расчет постоянной времени цепи с C_4 для каскада с последовательной обратной связью по току.

5.10. Определите постоянную времени цепи с емкостью нагрузки C_5 в схеме повторителя напряжения.

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы,
- исследуемые электрические схемы,
- таблицы с результатами измерений, графиками и необходимыми графическими построениями на них,
- расчеты и значения величин, полученных при обработке экспериментальных данных,
- выводы.

Модуль 4. Схемы на операционных усилителях

Лабораторная работа № 4.1

Типовые схемы включения операционных усилителей

1. Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде NI ELVIS параметров и характеристик типовых схем операционных усилителей.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования параметров и характеристик типовых схем операционных усилителей с использованием:
 - функционального генератора (FGEN) и осциллографа Scope;
 - регулируемых источников питания (Variable Power Supplies);
 - цифрового мультиметра (Digital Multimetr);
 - анализатора амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (Bode Analyzer);
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

Операционным называется усилитель, предназначенный для выполнения математических операций при использовании его в схемах с обратной связью. Однако область применения операционных усилителей (ОУ), выполненных в виде микросхемы, значительно шире. Поэтому в настоящее время под ОУ принято понимать микросхему – усилитель постоянного тока, позволяющий строить узлы аппаратуры, функции и технические характеристики которых зависят в основном от свойств цепи используемой обратной связи.

Таким образом, операционные усилители предназначены для проведения различных линейных и нелинейных операций над входными сигналами. Применение глубоких обратных связей позволяет обеспечивать высокое качество таких преобразований.

Согласно классификации по ГОСТ 4.465 ОУ делятся на универсальные (общего применения), прецизионные (инструментальные), регулируемые (микромощные) и т. д.

С другой стороны в зависимости от соответствий входного и выходного сопротивлений ОУ с сопротивлениями источника сигнала и нагрузки различают усилители: с потенциальным или с токовым входом, с токовым выходом. В зависимости от возможности получать амплитуду выходного сигнала до уровня напряжения примененного источника питания различают усилители типа *rail-to-rail* и т. д.

В справочной литературе обычно описывают следующие основные параметры ОУ:

- коэффициент усиления по напряжению: отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению входного дифференциального напряжения;
- частота единичного усиления: значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления напряжения падает до единицы;
- максимальное выходное напряжение: максимальное значение выходного напряжения, при котором искажения не превышают заданного значения;
- скорость нарастания выходного напряжения: отношение его изменения от 10 до 90 % от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение;
- напряжение смещения: значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы выходное напряжение было равно нулю;
- входные токи: токи, протекающие через входные контакты ОУ;
- разность входных токов;
- дрейф напряжения смещения;
- дрейф разности входных токов;
- максимальное входное дифференциальное напряжение: напряжение, прикладываемое между входами ОУ, превышение которого ведет к выходу параметров за установленные границы или к разрушению микросхемы;
- максимальное синфазное входное напряжение: наибольшее значение напряжения, прикладываемого одновременно к обоим входам ОУ относительно нулевого потенциала, превышение которого нарушает работоспособность микросхемы;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала: отношение коэффициента усиления напряжения, приложенного между входами ОУ, к коэффициенту усиления общего для обоих входов напряжения;
- выходной ток: максимальное значение выходного тока ОУ, при котором гарантируется работоспособность микросхемы.

В измерительных устройствах необходимо усиливать с малыми искажениями слабые электрические сигналы, сопровождаемые значительным уровнем синфазных, температурных и других помех.

Прецизионный усилитель, используемый для этих целей, должен обладать не только очень большими значениями коэффициентов усиления и подавления синфазного сигнала, но и малым напряжением смещения нуля и его дрейфом, малыми уровнями шумов, большим входным сопротивлением.

В лабораторной работе использован операционный усилитель ОР–07 (российский аналог КР140УД17), который является прецизионным усилителем прямого усиления и широко используется в схемах измерительных устройств. Наиболее полная информация об операционном усилителе ОР–07 приводится в DATA SHEET, представляемых фирмами-изготовителями. Первая страница об этом ОУ приведена в Приложении А.

Операционный усилитель КР140УД17 имеет внутреннюю частотную коррекцию и может работать в диапазоне питающих напряжений от 3 до 18 В каждой полярности при симметричном (двухполярном) питании, которое в основном и будет использовано в лабораторном цикле.

Предварительно познакомимся с важнейшими правилами, которые в первом приближении определяют поведение идеального ОУ, охваченного петлей глубокой ООС и работающего в линейном режиме, когда его входы и выход не перегружены.

Правило 1. Входы идеального ОУ с бесконечно большим дифференциальным коэффициентом усиления эквипотенциальны, так как его дифференциальное входное напряжение стремится к нулю.

Правило 2. Входы идеального операционного усилителя ток не потребляют. Такая идеализация говорит о том, что операционный усилитель имеет бесконечно большие значения своих дифференциального и синфазного входных сопротивлений.

Правило 3. По выходу ОУ близок к источнику ЭДС, т. е. он имеет малое выходное сопротивление.

Таким образом, идеальный ОУ является источником ЭДС, управляемым ЭДС. В зависимости от вида ООС различают инвертирующее и неинвертирующее включения ОУ.

3.1. Инвертирующее включение ОУ

В инвертирующем усилителе (рис. 3.55) входной сигнал и сигнал обратной связи противоположного знака суммируются с помощью резисторов R_1 и R_2 . Как известно, такая обратная связь называется параллельной по входу. Что касается обратной связи по выходу, то она явля-

ется по напряжению, так как напряжение обратной связи $U_{OC} = \beta_{OC} \cdot U_{ВЫХ}$. При $\beta_{OC} = R1/(R1+R2) = \text{const}$ пропорционально $U_{ВЫХ}$.

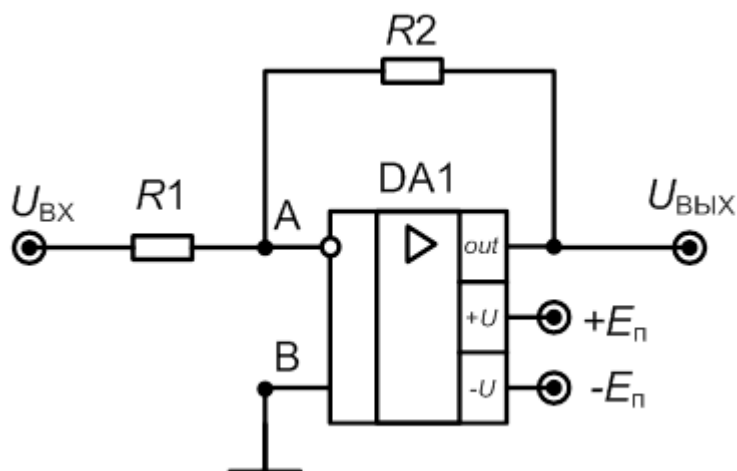


Рис. 3.55. Типовая схема инвертирующего усилителя

Зная вид обратной связи и применив правила 1 и 2, можно определить основные параметры инвертирующего усилителя при идеальной его модели – коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления:

1. Потенциал точки А равен потенциалу точки В и также равен потенциалу земли. По этой причине в литературе точку А называют «виртуальная земля», «квазиземля» или «виртуальный нуль».

2. Тогда $U_{R1} = U_{ВХ}$, а $U_{R2} = U_{ВЫХ}$

3. Согласно правилу 2 и первому закону Кирхгофа получим следующее равенство: $U_{ВХ}/R1 = -U_{ВЫХ}/R2$.

Следовательно, коэффициент усиления инвертирующего усилителя

$$K_{ИН} = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = -R2 / R1.$$

Еще проще можно найти входное сопротивление усилителя. Учитывая, что как $U_A = 0$, то $R_{ВХ\ И} = R1$.

Даже если ОУ имеет конечное, но малое значение выходного сопротивления, то при ОС по напряжению выходное сопротивление схемы $R_{ВЫХ. ИН}$:

$$R_{ВЫХ. ИН} = R_{ВЫХ. ОУ} / (1 + K_y \cdot \beta_{OC}),$$

где $R_{ВЫХ. ОУ}$ – выходное сопротивление ОУ, K_y – дифференциальный коэффициент усиления ОУ.

В реальных ОУ без ОС, начиная с некоторой частоты ω_{CP} (рис. 3.56), наблюдается спад модуля коэффициента усиления. Поэтому АЧХ реального ОУ соответствует АЧХ фильтра нижних частот (верхняя характеристика).

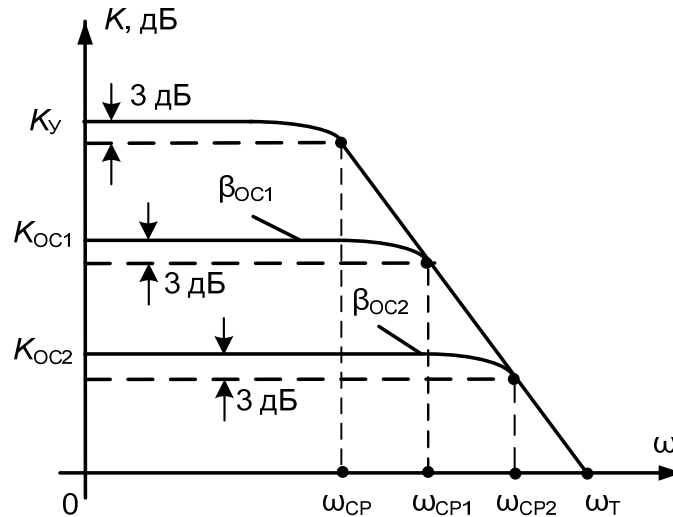


Рис. 3.56. Амплитудно-частотные характеристики инвертирующих усилителей с разной глубиной обратной связи

При введении обратной связи АЧХ усилителя с обратной связью зависит от глубины введенной связи. Действительно имеем:

$$K_{\text{ин}}(j\omega) = -\gamma K_y(j\omega) / (1 + K_y(j\omega)\beta_{\text{ос}}); \quad K_y(j\omega) = K_y(0) / (1 + j\omega\tau),$$

где $\tau = 1/\omega_{\text{ср}}$ – постоянная времени реального ОУ, инерционность которого представлена звеном первого порядка с частотой среза $\omega_{\text{ср}}$ на уровне -3 дБ; $K_y(0)$ – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе; γ и $\beta_{\text{ос}}$ – коэффициенты передачи по напряжению входного и выходного напряжений в точку А схемы (рис. 3.59) соответственно.

После простых преобразований получим:

$$K_{\text{ин}}(j\omega) = \frac{K_{\text{ин}}(0)}{\left[1 + j\omega \cdot \frac{\tau}{1 + K_y(0)\beta_{\text{ос}}} \right]},$$

где $K_{\text{ин}}(0) = -\frac{\gamma \cdot K_y(0)}{1 + \beta_{\text{ос}} \cdot K_y(0)}.$

Следовательно, для такого усилителя частота среза увеличивается пропорционально глубине обратной связи $\beta_{\text{ос}}$, полоса пропускания расширяется, а коэффициент усиления $K_y(0)$ уменьшается.

Полученные выражения являются базовыми и для неинвертирующего усилителя.

Изображенная на рис. 3.92 схема инвертирующего включения ОУ не является принципиальной. Скорее всего, это схема для переменных составляющих тока и напряжения, так как в ней не показаны цепи питания, коррекции и смещения усилителя.

В лабораторной работе в основном будет использовано симметричное, двухполярное питание ($+E_{\Pi}$ и $-E_{\Pi}$), которое может быть получено или от источников напряжения $+15$ и -15 В, или от регулируемых источников (VPS): SUPPLY+ и SUPPLY-.

Первый вариант (рис. 3.57) будет использован при исследовании амплитудной характеристики схем с ОУ.

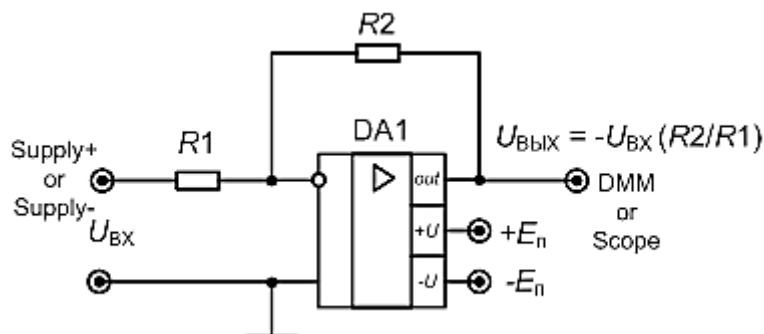


Рис. 3.57. Инвертирующее включение ОУ с двухполярными источниками 9 В

Как известно, амплитудной характеристикой (АХ) является зависимость выходного напряжения схемы от входного. Для инвертирующего усилителя идеализированная АХ будет соответствовать рис. 3.58, а наклон АХ на линейном участке определяется коэффициентом усиления по напряжению, т. е. зависит от номиналов используемых резисторов в цепи обратной связи.



Рис. 3.58. Типичный вид амплитудной характеристики инвертирующего включения ОУ для двухполярного и симметричного питания

При использовании двухполярных напряжений питания ограничение значений максимального выходного напряжения в схемах с подобными операционными усилителями происходит на уровне $(0,8 \dots 0,9)$ от значений источников питания.

Если модули напряжений питания одинаковы, то изломы на АХ будут симметричными. Для разных значений модулей уход с линейного режима работы схемы в нелинейный режим будет асимметричным.

Второй вариант (рис. 3.59) двухполярного питания может быть применен для исследования схем на максимальную амплитуду выходного гармонического сигнала, когда на входе действует напряжение с выхода Fgen генератора FGEN.

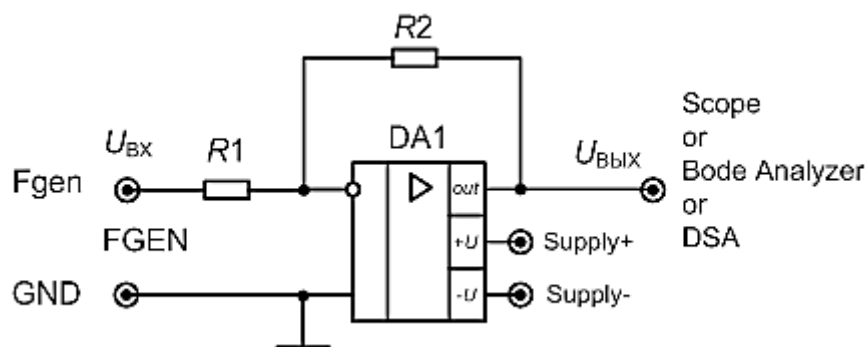


Рис. 3.59. Инвертирующее включение ОУ с двухполярными источниками питания от NI ELVIS: SUPPLY+ и SUPPLY–

Если ОУ работает в линейном режиме, то выходной сигнал также будет практически гармоническим (рис. 3.60).

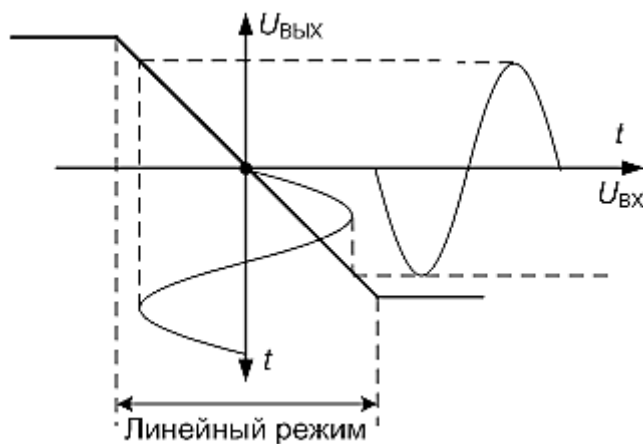


Рис. 3.60. Работа ОУ в линейном режиме

Когда на некоторых участках входное напряжение переводит ОУ в нелинейный режим работы, то на выходном напряжении формируется отсечка: симметричная при симметричной амплитудной характеристике (рис. 3.61) и несимметричная в противном случае.

Использование двухполярного источника питания не является единственно возможным. Схема с однополярным питанием, например,

реализуется тогда, когда один из входов ОУ, куда подключаются источники питания, заземляется.

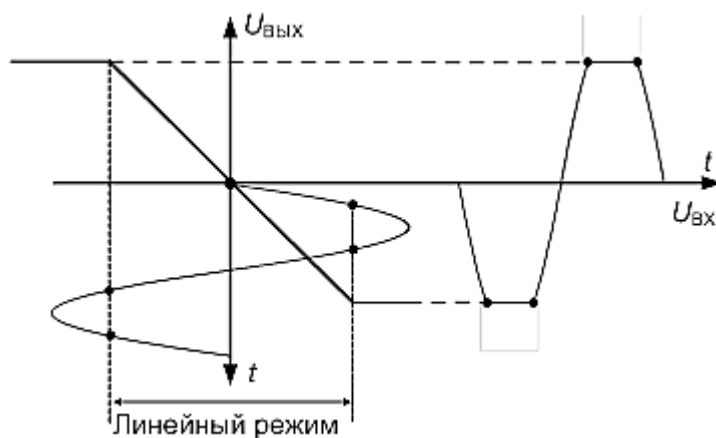


Рис. 3.61. Формирование отсечки выходного напряжения при заходе усилителя в нелинейный режим работы

Представим, что в схемах, изображенных на рис. 3.57 или 3.59, оставлен только источник питания положительной полярности. Здесь входное напряжение привязано не к средней точке источников питания, как это обычно делается в случае двухполярного питания ОУ, а к отрицательному полюсу источника питания.

Эта схема не работает, если входное напряжение положительно, поскольку выходное напряжение должно в этом случае становиться отрицательным, а отрицательного источника питания здесь нет.

Наиболее естественно использовать однополярное питание ОУ тогда, когда источник входного сигнала имеет постоянную составляющую, желательно на уровне половины примененного в схеме питания.

На рис. 3.62 и 3.63 представлены примеры схем подключения источника смещения при однополярном питании ОУ.

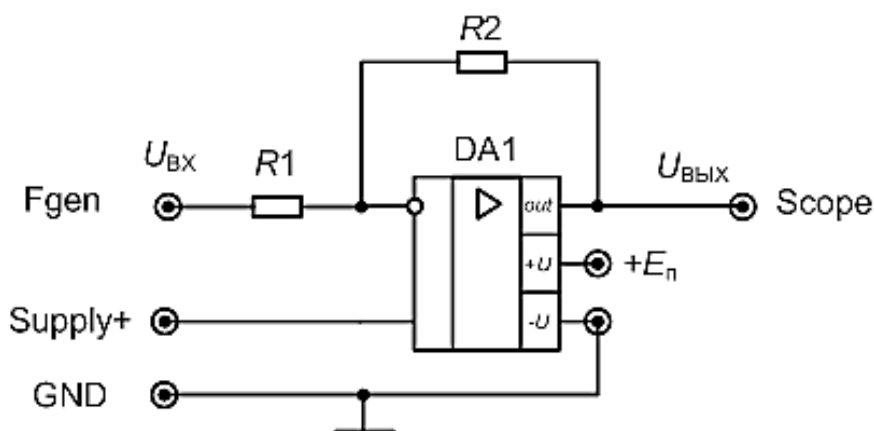


Рис. 3.62. Дифференциальный усилитель

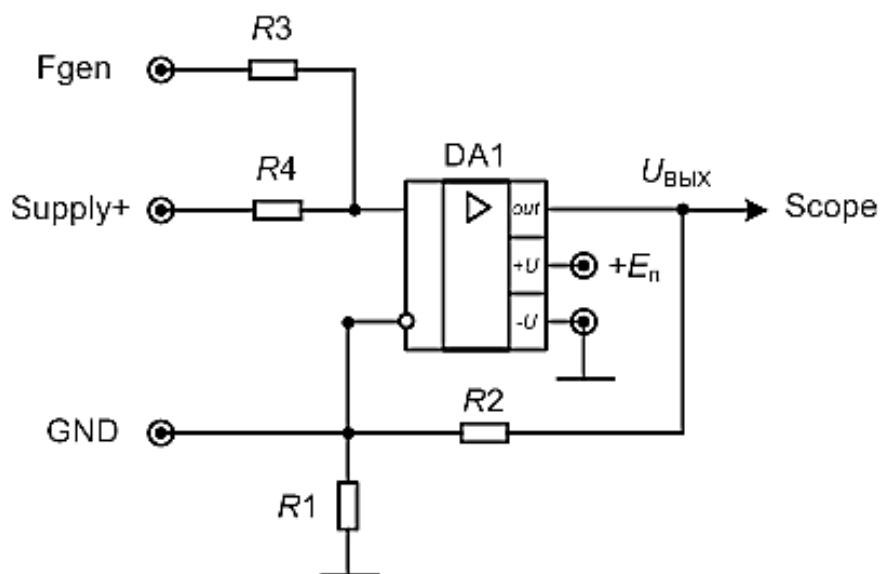


Рис. 3.63. Неинвертирующий сумматор

Схема на рис. 3.62 представляет собой дифференциальный усилитель, а на рис. 3.63 – неинвертирующий сумматор.

Приведенные на рис. 3.62 и 3.63 схемы при грамотном их использовании позволяют передавать знакопеременные входные напряжения на выход при линейном режиме работы ОУ, т. е. практически без искажений. Однако, как нетрудно заметить, в выходном напряжении может присутствовать постоянная составляющая, что не всегда желательно для пользователя.

3.2. Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель является второй базовой схемой усилителя на основе ОУ. Основное применение такого усилителя – построение усилителя со сравнительно большим входным сопротивлением и без инверсии входного напряжения.

Такие свойства неинвертирующего усилителя во многом обусловлены использованием последовательной ООС по напряжению. В отличие от инвертирующего включения рассматриваемый усилитель в типовом включении содержит три резистора (рис. 3.64), из которых $R3$ необходим для обеспечения режима работы входного каскада ОУ по постоянному току. Наличие $R3$ приводит к ограничению максимального входного сопротивления неинвертирующего усилителя: $R_{вх\text{ НИИ}} = R3$. Значение сопротивления $R3$ варьируется в пределах от десятков кОм до десятков МОм в зависимости от того, какие транзисторы – биполярные или полевые – используются во входных каскадах ОУ. Заметим, что при работе неинвертирующего усилителя в режиме усилителя постоянного тока от источника входного сигнала с гальванической связью нет необходимости

в установке сопротивления $R3$. Тогда входное сопротивление неинвертирующего усилителя определяется в основном синфазным входным сопротивлением Z_{CF} ОУ и может достигать величины порядка 10^{12} Ом и выше. Однако с увеличением частоты из-за частотной зависимости входной импеданс Z_{CF} неинвертирующего усилителя уменьшается.

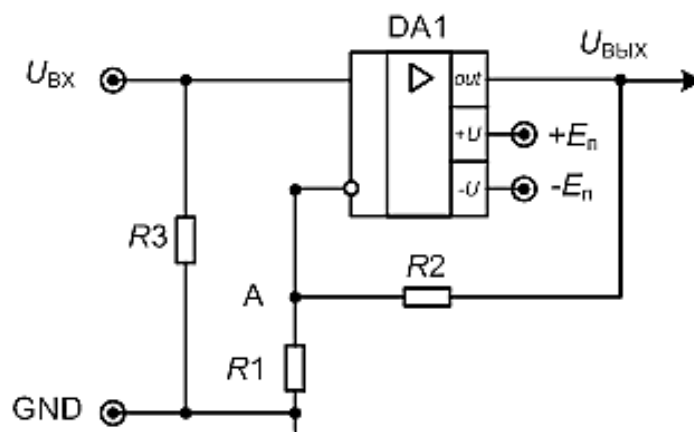


Рис. 3.64. Типовая схема неинвертирующего усилителя

Для получения выражения коэффициента усиления воспользуемся ранее изученными правилами. Согласно первому правилу $U_{вх} = U_A$. Из второго правила следует:

$$U_A = U_{вых} \cdot \frac{R1}{R1 + R2}.$$

Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{НИН} = U_{вых} / U_{вх} = 1 + \frac{R2}{R1}.$$

Как видно из выражения, на основе неинвертирующего включения ОУ нельзя выполнить операционный делитель. К тому же, в отличие от инвертирующего усилителя, в рассматриваемой схеме операционный усилитель работает с большой синфазной составляющей, равной входному сигналу. Это сужает функциональные возможности неинвертирующего ОУ.

Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя определяется аналогично как и для инвертирующего включения, так как в обоих случаях ООС по выходу – по напряжению.

На основе неинвертирующего усилителя можно выполнить повторитель напряжения. На рис. 3.65 представлен наиболее часто применяемый вариант усилителя с единичным коэффициентом усиления. В литературе он встречается под названием буферного усилителя, так как обладает изолирующими свойствами – большим входным импедансом и малым выходным.

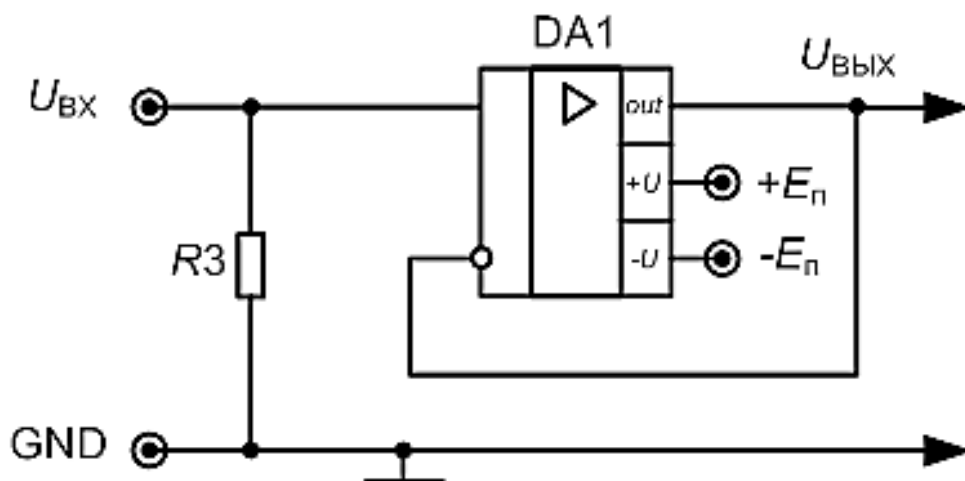


Рис. 3.65. Повторитель напряжения на ОУ

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации откройте панель комплекта виртуальных измерительных приборов.
- Осуществите вызов из меню «регулируемые источники питания» VPS (SUPPLY+ и SUPPLY-) и осциллограф Scope, установив ему режим открытого входа (DC).

4.2. Снятие амплитудных характеристик для схем инвертирующего включения ОУ

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.66 и реализующую функцию инвертора (в результате домашней подготовки Вы должны знать, какой резистор нужно использовать вместо R_2 , если вместо R_1 подключается $R_{12} = 10 \text{ кОм}$).
- Подключите вход схемы к источнику SUPPLY+, а выход к осциллографу.
- Изменяйте входное напряжение от 0 до 9 В через 1 В и получите массив данных части амплитудной характеристики.
- Подключите вход схемы к источнику SUPPLY- и изменяйте входное напряжение от 0 до -9 В через 1 В и получите другой массив данных части амплитудной характеристики. Используйте полученные данные для формирования таблицы в отчете и для построения характеристики.
- Соберите схему, изображенную на рис. 3.66 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 (какой резистор вместо R_2 нужно использовать, если вместо R_1 подключается $R_{12} = 10 \text{ кОм}$?).

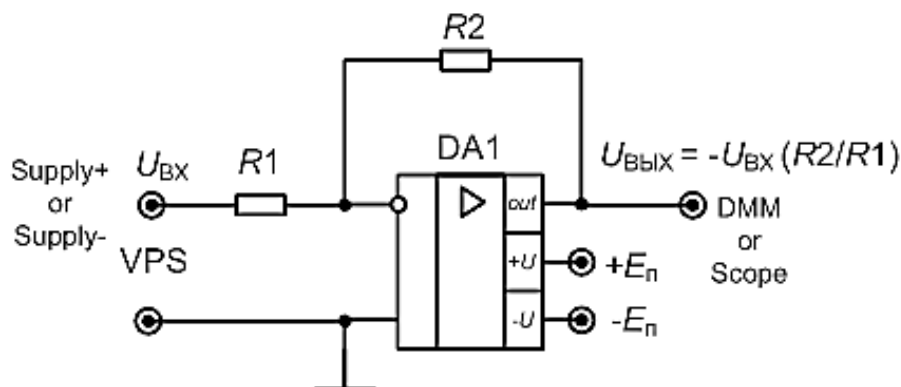


Рис. 3.66. Инверсное включение ОУ с двухполярными источниками питания

- Получите данные по вышеизложенной методике, предварительно скорректировав значения верхнего предела входного напряжения и его шаг изменения. Постройте амплитудную характеристику. Определите уровень входного напряжения, при котором начинается переход работы с линейного режима на нелинейный режим. Зафиксируйте полученные данные.

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.66 и реализующую схему операционного делителя напряжения с коэффициентом передачи $-0,1$ (какой резистор вместо $R2$ нужно использовать, если вместо $R1$ подключается $R12 = 10 \text{ кОм}$?).

- Получите данные по вышеизложенной методике, предварительно скорректировав значения верхнего предела входного напряжения и его шаг изменения. Постройте амплитудную характеристику.

- Сформируйте выводы относительно поведения амплитудных характеристик схем с различными значениями коэффициента усиления.

4.3. Экспериментальное подтверждение правила 1 о том, что входы ОУ эквипотенциальны

- Переставьте вход осциллографа в точку суммирования схемы – на инверсный вход ОУ. Измерьте напряжение. Сформулируйте вывод: на каком резисторе схемы выделяется входное напряжение, на каком выделяется выходное?

4.4. Определение максимального значения амплитуды выходного гармонического напряжения в усилителе с различными цепями питания

4.4.1. Усилитель с двухполярным питанием

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.67 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 . На выходах SUPPLY+ и SUPPLY- источников VPS установите одинаковые напряжения 9 В.

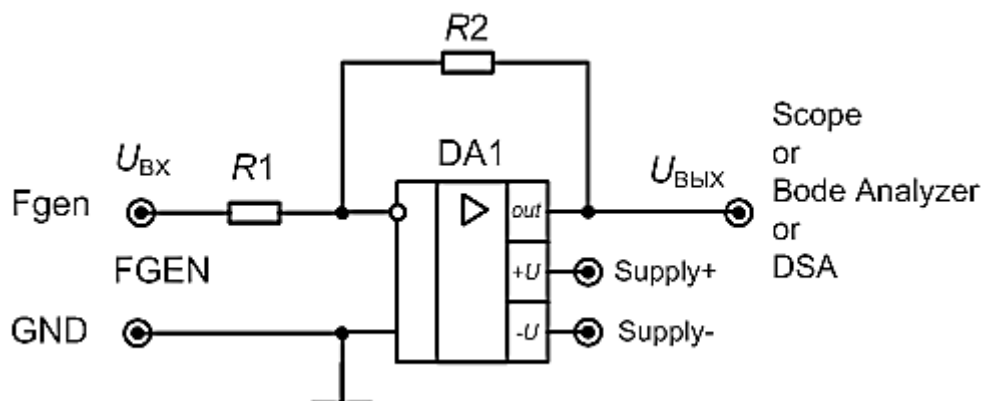


Рис. 3.67. Инвертирующее включение ОУ с двухполярными источниками питания от NI ELVIS: SUPPLY+ и SUPPLY-

- Осуществите вызов из меню генератора FGEN.
- Переведите генератор FGEN в режим выдачи гармонических сигналов с частотой 1 кГц. Установите нулевое смещение, используя управление по DC Offset.
- Изменяйте амплитуду входного напряжения (Amplitude) и, используя осциллограф с открытым входом, добейтесь получения максимальной амплитуды выходного сигнала, когда на нем не просматривается ограничение. Установите и зафиксируйте значения входного и выходного напряжений.
- Проверьте качество своей работы: насколько соответствуют значения входного и выходного сигналов, полученные в предыдущем пункте и в разделе 4.2. при снятии амплитудной характеристики усилителя. Сделайте выводы.
- Изменив напряжение питания ОУ SUPPLY+ с +9 до +5 В, проделайте два предыдущих пункта.
- Восстановите напряжение питания +9 В и измените напряжение питания ОУ SUPPLY- с –9 до –5 В. Повторите вышеизложенную методику эксперимента. Составьте общую таблицу, сформируйте выводы по зависимости максимальной амплитуды выходного напряжения от значений напряжений источников двухполярного питания.

4.4.2. Усилитель с однополярным питанием

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.68 и реализующую схему инвертора по входному сигналу, поступающему с выхода Fgen генератора FGEN (установите резисторы R12 и R27).
- Осуществите вызов из меню генератора FGEN. Переведите генератор FGEN в режим выдачи гармонических сигналов с частотой 1 кГц. Установите амплитуду напряжения, равную нулю. Установите нулевое смещение, используя управление по DC Offset.

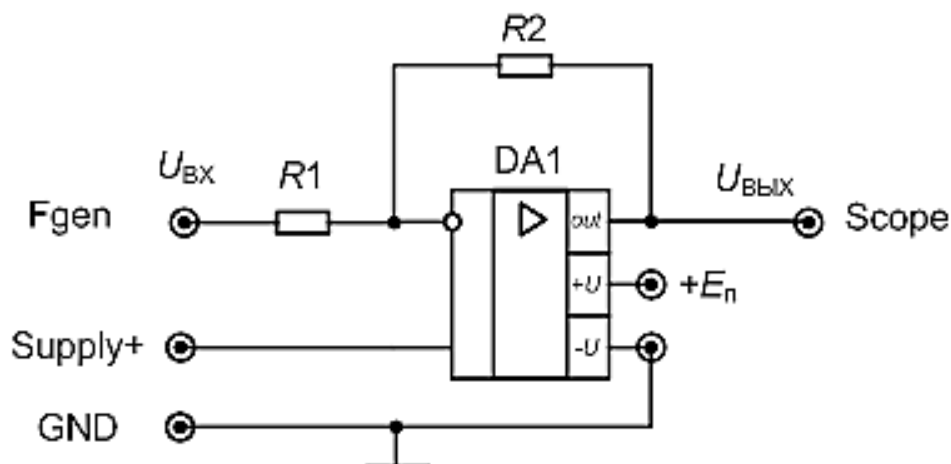


Рис. 3.68. Инвертирующее включение ОУ с однополярным питанием

- Рассчитайте (дома) коэффициент передачи напряжения смещения, поступающего с выхода SUPPLY+ регулируемого источника VPS на неинвертирующий вход ОУ при линейном режиме его работы. Вызовите из меню регулируемый источник VPS. Установите на выходе SUPPLY+ напряжение смещения, обеспечивающее на выходе ОУ напряжение, равное половине напряжения источника питания, при нулевом сигнале Fgen.
- Вызовите из меню осциллограф в режиме открытого входа. Просмотрите и измерьте значение напряжения на выходе ОУ. Соответствует ли оно ожидаемому значению?
- Изменяйте амплитуду входного напряжения и добейтесь получения максимальной амплитуды выходного сигнала, когда на нем не просматривается ограничение. Измерьте и зафиксируйте значения входного и выходного напряжений. Соответствуют ли они ожидаемым значениям?
- Начните изменять напряжение смещения, или используя управление по DC Offset генератора, или управляя напряжением SUPPLY+ регулируемого источника VPS. Зафиксируйте изменения постоянной составляющей выходного сигнала ОУ и появление возможных ограничений гармонического сигнала на его выходе. Разберитесь в исследуемых процессах и зафиксируйте полученные данные. Сделайте выводы.

4.5. Исследование АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ

4.5.1. Усилитель

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.69 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 . Вызовите из меню источника VPS и установите напряжения источников питания для ОУ: SUPPLY+ = +9 В, SUPPLY- = -9 В.

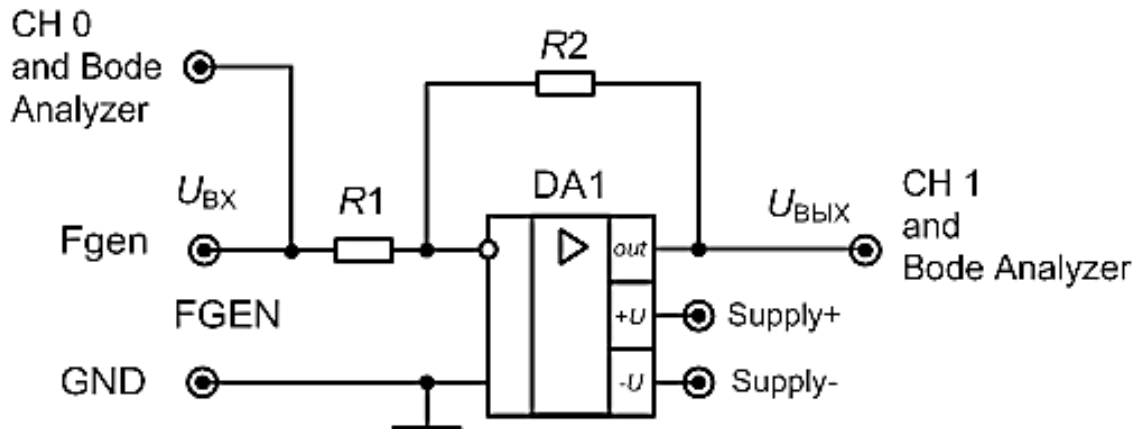


Рис. 3.69. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ

- Вызовите из меню NI ELVIS анализатор Боде и установите начальное значение частоты 100 Гц, конечное значение частоты 35 кГц и число шагов за декаду изменения частоты, равное 5.
- Выберите на основании ранее проведенного эксперимента по исследованию амплитудной характеристики усилителя амплитуду входного сигнала, обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот. Установите ее на лицевой панели анализатора Боде.
- Запустите программу кнопкой запуска Run, получите характеристики. При необходимости получения значений коэффициентов усиления или фазового сдвига каскада на разных частотах используйте Cursors. Сохранение результатов осуществляйте кнопкой Log на виртуальной панели Bode Analyzer. Сохраните данные и графики для отчета.

4.5.2. Инвертор

- Переберите схему, изображенную на рис. 3.69, чтобы она реализовала схему инвертора.
- Уточните амплитуду входного сигнала, которую нужно установить на выходе Fgen на виртуальной панели Bode Analyzer, чтобы обеспечить линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот.
- Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

4.5.3. Делитель

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.69, чтобы она реализовала схему операционного делителя напряжения с коэффициентом передачи $-0,1$.
- Уточните амплитуду входного сигнала, которую нужно установить на выходе Fgen на виртуальной панели Bode Analyzer, чтобы обеспечить линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот.

- Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.
- По данному разделу исследований сделайте выводы.

4.6. Исследование АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.70 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи +11. Выберите значения резисторов в цепи обратной связи.

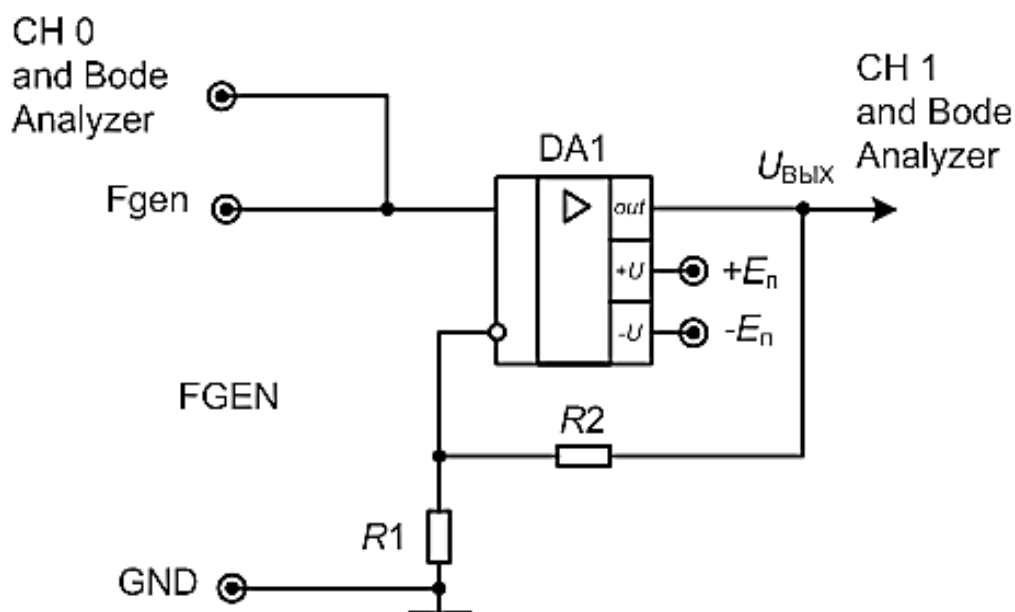


Рис. 3.70. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

- Уточните амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе Fgen и обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот, и среднеквадратическое значение выходного напряжения, близкое к одному вольту.
- Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.
- Уточните амплитуду входного сигнала, получаемую на выходе Fgen и обеспечивающую линейный режим работы ОУ во всей полосе рабочих частот, и среднеквадратическое значение выходного напряжения, близкое к одному вольту.
- Запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.
- Переберите схему, изображенную на рис. 3.70 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи +2.
- Уточните амплитуду входного сигнала, запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.

- Переберите схему, изображенную на рис. 3.70 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи $+1,1$.
- Уточните амплитуду входного сигнала, запустите программу исследования, а затем сохраните массив данных и графики.
- Сформируйте выводы по проведенным экспериментам.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Как определить верхнюю границу частотного диапазона инвертирующего усилителя?
- 5.2. Каким образом можно измерить и уменьшить напряжение смещения усилителя?
- 5.3. Приведите и поясните схему эксперимента для доказательства инверсии переменного сигнала усилителя с помощью осциллографа.
- 5.4. Какие параметры усилителя изменятся, если уменьшить напряжение питания?
- 5.5. Сравните выходное сопротивление на постоянном токе усилителя, инвертора и делителя.
- 5.6. Как определить верхнюю границу частотного диапазона неинвертирующего усилителя?
- 5.7. Приведите и поясните схему эксперимента для доказательства неинвертирующего свойства усилителя переменного сигнала.
- 5.8. Сравните входное и выходное сопротивления неинвертирующего усилителя и повторителя.
- 5.9. Приведите схему исследования и поясните алгоритм получения амплитудной характеристики схемы на ОУ.

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты измерений (таблицы, графики) и заключения по ним;
- выводы.

Модуль 4. Схемы на операционных усилителях

Лабораторная работа № 4.2

Функциональное применение операционных усилителей (линейные преобразования сигналов)

1. Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде NI ELVIS характеристик и параметров схем на ОУ, обеспечивающие различные линейные преобразования входных сигналов.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования линейных схем с ОУ с использованием функционального генератора (FGEN), анализатора Боде (Bode Analyzer) и осциллографа (Scope);
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

Типовые схемы включения операционных усилителей обычно демонстрируют линейные преобразования сигналов, связанные с масштабированием выходного напряжения относительно входного. При этом в зависимости от схемы включения ОУ (инвертирующее, неинвертирующее) коэффициент передачи схемы по напряжению может быть как положительным, так и отрицательным.

Умножение входного сигнала на константу не является единственным представителем среди линейных преобразований сигналов. В различных областях аналоговой электроники широко востребованы и другие линейные преобразования. Такие, например, как суммирование и вычитание, интегрирование и дифференцирование, фильтрация (фильтры нижних, верхних частот, полосовые), преобразования напряжение–ток и ток–напряжение и т. д. В лабораторной работе Вы можете провести исследование схем с различными линейными преобразованиями.

3.1. Сумматор на ОУ

Схема суммирования двух входных сигналов изображена на рис. 3.71.

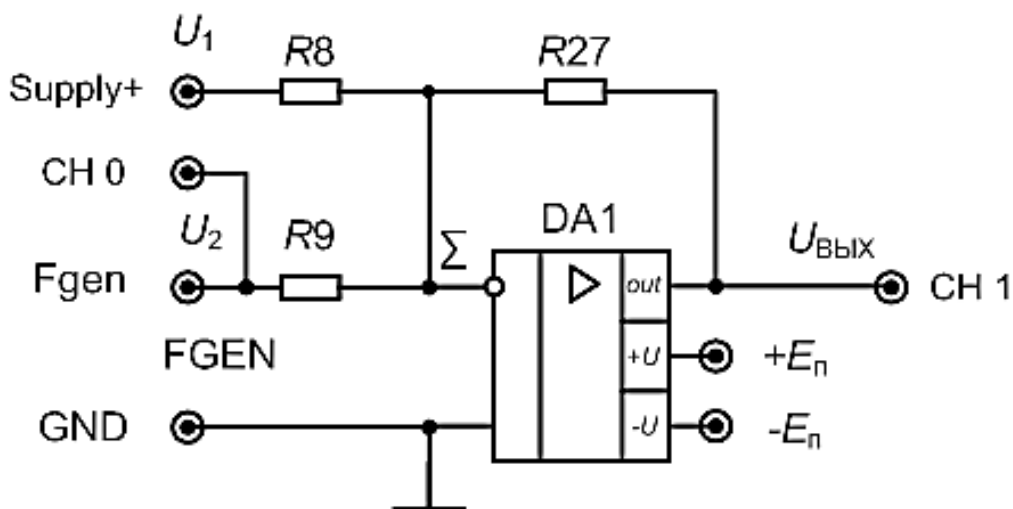


Рис. 3.71. Сумматор на операционном усилителе

Так как входы ОУ, работающего в линейном режиме, эквипотенциальны, то точка суммирования Σ (инвертирующий вход ОУ) находится практически под нулевым потенциалом («квазиземля»). Тогда напряжение U_1 выделяется на сопротивлении $R8$, а напряжение U_2 падает на $R9$, и каждое из напряжений и сопротивлений по закону Ома задает свой ток, который по первому закону Кирхгофа суммируется и создает выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ (со знаком минус) на сопротивлении $R27$. Другими словами, выходное напряжение равно:

$$U_{\text{вых}} = \left(-\frac{R27}{R8}\right) \cdot U_1 + \left(-\frac{R27}{R9}\right) \cdot U_2.$$

Как видим в идеальном случае, коэффициенты передачи по каждому из входных напряжений можно независимо изменять, включая вместо сопротивлений $R8$ и $R9$ сопротивления других номиналов.

Одновременно изменить коэффициенты усиления по обоим входам можно, если вместо $R27$ включить другое сопротивление.

В приведенной схеме амплитуда и частота гармонического сигнала U_2 задается генератором FGен, а U_1 – напряжение постоянного тока – задается VPS (Supply+).

3.2. Интегратор на ОУ

Простая схема интегратора на одном операционном усилителе изображена на рис. 3.72.

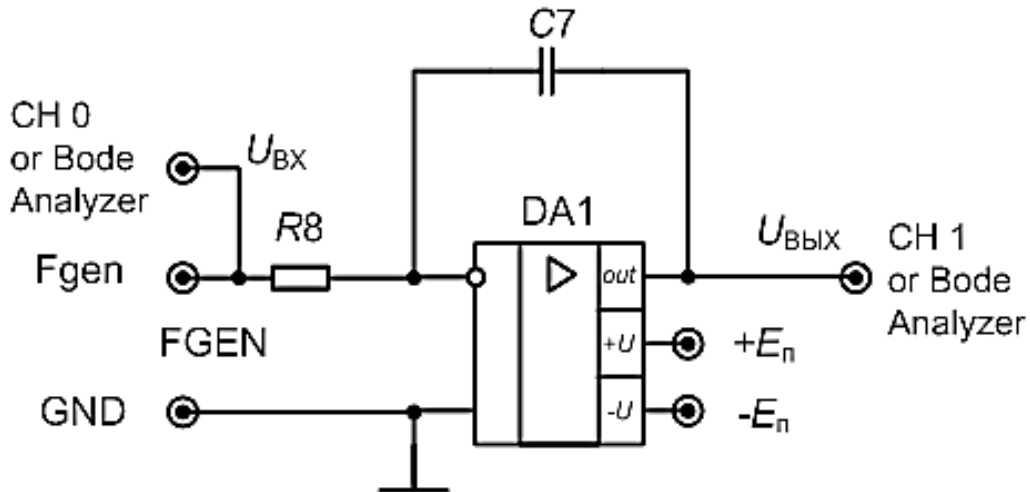


Рис. 3.72. Интегратор на инвертирующем ОУ

При работе идеализированного ОУ в линейном режиме его входы эквипотенциальны, а точка суммирования – «квазиземля». Поэтому весь ток, протекающий через резистор, течет и по емкости, создавая со знаком «минус» выходное напряжение. Тогда:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{C7} \cdot \int \left(\frac{U_{\text{ВХ}}(t)}{R8} \right) \cdot dt = -\frac{1}{\tau} \cdot \int U_{\text{ВХ}}(t) \cdot dt,$$

где $\tau = R8 \cdot C7$ – постоянная времени.

Если учесть конечное значение коэффициента усиления реального ОУ, то можно обнаружить, что качество интегрирования будет улучшаться, когда уменьшается время интегрирования.

Проводя частотный анализ схемы, получаем для идеального усилителя выражение для модуля коэффициента передачи по напряжению (АЧХ):

$$K(\omega) = \frac{\omega_0}{\omega},$$

где ω_0 – частота «квазирезонанса», при которой $K(\omega_0) = 1$, а $\omega_0 = 1/\tau$.

Как видно из выражения для АЧХ, интегратор обладает свойствами фильтра нижних частот, у которого после частоты «квазирезонанса» усиление падает с повышением частоты со скоростью 20 дБ на декаду. Что касается ФЧХ, то для идеализированного интегратора сдвиг между входным и выходным напряжениями составляет 90° , т. е. оба сигнала находятся в квадратуре.

Если учесть конечное значение коэффициента усиления реального ОУ, то приведенная схема вообще-то является фильтром нижних частот первого порядка и асимптотически приходит к функции интегрирования на частотах, многократно превышающих частоту среза.

Ввиду того, что в приведенной схеме интегратора для стабилизации режима отсутствует отрицательная обратная связь по постоянному току, то при исследованиях одиночной схемы такая связь искусственно вводится за счет шунтирования емкости $C7$ цепью, состоящей из последовательно соединенных сопротивлений $R9, R14, R10$.

При экспериментальных исследованиях схемы убедиться в том, что она выполняет функцию интегрирования, можно различными способами, учитывающими вышеперечисленные свойства линейного преобразования.

Можно, например:

- подать на вход последовательность прямоугольных импульсов разной полярности и, сохраняя линейный режим работы ОУ, убедиться, используя генератор FGEN и осциллограф Scope, что на выходе получаются треугольные импульсы;
- подать синусоидальный сигнал на частоте ω_0 , по осциллографу измерить фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами, который должен быть $\approx 90^\circ$;
- исследовать АЧХ схемы на частотах, превышающих частоту среза, и убедиться, что имеет место обратно пропорциональная зависимость модуля усиления от частоты. С этой целью полезно привлечь или анализатор Боде, или генератор и осциллограф, в том числе в режиме вариации частоты (Frequency Sweep);
- исследовать ФЧХ схемы на частотах, превышающих частоту среза, и найти значения фазового сдвига с помощью анализатора Боде.

3.3. Активные фильтры на ОУ

Электрическими фильтрами являются устройства, предназначенные для выделения из сигналов составляющих одних частот (полоса прозрачности фильтра) и подавления других (полоса непрозрачности).

3.3.1. Фильтр нижних частот первого порядка

Фильтры нижних частот пропускают на выход сигналы на частотах ниже частоты среза и имеют зону непрозрачности на частотах, ее превышающих. Таким образом, они выделяют из всего диапазона частот только низшие составляющие.

Схема фильтра нижних частот (ФНЧ) первого порядка на инвертирующем усилителе приведена на рис. 3.73.

Используя идеализированную модель ОУ, определяем комплексный коэффициент передачи фильтра по напряжению

$$K(j\omega) = \frac{K(0)}{(1 + j\omega\tau)},$$

где $K(0) = -\frac{R27}{R12}$ – передача схемы на постоянном токе, а $\tau = R12 \cdot C7$ – постоянная времени цепи. Тогда для АЧХ получим:

$$|\dot{K}| = K(0) / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2},$$

а для ФЧХ:

$$\varphi_K = 180^\circ - \arctg(\omega\tau).$$

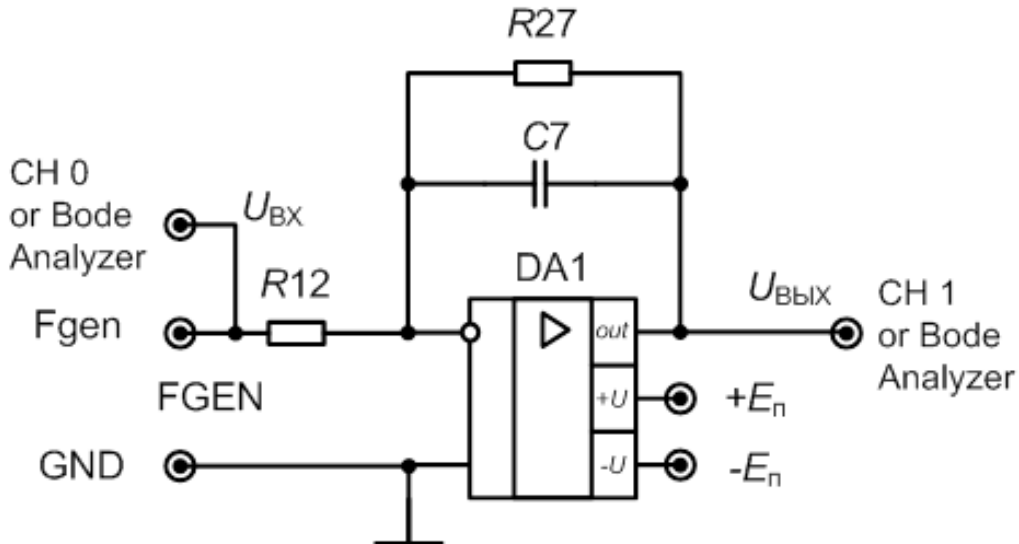


Рис. 3.73. Фильтр нижних частот первого порядка

Известно, что для цепей ФНЧ первого порядка полезно использовать понятие частоты среза, т. е. частоты, на которой модуль коэффициента передачи уменьшается в корень из двух раз по сравнению с $K(0)$ или на 3 децибела, если усиление на постоянном токе выражено в децибелах.

Тогда частота среза $\omega_{\text{ср}} = (1/\tau)$ и при фиксированном значении емкости может изменяться сопротивлением, включенным ей параллельно. При таком подходе независимое изменение усиления на постоянном токе реализуется установкой резистора другого номинала, чем у $R12$. Правда, тогда будет изменяться входное сопротивление схемы.

Из приведенного выражения для АЧХ видно, что на частотах, значительно превышающих частоту среза, затухание усиления происходит со скоростью 20 дБ на декаду. Таким образом, такие (относительно высокочастотные) составляющие спектра входного сигнала будут давиться на выходе тем больше, чем больше они превышают частоту среза. Для получения большего эффекта частоту среза нужно уменьшить, увеличивая постоянную времени, например, за счет увеличения сопротивления резистора. Однако при этом возникает противоречие – возрастает инерционность работы ФНЧ.

Анализ поведения схемы в частотной области можно осуществить, используя генератор и осциллограф, в том числе в режиме «сweepинга» частоты сигналов, а также применяя анализатор Боде.

Изменение показателей спектрального состава входного и выходного сигналов можно пронаблюдать, вызвав из меню NI ELVIS анализатор DSA и подавая на вход схемы сигналы прямоугольной или треугольной форм с FGEN. Происходящие при этом изменения формы выходного сигнала относительно входного можно пронаблюдать там же или на осциллографе.

3.3.2. Фильтр верхних частот первого порядка

В отличие от ФНЧ фильтр верхних частот (ФВЧ) выделяет из спектра входного сигнала его высшие составляющие, т. е. зона прозрачности ФВЧ простирается на частотах, превышающих частоту среза. Большинство схем активных ФВЧ используют глубокие ОС с применением определенного вида частотно зависимых цепей, которыми охвачен ОУ.

В лабораторном цикле, на базе дифференцирующей RC-цепи и повторителя напряжения на ОУ исследуется простая схема ФВЧ первого порядка, которая приведена на рис. 3.74.

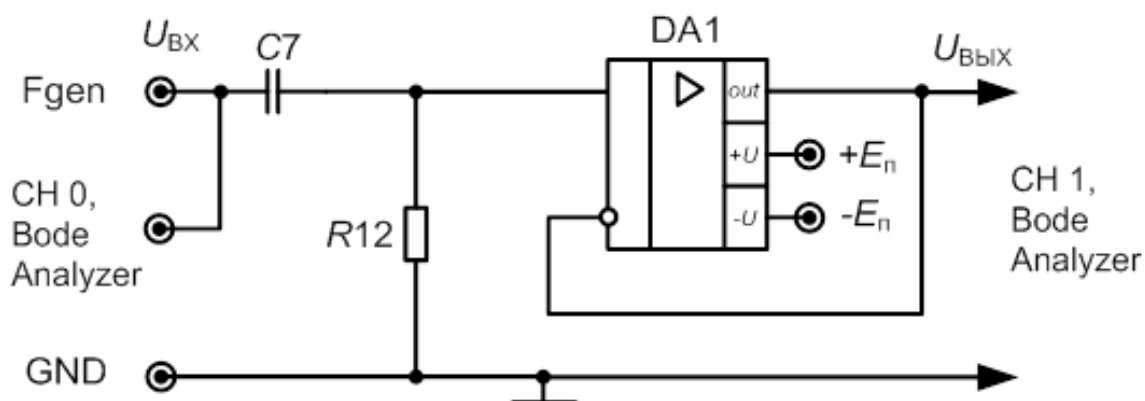


Рис. 3.74. Фильтр верхних частот первого порядка

Считая, что коэффициент усиления по напряжению повторителя равен единице, имеем следующее выражение для комплексной передачи схемы:

$$K(j\omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot \tau}{(1 + j \cdot \omega \cdot \tau)},$$

где $\tau = R12 \cdot C7$ – постоянная времени RC-цепи.

Тогда для АЧХ имеем:

$$|\dot{K}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau)^2}}},$$

а для ФЧХ:

$$\varphi_K = \arctg(1/\omega\tau).$$

Вводя также частоту среза $\omega_{\text{ср}} = 1/\tau$, понимаем, что на частотах, много меньших частоты среза, имеет место зона непрозрачности фильтра, когда на АЧХ наблюдается участок со скоростью спада усиления 20 дБ на декаду. С другой стороны, в области прозрачности ФВЧ его передача асимптотически приближается к единице.

В данной схеме фазовый сдвиг является опережающим и на частотах, стремящихся к нулю, достигает предельного значения $+90^\circ$.

Исследование указанных характеристик ФВЧ можно провести, используя анализатор Боде, а качественный просмотр возникающих изменений при изменениях частоты сигнала реализуется на осциллографе при «сви́пировании» частоты генератора FGEN.

3.4. Избирательный усилитель на цепи Вина

Активные фильтры, на выходе которых выделяются частоты спектра входного сигнала в полосе частот, расположенные между их нижними и верхними значениями, обычно называются полосовыми. В радиотехнической литературе схемы усилителей, реализующих подобные свойства, часто называются избирательными. В полосе пропускания таких усилителей усиление обычно изменяется незначительно, как правило, в пределах трех децибел. Для избирательных усилителей высокой добротности полоса их пропускания мала относительно центральной частоты зоны прозрачности – частоты резонанса для *LC*-структур или «квазирезонанса» для *RC*-реализаций.

Первое наименование отражает способы построения избирательных усилителей за счет использования избирательных нагрузок, как правило, в виде различных колебательных систем (например, параллельных контуров) высокой добротности.

К сожалению, резко нарастающие габариты *LC*-систем не позволяют их эффективно использовать при снижении резонансной частоты. Возникает необходимость замены используемого для этих целей базиса: вместо *LC*-цепей нужно применить *RC*-цепи. Однако пассивные *RC*-цепи принципиально обладают добротностью меньше единицы. Этот факт не позволяет применять такие цепи как нагрузки усилительных элементов или усилителей, т. е. реализовать такой же принцип, который

используется для LC -нагрузок. Реализация высокодобротного избирательного усилителя RC -типа может осуществляться за счет введения в широкополосный усилитель частотно зависимой обратной связи.

В избирательных усилителях с положительной обратной связью используются RC -цепи, имеющие на частоте «квазирезонанса» нулевой фазовый сдвиг и максимальный коэффициент передачи по напряжению. В этом случае любая такая цепь имеет комплексный коэффициент передачи

$$\dot{A} = \frac{A_0}{1 + j \cdot Q \cdot Y},$$

где A_0 – коэффициент передачи на частоте «квазирезонанса» ω_0 ; Q – добротность цепи; $Y = (\omega/\omega_0) - (\omega_0/\omega)$ – относительная расстройка.

К таким цепям относится цепь Вина (Γ -образный четырехполюсник), на базе которой и построен избирательный усилитель, изображенный на рис. 3.75. В приведенной цепи Вина сопротивления $R33 = R36 = R$, а $C16 = C14 = C$. Обозначив через Z_1 – сопротивление последовательной части, а через Z_2 – сопротивление параллельной части цепи, получите коэффициент ее передачи по напряжению как отношение напряжения на неинвертирующем входе ОУ к выходному напряжению усилителя.

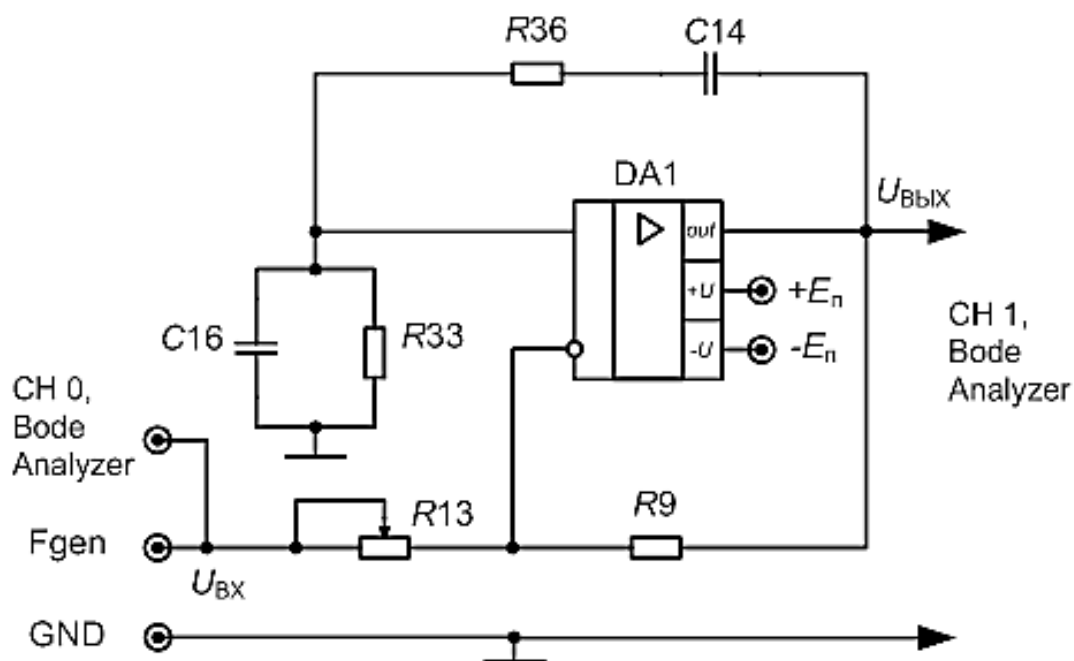


Рис. 3.75. Избирательный усилитель с Γ -образной RC -цепью

Введите понятие постоянной времени ($\tau = RC$) и определите частоту «квазирезонанса», на которой коэффициент передачи цепи вещественен. Модуль коэффициента передачи цепи на этой частоте $A_0 = 1/3$, фазовый сдвиг равен нулю, а ее добротность Q также равна $1/3$.

Итак, сама цепь Вина обладает малой избирательностью и имеет «тупой» резонанс из-за чрезвычайно низкой добротности. Как отмечалось выше, чтобы повысить эквивалентную добротность избирательного усилителя на цепях подобного вида, их необходимо включить в цепь положительной ОС операционного усилителя.

Однако в этом случае легко потерять устойчивость его работы, так как при выполнении условий возникновения колебаний схема становится автогенератором. Эти условия известны. Первое условие – это баланс фаз, когда при наличии двух обратных связей в схеме превалирует вещественная положительная обратная связь с нулевым фазовым набегом по петле обратной связи на частоте «квазирезонанса». Это условие необходимое, но не достаточное. Чтобы исследуемая схема потеряла устойчивость и превратилась в автогенератор, одновременно необходимо, чтобы усиление по петле этой обратной связи превышало единицу. Попытаемся определить петлевое усиление для схемы избирательного усилителя на рис. 3.75.

Для напряжения на неинвертирующем входе усиление с введенной отрицательной обратной связью равно $K_{\text{НИН}} = 1 + R9 / R13$. Тогда петлевое усиление на частоте «квазирезонанса» $T = K_{\text{НИН}} \cdot A_0 > 1$ будет тогда, когда $R9 > 2 \cdot R13$. При положении движка потенциометра $R13$, реализующего такое условие, схема усилителя станет автогенератором, и на ее выходе формируется периодический сигнал, даже если напряжение, подаваемое с генератора, равно нулю. Необходимо также понимать, что в приведенных расчетах к значению сопротивления $R13$ нужно добавлять внутреннее сопротивление генератора FGEN порядка 50 Ом.

Таким образом, чтобы исследовать схему в режиме избирательного усилителя, необходимо изменить положение движка потенциометра так, чтобы $R9 < 2 \cdot R13$. И чем ближе Вы подойдете к равенству указанного выражения, тем больше будет значение эквивалентной добротности у схемы избирательного усилителя. Действительно, если операционный усилитель работает в линейном режиме, то его входы эквипотенциальны. Рассчитав напряжения на инвертирующем и на неинвертирующем входах ОУ и приравняв их между собой, можно получить:

$$\gamma \cdot U_{\text{вх}} + \beta \cdot U_{\text{вых}} = \dot{A} \cdot U_{\text{вых}},$$

где $\gamma = R9 / (R13 + R9)$ – коэффициент передачи входного напряжения на инвертирующий вход ОУ в режиме короткого замыкания его выхода, а $\beta = R13 / (R9 + R13)$ – коэффициент отрицательной обратной связи, т. е. передача выходного напряжения на инвертирующий вход ОУ при коротком замыкании входа избирательного усилителя.

Приведя выражение для комплексного коэффициента передачи избирательного усилителя к вышеобозначенному виду для избирательной цепи, находим, что эквивалентная добротность ИУ равна:

$$Q_{\Sigma} = \frac{\beta \cdot Q}{(\beta - A_0)} = \frac{1}{(2 - R9 / R13)}.$$

Так, если установить значение $R13$ такое, что $R9 = 1,9 \cdot R13$, то эквивалентная добротность избирательного усилителя составит 10.

3.5. Преобразователь напряжения в ток

Речь идет о преобразователях, являющихся по выходу стабилизаторами тока, когда ток в нагрузке не зависел бы от изменяющегося ее сопротивления. В случае использования для этих целей операционных усилителей с глубокими обратными связями реализуются такие их виды, которые приводят к повышению выходного сопротивления схемы, т. е. ведут выход преобразователя к генератору тока.

Наиболее просто реализовать генератор тока, управляемый входным, стабильным напряжением, для незаземленной нагрузки. Схема такого преобразователя напряжение–ток с глубокой параллельной ООС по току приведена на рис. 3.76.

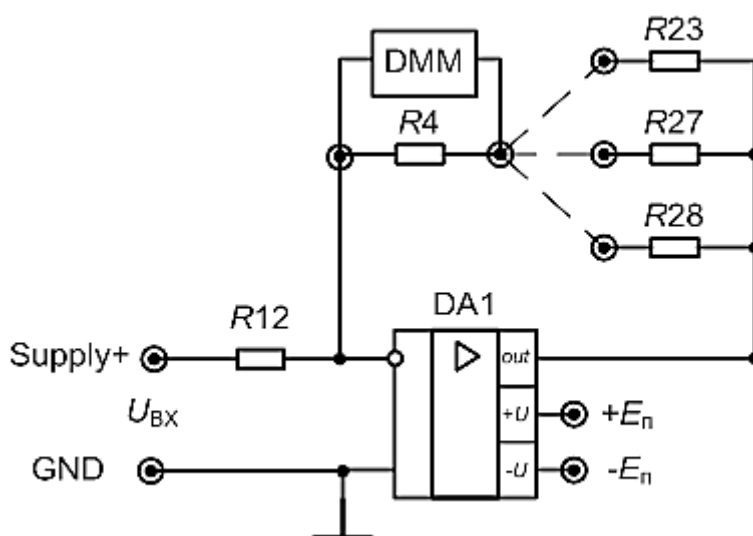


Рис. 3.76. Преобразователь напряжения в ток. Пунктир означает, что при исследованиях схемы сопротивление нагрузки, представленное резисторами $R23$, $R27$, $R28$, может меняться

При работе ОУ в линейном режиме его входы эквипотенциальны. Последнее утверждение означает, что весь ток, задаваемый входным напряжением и сопротивлением $R12$, протекает через нагрузки $R23$, или $R27$, или $R28$.

Таким образом, для идеализированного ОУ ток нагрузки определяется как $I_H = U_{\text{вх}} / R_{12}$ и не зависит от сопротивления нагрузки, что означает реализацию по выходу схемы генератора тока. При анализе такой схемы необходимо сохранять линейный режим работы на амплитудной характеристике ОУ для всех обозначенных выше нагрузок и принятого значения входного напряжения $U_{\text{вх}}$ (Supply+).

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации программы откройте панель комплекта измерительных приборов.

4.2. Исследование схемы сумматора

- Вызовите из меню регулируемые источники питания VPS (SUPPLY+ и SUPPLY-), генератор FGEN и осциллограф Scope, установив ему режим открытого входа.
- Соберите схему сумматора, изображенную на рис. 3.71, изменив в ней сопротивления так, чтобы реализовать уравнение:

$$U_{\text{вых}} = (-5 \cdot U_1) - (10 \cdot U_{2\text{м}} \cdot \sin(\omega t)).$$

- Предварительно определите предельные значения амплитуды гармонического сигнала $U_{2\text{м}}$, которые при разных значениях U_1 еще гарантируют линейный режим работы сумматора. Выполняя расчеты, используйте данные, полученные ранее при снятии амплитудной характеристики в лабораторной работе «Типовые схемы включения операционного усилителя». Расчеты провести для следующих значений U_1 : +1,0 В; +0,5 В; +0,0 В; -1,0 В; -0,5 В. Данные свести в таблицу.

- Установите у генератора частоту гармонического сигнала 1 кГц с нулевым напряжением смещения. Поставьте напряжение Supply+, равное +1,0 В. Последовательно с выбранным шагом увеличивая амплитуду переменного напряжения до рассчитанного предельного значения, просматривайте, как работает сумматор, и с помощью курсора измеряйте на выходном напряжении его максимальное отрицательное значение. Исследование заканчивайте при появлении отсечки на выходном напряжении. Сравните полученное значение с полученным ранее при предварительных расчетах. Сделайте выводы.

- Повторите предыдущий пункт для других значений напряжения U_1 .
- Соберите сумматор, на выходе которого получается напряжение:

$$U_{\text{вых}} = 2 - 3 \cdot \sin(\omega t).$$

Подтвердите работу схемы экспериментально.

- Используя возможности генератора, исследуйте схему сумматора, у которого при $U_1 = +3$ В и $U_{2m} = 2$ В любое мгновенное значение выходного напряжения положительно. Какое уравнение выходного напряжения у Вас получилось?

4.3. Исследование интегратора на инвертирующем ОУ

- Вызовите из меню генератор FGЕН и осциллограф Scope, установив ему режим открытого входа.

- Соберите схему интегратора, изображенную на рис. 3.72.

Определите частоту квазирезонанса, определяемую значениями сопротивления $R8$ и емкости $C7$.

- Установите частоту, близкую к рассчитанному значению. Переключите FGЕН на генерацию последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой 2,5 В с нулевым напряжением DC Offset. Просмотрите на осциллографе входное и выходное напряжения схемы. Зафиксируйте осциллограммы и объясните, почему выходное напряжение имеет треугольную форму.

- Измерьте с помощью курсора наименьшее и наибольшее значения выходного напряжения на его нарастающем участке, а также временной интервал его нарастания. Установите скорость нарастания напряжения. Выясните, чем она определяется, исходя из аналитической зависимости для выходного напряжения интегратора.

- Проведите дополнительные исследования, чтобы доказать правильность Ваших выводов относительно скорости нарастания, изменяя амплитуду выходных импульсов с генератора FGЕН (3 значения) или изменяя значение сопротивления интегратора (включайте вместо $R8$ сопротивление $R9$, а затем $R4$), оставаясь в линейном режиме работы ОУ. Зафиксируйте временные диаграммы сигналов. Экспериментальные данные по скорости нарастания сведите в таблицу. Сличите теоретические и экспериментальные данные. Сделайте выводы.

- Переключите генератор в режим генерации гармонического напряжения, поставив его в режим Frequency Sweep при тех же параметрах: стартовая частота – частота «квазирезонанса» (ω_0); конечная частота – частота в пять раз большая частоты «квазирезонанса»; шаг – частота «квазирезонанса».

- Запустите генератор и удостоверьтесь, что Вы понимаете, как работает схема интегратора при его частотном анализе. Прокомментируйте в отчете эту часть эксперимента относительно закона изменения АЧХ и значения фазового сдвига в условиях, когда частота сигнала изменяется на декаду, начиная с частоты квазирезонанса.

- Переведите генератор в обычный режим генерации гармонического сигнала и, начиная с частоты «квазирезонанса» с шагом, равным этой частоте, измеряйте с помощью осциллографа значения выходного напряжения, рассчитывайте коэффициент передачи и определяйте фазовый сдвиг между сигналами (Score по СН 1 поставьте в режим AC). Другими словами, готовьте данные для построения АЧХ и ФЧХ интегратора в декадном частотном диапазоне. Совпадают ли полученные Вами данные с прогнозируемыми? Сделайте выводы по результатам эксперимента.

4.4. Исследование схемы ФНЧ первого порядка

- Вызовите из меню генератор FGEN и осциллограф Score, установив ему режим открытого входа.

- Соберите схему фильтра, изображенную на рис. 3.73, изменив ее путем включения вместо $R27$ другого резистора в цепи обратной связи так, чтобы $K(0) = -10$.

- Определите частоту среза собранного ФНЧ. Данные о частоте среза и усилении на постоянном токе используйте для грамотной установки параметров (амплитуды и частоты), определяющих работу генератора, а в дальнейшем и анализатора Боде при сохранении линейного режима операционного усилителя. Для этого ориентируйтесь на ранее полученные данные по его амплитудной характеристике.

- Установите на виртуальной панели генератора амплитуду гармонического напряжения, близкую к максимально возможной, которая гарантирует линейный режим работы ОУ даже на самой низкой частоте сигнала с генератора.

- Подготовьтесь к работе генератора в режиме сканирования частоты сигнала в заданных пределах и с указанным шагом (режим Frequency Sweep). Установите начальную частоту порядка двух трети от частоты среза, конечную частоту порядка $10 \cdot f_{\text{ср}}$, а шаг порядка $f_{\text{ср}}$. Кнопкой «Sweep» запустите режим «сweepинга» частоты и убедитесь в правильности работы схемы фильтра.

- Перейдите к режиму исследования АЧХ и ФЧХ с привлечением анализатора Боде. Вызовите из меню анализатор Боде.

- На виртуальной панели анализатора установите прежние значения частот, а число шагов за декаду поставьте 5 или 10.

- При использовании, например, режима Default по Y-Scale в интересах исследуемой схемы измените масштабы по осям АЧХ и ФЧХ, используя предварительные наработки по значениям: $K(0)$ в дБ, $\varphi(0)$ в градусах, а также значений модуля коэффициента передачи и фазы φ на частоте $10 \cdot f_{\text{ср}}$. На обеих характеристиках измените также частотный масштаб: слева 10 Гц, справа 1000 Гц.

- Запустите в работу анализатор, сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ.

4.5. Исследование схемы ФВЧ первого порядка

- Соберите схему фильтра, изображенную на рис. 3.74.
- Установите на виртуальной панели генератора амплитуду гармонического напряжения, равную 2,5 В.
- Определите частоту среза собранной схемы ФВЧ.
- На виртуальной панели анализатора установите начальную частоту, приблизительно равную $0,1 \cdot f_{\text{ср}}$, конечную частоту 10 Гц и число шагов 5–10. На обеих характеристиках измените частотный масштаб: слева 10 Гц, справа 10 000 Гц. Задайте автоматический режим работы по Y-Scale.
- Запустите в работу анализатор, сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ.

4.6. Исследование избирательного усилителя с цепью Вина

- Вызовите из меню генератор FGEN и осциллограф Scope, установив ему режим открытого входа.
- Проведите предварительно анализ цепи Вина. Определите частоту «квазирезонанса» RC -цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте «квазирезонанса». Теоретически определите добротность цепи по ожидаемому виду АЧХ и ФЧХ.
- Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 3.77.
-

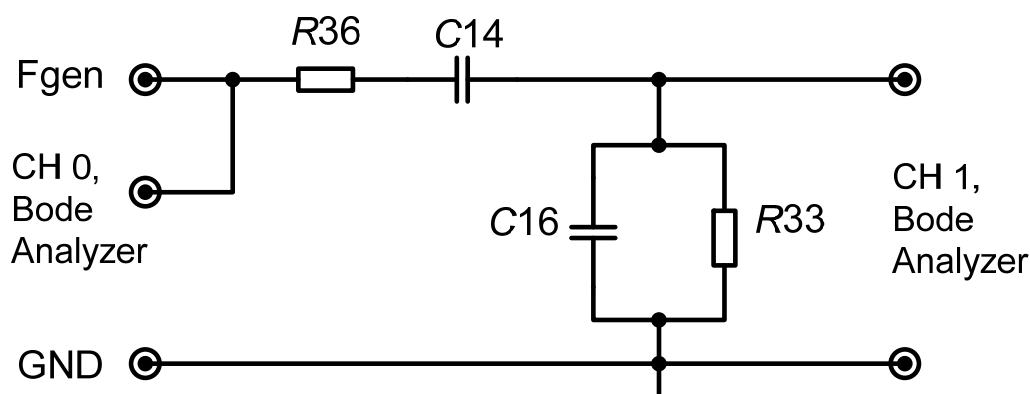


Рис. 3.77. Схема исследования АЧХ и ФЧХ цепи Вина

- На виртуальной панели анализатора установите амплитуду гармонического сигнала 2,5 В. Задайте автоматический режим работы по Y-Scale. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Гц, конечную частоту 10 000 Гц и число шагов за декаду 20. Установите также новые значения частот в Hz по осям АЧХ и ФЧХ: слева – 100, справа – 10 000.

- Запустите в работу анализатор. Сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ. По экспериментальным данным уточните частоту квазирезонанса цепи и определите ее добротность. Уточнение значения частоты лучше всего провести по ФЧХ. Добротность определите следующим образом: по нулевому фазовому сдвигу уточните частоту квазирезонанса и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте. Затем от полученного значения отнимите 3 дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания, а потом и саму полосу. Добротность получим как отношение частоты квазирезонанса цепи к полосе ее пропускания. Установите, совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные. Сделайте выводы по проделанному исследованию.

- Соберите схему избирательного усилителя (рис. 3.75).

- На виртуальной панели генератора установите нулевую амплитуду гармонического напряжения.

- Переведите движок потенциометра $R13$ в крайнее правое положение, в котором его сопротивление минимально и коэффициент отрицательной обратной связи схемы гарантированно меньше $1/3$, а усилитель переходит в режим генератора, выдавая на выходе периодическое напряжение.

- Перемещайте движок потенциометра медленно влево и добейтесь срыва колебаний.

- На виртуальной панели генератора установите амплитуду входного гармонического напряжения, равную 40 мВ. В дальнейшем это значение придется уточнить, так как оно зависит от выбранного Вами положения движка потенциометра, определяющего и усиление, и эквивалентную добротность схемы избирательного усилителя.

- Подготовьтесь к работе генератора в режиме сканирования частоты сигнала в заданных пределах с заказанным Вами шагом (режим Frequency Sweep). Как рекомендованные значения установите начальную частоту – 100 Гц, конечную частоту – 1000 Гц, а шаг – 100 Гц. Кнопкой Start/Stop запустите режим «сweepинга» (Frequency Sweep) частоты генератора и по осциллографу просмотрите за работой схемы.

- Схема настроена правильно, если на всех частотах сохраняется линейный режим работы ОУ и при переключении частоты за счет переходных процессов схема не переходит в режим паразитной генерации.

При наличии генерации чуть-чуть передвиньте движок потенциометра влево. Если при работе схемы в режиме избирательного усилителя наблюдается отсечка гармонического сигнала, то уменьшите амплитуду напряжения с генератора. Целесообразно так отстроить схему, чтобы при входном напряжении несколько десятков милливольт на ее выходе на частоте, близкой к частоте «квазирезонанса», было бы напряжение несколько вольт.

- Выключите схему, чтобы перебрать схему эксперимента с использованием анализатора Боде. Удалите генератор и осциллограф. Вызовите из меню анализатор Боде.

- Установите по ранее проведенному эксперименту амплитуду гармонического сигнала. Задайте автоматический режим работы по Y-Scale.

Поставьте начальную частоту сигнала 100 Гц, конечную частоту 10 000 Гц и число шагов за декаду 20. Установите также новые значения частот в Гц по осям АЧХ и ФЧХ: слева – 100, справа – 10 000.

- Включите схему. Запустите в работу анализатор, сравните полученные характеристики с ожидаемыми. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ. По экспериментальным данным уточните частоту «квазирезонанса» избирательного усилителя и определите его максимальное усиление и эквивалентную добротность.

- Выключите схему. Измерьте значение сопротивления потенциометра, добавьте к нему 50 Ом (внутреннее сопротивление генератора FGEN), измерьте также значение резистора R_9 , рассчитайте коэффициент отрицательной обратной связи и оцените значение эквивалентной добротности. Насколько оно близко к полученному ранее значению по проведенному эксперименту? Во сколько раз эквивалентная добротность избирательного усилителя больше добротности используемой цепи Вина?

- Передвиньте еще движок потенциометра влево, чтобы получить другое значение эквивалентной добротности. Повторите вышеприведенный эксперимент и обработку его данных. Сделайте выводы по результатам проведенных исследований.

4.7. Исследование схемы преобразователя напряжения в ток

- Вызовите из меню регулируемый источник питания VPS (SUPPLY+) и цифровой вольтметр DMM.

- Соберите схему преобразователя, изображенную на рис. 3.76. В качестве нагрузки сначала используйте сопротивление R_{28} . Определение тока нагрузки в дальнейшем осуществляйте путем измерения напряжения с помощью вольтметра на контрольном сопротивлении R_4 .

- Установите значение напряжения Supply+ вблизи максимально возможного, используя предварительно проведенные расчеты по

обеспечению линейного режима работы ОУ для наибольшей нагрузки 102,4 кОм. После установки напряжения источника VPS его значение уточните с помощью вольтметра. Определите ожидаемое значение тока генератора тока, учитывая значение R_{12} , и зафиксируйте его.

- Измеряйте напряжения на контрольном резисторе R_4 при разных значениях сопротивлений нагрузки, пересчитывайте их в значения тока в нагрузке, составляйте таблицу, стройте график $I_H = f(R_H)$, рассчитывайте погрешности между ожидаемыми и реальными значениями тока в нагрузке.

- Проведите оценочные расчеты значения выходного сопротивления преобразователя на основе полученных данных. Сделайте выводы.

5. Контрольные вопросы

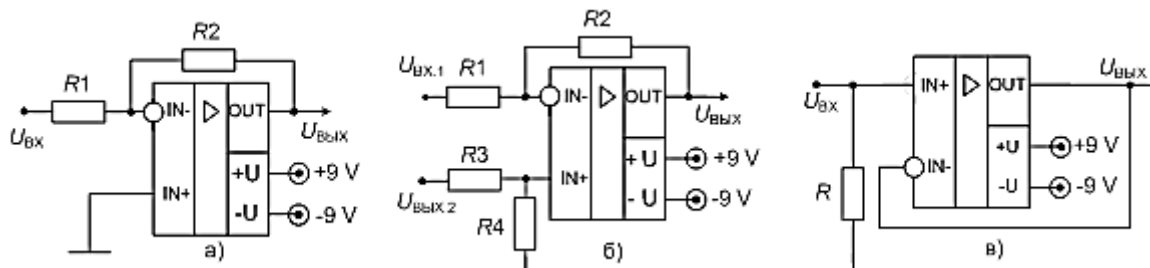
- 5.1. В принципиальных схемах с использованием различных операционных усилителей устанавливаются дополнительные цепи, каждая из которых имеет свое функциональное назначение. Поясните функциональное назначение цепей коррекции и смещения.
- 5.2. Поясните, чем мы вынуждены расплачиваться за обеспечение устойчивости работы схем на ОУ за счет установки цепей внутренней или внешней коррекции.
- 5.3. В лабораторных исследованиях использовано симметричное и несимметричное питание операционного усилителя. Какие изменения и в каких характеристиках схем с ОУ прежде всего будут наблюдаться изменения при переходе от симметричного на несимметричное питание?
- 5.4. Лабораторная работа посвящена анализу линейных функциональных устройств на ОУ. Докажите, какие преобразования, перечисленные в списке, можно отнести к линейным:
 - а) умножение входного сигнала на константу;
 - б) умножение двух входных сигналов;
 - в) фильтрацию;
 - г) интегрирование;
 - д) ограничение.
- 5.5. Известно, что положение об эквипотенциальности входов идеализированного ОУ при его инверсном включении имеет важные следствия. Определите из перечисленных правильные высказывания:
 - а) выходное напряжение всегда больше входного;
 - б) усилитель работает при малом синфазном сигнале;
 - в) входное напряжение выделяется на резисторе R_1 ;
 - г) выходное напряжение выделяется на резисторе R_2 .

5.6. Докажите правильное соответствие между элементами двух множеств – видами включения ОУ (1-я группа) и реализующими их схемами (2-я группа):

1-я группа:

1. Инвертирующее включение ОУ.
2. Неинвертирующее включение ОУ.
3. Дифференциальное включение ОУ.

2-я группа:



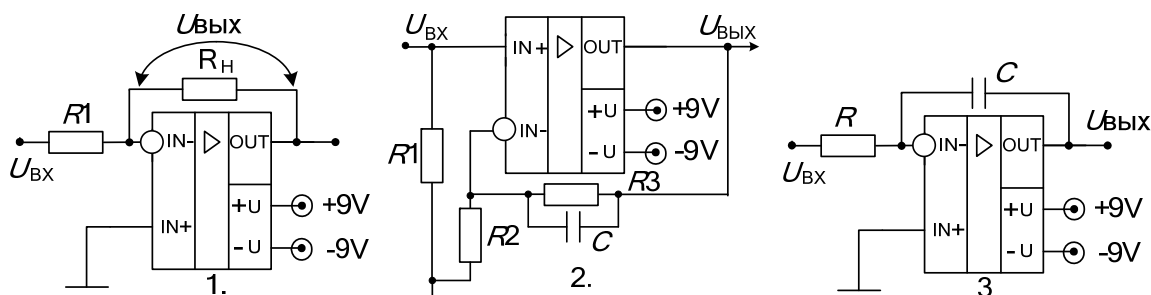
5.7. Приведите схему сумматора, у которого при входных напряжениях (постоянном $U_1 = +3$ В и переменном с амплитудой $U_{2m} = 2$ В) любое мгновенное значение выходного напряжения положительно. Выведите уравнение для выходного напряжения.

5.8. Поясните, почему при подаче на вход интегратора последовательности прямоугольных импульсов на выходе схемы появляется напряжение треугольной формы. Приведите соответствующие формулы.

5.9. Рассчитайте значение модуля коэффициента передачи по напряжению интегратора на частоте «квазирезонанса».

5.10. Докажите правильное соответствие между схемами на ОУ (1-я группа) и видами линейных преобразований над входными сигналами (2-я группа):

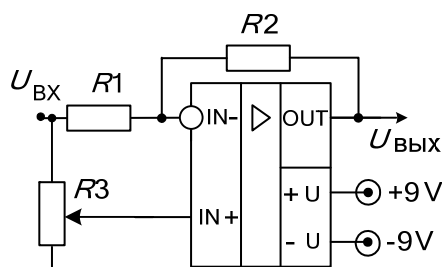
1-я группа:



2-я группа:

- а) интегратор; б) преобразователь «ток в напряжение»;
- в) преобразователь «напряжение в ток»; г) фильтр нижних частот; д) фильтр верхних частот.

- 5.11. Определите коэффициент усиления по напряжению схемы на ОУ для линейного режима работы идеализированного ОУ при среднем положении движка потенциометра.



- 5.12. Докажите, что на частотах, превышающих частоту «квазирезонанса», скорость изменения АЧХ интегратора приближается к 20 дБ на декаду.
- 5.13. Как рассчитать и экспериментально определить частоту среза ФНЧ первого порядка?
- 5.14. Каким образом в ФНЧ первого порядка независимо изменять частоту среза и коэффициент усиления по напряжению на постоянном токе?
- 5.15. Даны две схемы фильтров первого порядка: ФНЧ и ФВЧ. Различаются ли у них частоты среза, если использованы одинаковые элементы? Докажите.
- 5.16. Изобразите АЧХ и ФЧХ исследуемых схем ФНЧ и ФВЧ.
- 5.17. Как определить частоту квазирезонанса для цепи Вина? Приведите схему эксперимента.
- 5.18. Приведите алгоритм экспериментального определения добротности цепи Вина и избирательного усилителя на ее основе.
- 5.19. При каких условиях в ходе эксперимента избирательный усилитель может превратиться в автогенератор?
- 5.20. Поясните, чем и почему определяется значение тока в нагрузке в схеме преобразователя напряжения в ток.
- 5.21. Каким образом после получения экспериментальных данных для зависимости $I_H = f(R_H)$ можно определить выходное сопротивление схемы преобразователя напряжения в ток?

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты (таблицы, графики, заключения);
- выводы.

Модуль 4. Схемы на операционных усилителях

Лабораторная работа № 4.3

Функциональное применение операционных усилителей (нелинейные преобразования сигналов)

1. Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде NI ELVIS характеристик и параметров схем на ОУ, обеспечивающих различные нелинейные преобразования входных сигналов.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования схем с ОУ с использованием функционального генератора (FGEN), источников перестраиваемых напряжений (VPS), универсального вольтметра (DMM) и осциллографа (Scope);
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

Наряду с линейными преобразованиями входных сигналов в схемах аналоговой электроники широко используются различные нелинейные преобразования.

При нелинейных преобразованиях нарушается известный принцип суперпозиции (наложения), который в предыдущих исследованиях широко использовался, когда можно было просматривать работу схемы на отдельных сигналах, а полная картина складывалась как сумма отдельных процессов.

Что касается аналитического описания работы схем, то, в отличие от линейных преобразований, для нелинейных преобразований отсутствует общее решение нелинейных дифференциальных уравнений, что также резко затрудняет анализ таких схем.

Таким образом, вся прелесть линейного анализа может быть задействована только для отдельных линейных участков нелинейных функций.

К типовым нелинейным функциям относят:

- произведение двух и более сигналов, их экспоненциальные, логарифмические и любые другие нелинейные зависимости как гладкие, так и кусочно-линейно аппроксимированные;
- различные виды ограничения сигналов – одно- и двухсторонние, со сдвигом и без такового;
- выделение модуля сигнала (двухполупериодное выпрямление).

Операционные усилители широко используются для формирования различных нелинейных функций. Чтобы схема на ОУ их выполняла, должен быть применен или нелинейный режим работы ОУ, или нелинейность должна присутствовать в цепи его обратной связи при линейном усилителе, или нелинейными свойствами обладают и то, и другое.

3.1. Компараторы напряжений на ОУ

Компараторами называются устройства сравнения значений двух аналоговых сигналов. Результаты сравнения в простейшем случае индицируются различными уровнями выходных напряжений. Для компараторов в интегральном исполнении (в сериях 521; 554, 597 и др.) эти уровни соответствуют логическим уровням нуля и единицы для различных логик.

3.1.1. Нуль-компаратор

Одна из возможных схем нуль-компаратора изображена на рис. 3.78.

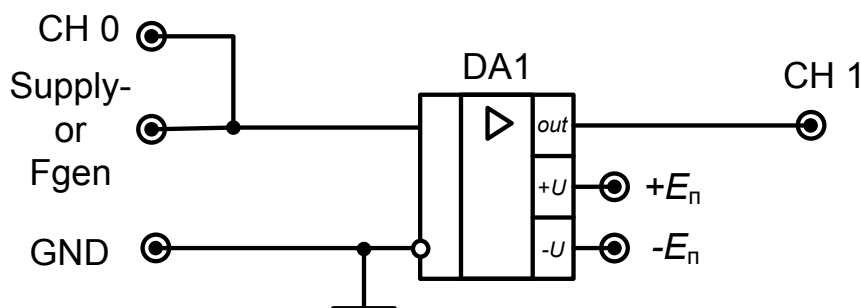


Рис. 3.78. Нуль-компаратор на ОУ

Известно, что если операционный усилитель имеет конечное значение дифференциального коэффициента усиления, то его амплитудная характеристика выглядит, как показано на рис. 3.79.

Протяженность линейного участка на амплитудной характеристике (по оси $U_{вх}$) чрезвычайно мала. Так, при усилении ОУ, равному 100 000, и ограничению на уровне ± 10 В ширина его равна всего лишь 200 мкВ. Легко видеть, что при увеличении коэффициента усиления этот участок еще суживается, а для идеализированного ОУ, у которого усиление

стремится к бесконечности, ширина – к нулю. Последнее означает, что переключение такого усилителя будет происходить при нулевом дифференциальном входном напряжении, и мы имеем у компаратора амплитудную характеристику (рис. 3.80).

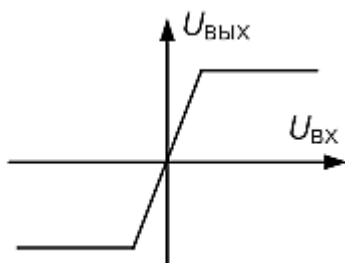


Рис. 3.79. Типичный вид амплитудной характеристики ОУ для двухполярного и симметричного питания

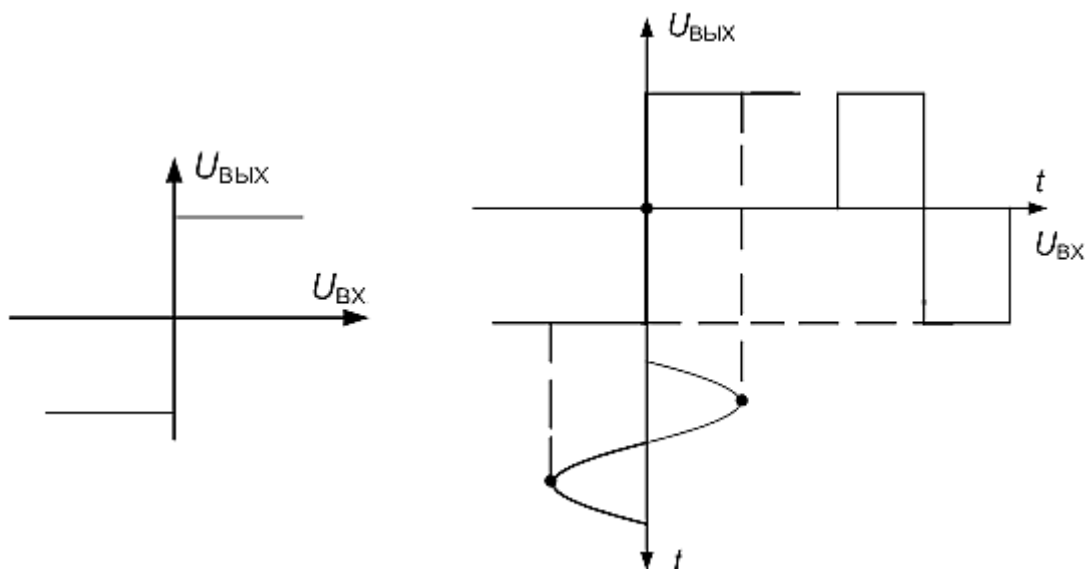


Рис. 3.80. Амплитудная характеристика нуля-компаратора

Рис. 3.81. Преобразование нуля-компаратором гармонического сигнала в прямоугольный

Если теперь подать на вход компаратора синусоидальный сигнал, то на выходе сформируется прямоугольное напряжение, рис. 3.81.

Конечно, такие картинки справедливы только в идеальном случае, когда ОУ к тому же имеет бесконечно большую скорость нарастания и не имеет аддитивной составляющей в выходном напряжении. В реальной схеме фронты прямоугольных импульсов будут иметь конечное время установления.

Естественно, что преобразовательная характеристика нуль-компаратора будет изменяться, если поменять местами входы ОУ. Определите при подготовке к работе вид амплитудной характеристики компаратора для этого случая.

3.1.2. Компараторы с ненулевым опорным напряжением

Преобразовательная характеристика компаратора будет также изменена, если подпереть один из входов ОУ источником ЭДС той или иной полярности.

К примеру, если в схеме рис. 3.78 на инвертирующий вход относительно земли включен источник E положительной полярности, то переключение выходного напряжения будет происходить также при нулевом дифференциальном входном сигнале ОУ, т. е. при входном напряжении компаратора, равном значению E , рис. 3.82.

Из рисунка ясно, что при синусоидальном входном напряжении на выходе образуется прямоугольный сигнал со скважностью $Q \neq 2$.

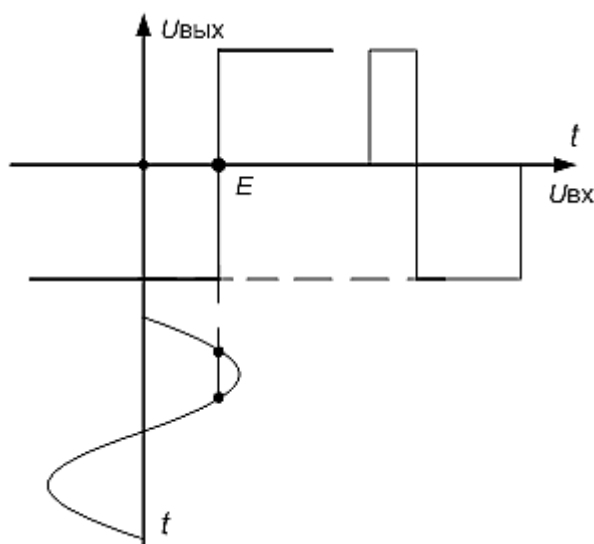


Рис. 3.82. Амплитудная характеристика компаратора с положительным смещением на инвертирующем входе ОУ и преобразование сигналов в нем

3.1.3. Компараторы с гистерезисом

Такие компараторы еще называются компараторами с защелкой. Природа их появления такова. При неизменном опорном напряжении во всех вышеобозначенных схемах компараторов малейшие изменения входного напряжения в окрестностях значения опорного напряжения будут приводить к многочисленным изменениям сигнала на выходе, что не всегда целесообразно.

Часто требуется, чтобы компаратор принял решение, например, о превышении входного напряжения относительно опорного и не менял

бы его, если входное напряжение стало бы меньше на определенное и наперед заданное значение.

Таким образом, речь идет о наличии на амплитудной характеристике компаратора гистерезиса, рис. 3.83.

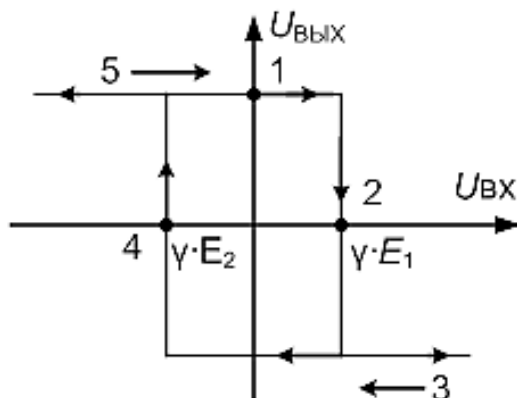


Рис. 3.83. Амплитудная характеристика компаратора с гистерезисом

Амплитудная характеристика компаратора с гистерезисом получается за счет введения в схему с ОУ положительной обратной связи, например, как это показано на рис. 3.84.

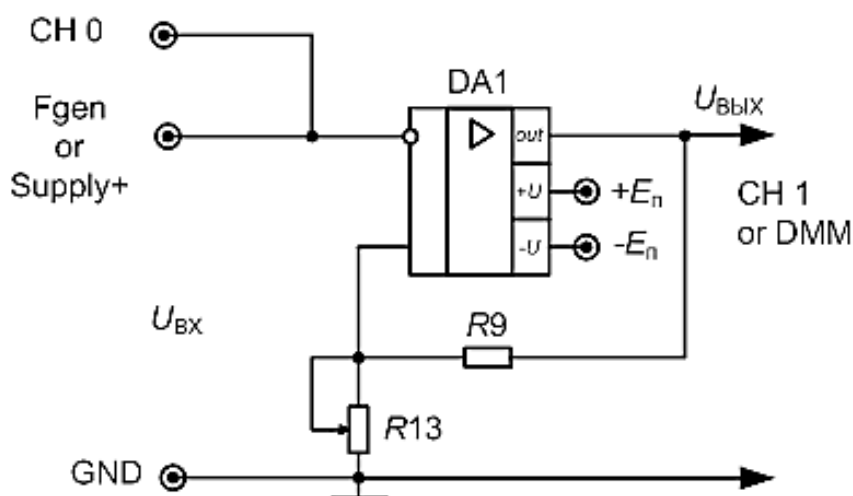


Рис. 3.84. Компаратор с гистерезисом

Пояснить работу такой схемы можно следующим образом. Пусть при включении источников питания схемы $E_{П} = \pm 15$ В за счет переходного (регенеративного) процесса из-за наличия положительной связи на выходе ОУ установится напряжение, близкое к значению E_1 . С учетом передачи по напряжению цепи обратной связи $\gamma = R_{13} / (R_{13} + R_9)$, на неинвертирующем входе установится напряжение, например, +1 В. При нулевом входном напряжении схема поддерживает указанное выше выходное напряжение, близкое к E_1 (точка 1 на рис. 3.83).

При увеличении входного напряжения положительной полярности переключение выходного напряжения на уровень, близкий по значению к $E_2 = -9$ В произойдет при $U_{вх} = 1$ В (точка 2 на рис. 3.83).

Дальнейшее повышение входного напряжения не приведет к изменениям выходного напряжения (зона 3 на рис. 3.83). Как только на выходе схемы установится отрицательное напряжение, так на инвертирующем входе ОУ будет действовать напряжение -1 В. Последнее означает, что область 3 продолжится до входного напряжения -1 В, при котором компаратор сработает (точка 4 на рис. 3.83), и его выходное напряжение вновь станет положительным и близким к значению $+9$ В (зона 5 на рис. 3.83).

Указанные рассуждения подтверждают присутствие гистерезиса шириной в 2 В, характеризующегося неоднозначностью установки выходного напряжения в зоне гистерезиса. При подаче на вход компаратора гармонического напряжения выходной сигнал будет соответствовать рис. 3.85.

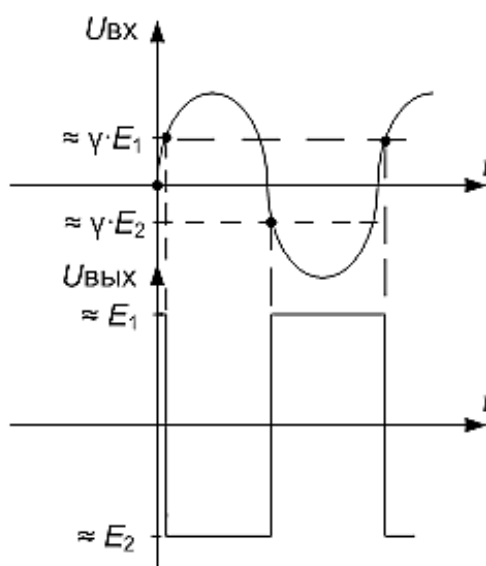


Рис. 3.85. Временные диаграммы сигналов компаратора с гистерезисом

3.2. Операционные выпрямители

В этом разделе речь пойдет о выпрямителях средневывпрямленного значения, построенных с использованием ОУ. На выходе такой схемы постоянная составляющая после фильтрации с использованием ФНЧ пропорциональна среднему значению выпрямленного входного напряжения.

Работа подобных выпрямителей, как правило, основывается на том, что при одной полярности входное напряжение с некоторым масштабным коэффициентом подается на выход, а при другом – выходное напряжение поддерживается равным нулю (однополупериодный выпрямитель) или инвертированному входному напряжению (двухполупериодный выпрямитель). В последнем случае, если обеспечено равенство

масштабных коэффициентов для прямого и инвертированного входных сигналов, то устройство может применяться в качестве формирователя модуля входного сигнала: выходное напряжение оказывается пропорциональным абсолютному значению входного.

В схеме на рис. 3.86 реализованы два однополупериодных выпрямителя (положительной полярности – несимметричный выход 1, отрицательной полярности – несимметричный выход 2) и один двухполупериодный выпрямитель (симметричный выход 3).

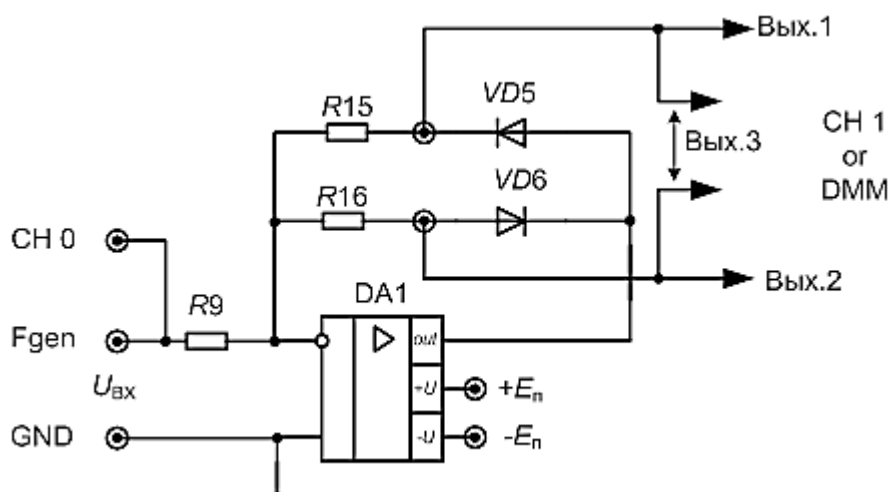


Рис. 3.86. Схема выпрямителя на ОУ

Для упрощения анализа схемы считаем ОУ и диоды идеальными.

Для положительной полуволны входного напряжения диод $VD5$ закрыт и на схеме замещения может быть представлен разрывом цепи, а диод $VD6$ открыт и замещается «закороткой» между точками включения диода, рис. 3.87.

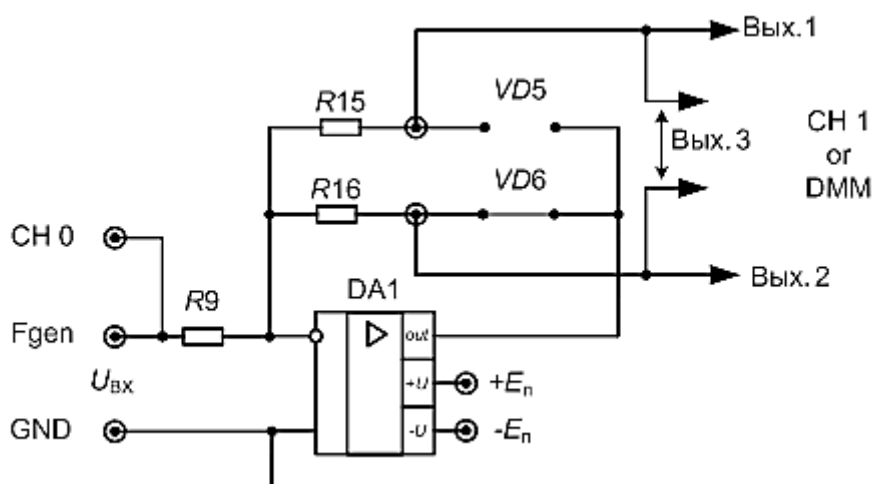


Рис. 3.87. Схема замещения выпрямителя для входного напряжения положительной полярности

Из приведенной схемы (рис. 3.87) следует, что на первом выходе схемы напряжение отсутствует, так как оно снимается с точки суммирования. В это же время второй выход однополупериодного выпрямителя снимается с выхода ОУ. Значит $U_{\text{ВЫХ.2}} = -R_{10}/R_9$, и мы имеем на выходе почти удвоенную по амплитуде полуволну отрицательной полярности.

Для отрицательной полуволны входного напряжения схема замещения приобретает вид рис. 3.88.

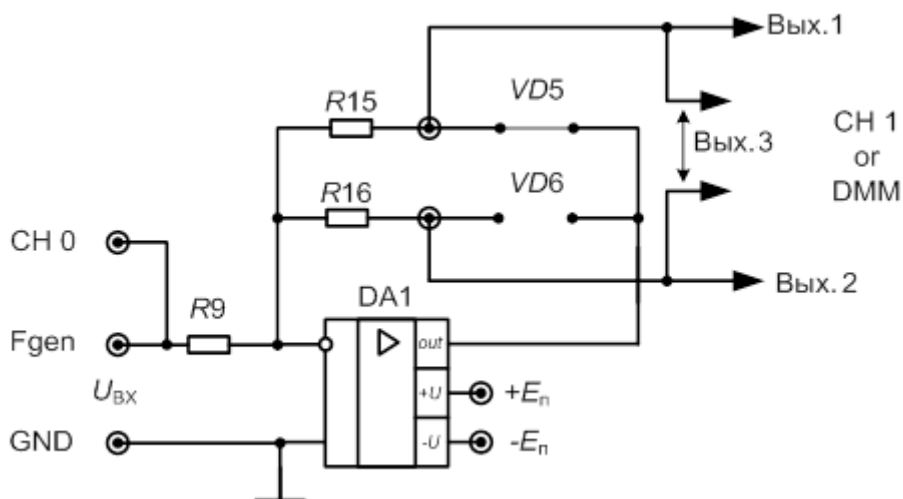


Рис. 3.88. Схема замещения выпрямителя для входного напряжения отрицательной полярности

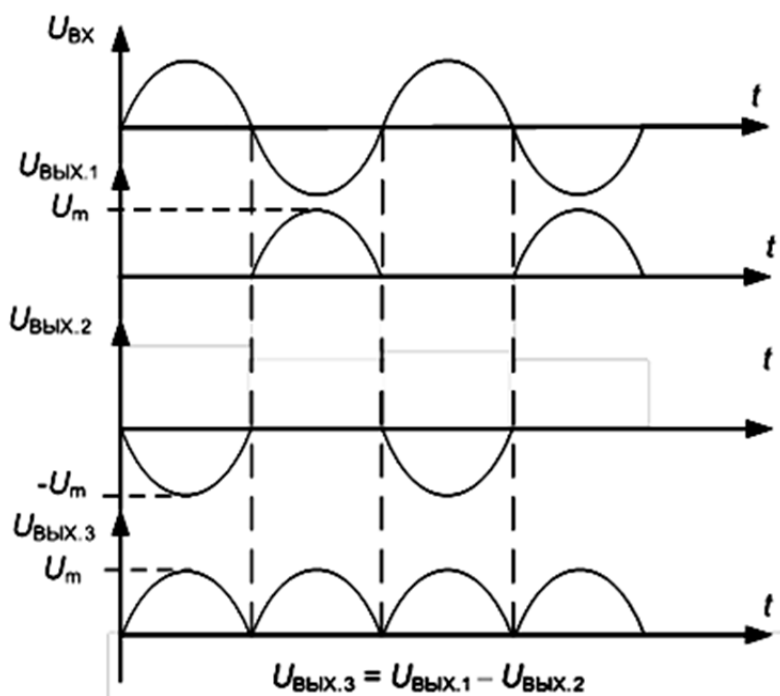


Рис. 3.89. Временные диаграммы работы выпрямителя на ОУ

Рассуждая аналогично, имеем: $U_{\text{вых. 2}} = -R_{15}/R_9$, а на первом выходе будет нулевое напряжение. Тогда становятся понятны временные диаграммы, изображенные на рис. 3.89 и поясняющие работу выпрямителя при указанных идеализированных свойствах ОУ.

Как видно из рисунка, выходное напряжение двухполупериодного выпрямителя действительно является выходным напряжением схемы выделения модуля входного гармонического сигнала, если схема обеспечивает одинаковые коэффициенты преобразования для каждой из его входных полувольт.

Одной из важных характеристик выпрямителей является их преобразовательная характеристика в виде зависимости постоянной составляющей выходного напряжения от значений (действующих или амплитудных) входного синусоидального напряжения.

В нашем случае в качестве ФНЧ, позволяющего ослабить гармоники, присутствующие в спектре $U_{\text{вых.}}$, и качественно измерить выходное постоянное напряжение, выступает инерционность цифрового вольтметра DMM или измерителя осциллографа Scope.

При проведении эксперимента проверьте, насколько линейна преобразовательная характеристика исследуемой схемы выпрямителя.

3.3. Формирователи нелинейных функций на ОУ

Выше отмечалась многочисленность подобных функциональных преобразований входных сигналов. В лабораторном цикле мы ограничимся исследованиями лишь некоторых из них.

3.1.1. Усилитель-ограничитель

Усилители с ограниченным размахом выходного напряжения используются в формирователях сигналов, цепях защиты, устройствах управления и контроля и т. д.

Если ограничение не вызвано самим ОУ (смотри его амплитудную характеристику и ранее проведенные исследования), то основными элементами ограничителей на ОУ являются цепи с диодами или стабилитронами, включенные в отрицательную обратную связь усилителя.

Получение амплитудных характеристик усилителей в виде согласованного набора прямолинейных отрезков открывает путь формирования произвольной нелинейной зависимости между входным и выходным напряжениями за счет использования кусочно-линейной аппроксимации требуемой нелинейной функции.

В качестве примера рассмотрим схему простейшего усилителя-ограничителя, рис. 3.90. В этой схеме стабилитрон открывается, когда падение напряжения на резисторе в цепи обратной связи становится равным напряжению стабилизации, и в дальнейшем выходное напряже-

ние мало изменяется, несмотря на значительные изменения входного напряжения.

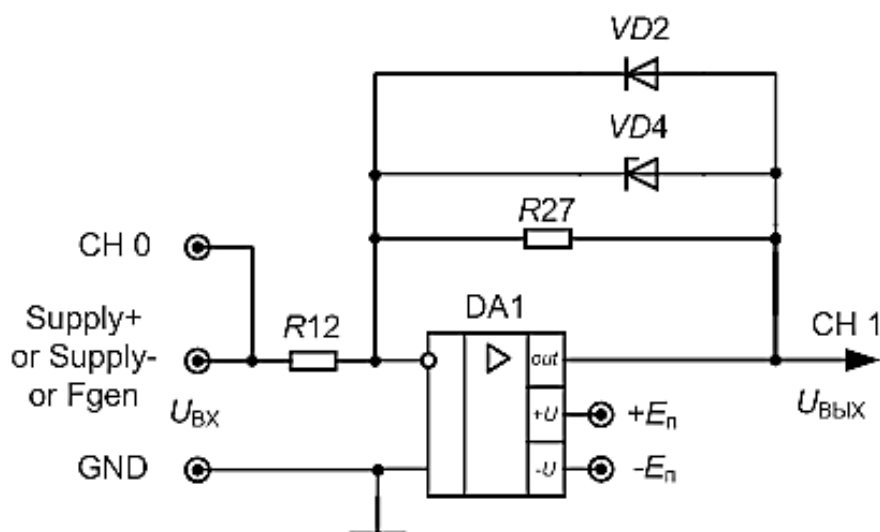


Рис. 3.90. Усилитель-ограничитель с постоянными уровнями ограничения

Такой усилитель-ограничитель характеризуется приведенной на рис. 3.91 амплитудной характеристикой, в первом приближении имеющей три прямолинейных участка, формирующей выходное напряжение с несимметричными уровнями ограничения.

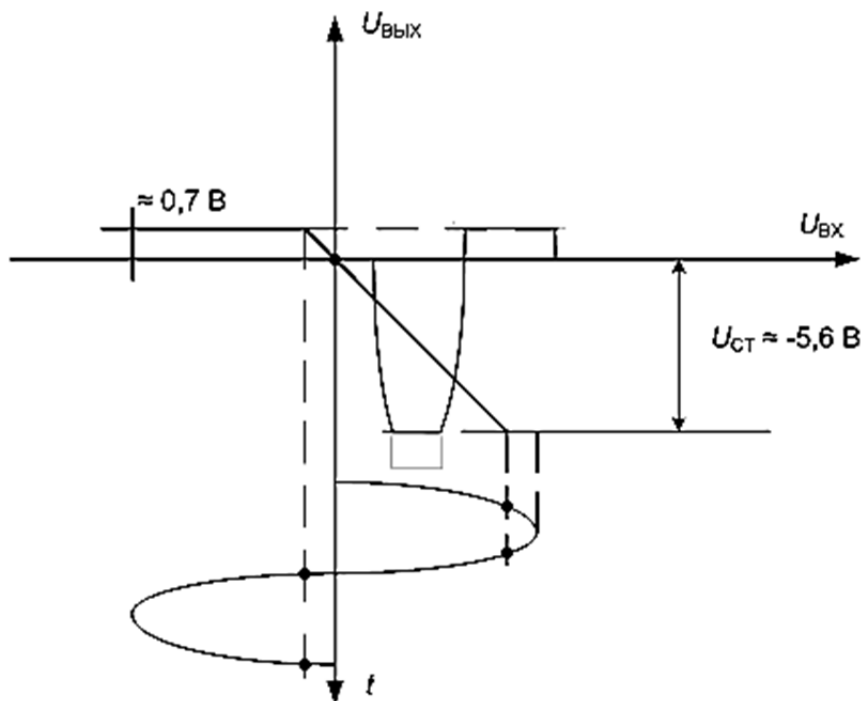


Рис. 3.91. Амплитудная характеристика и временные диаграммы напряжений усилителя-ограничителя

Если открывается полупроводниковый диод, то выходное напряжение также практически стабилизируется на уровне около 0,7 В даже при изменениях входного напряжения. Аналогично, при прямых напряжениях на диоде, меньших приблизительно 0,6 В, и тем более при обратном его включении, диод закрыт. В указанных выше ситуациях усиление схемы (рис. 3.90) определяется сопротивлениями R_{12} и R_{27} .

3.1.2. Простой логарифмический усилитель на ОУ

Формирование нелинейных функций при использовании кусочно-линейной аппроксимации применяется тогда, когда нет возможности использовать в схеме элементы или цепи с аналогичной или обратной зависимостью их ВАХ.

Если такая возможность существует, то открывается путь получения «гладких» нелинейных функций за счет включения таких элементов или цепей в обратную связь ОУ. Пусть, например, нелинейный элемент (НЭ), ВАХ которого имеет вид $U = f(I)$, включен в цепь обратной связи между выходом и инвертирующим входом ОУ, рис. 3.92.

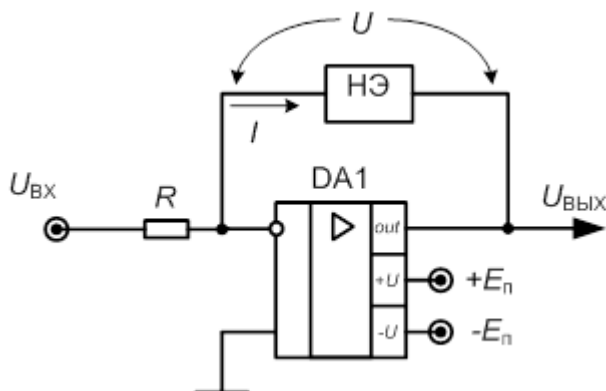


Рис. 3.92. Формирователь нелинейных функций с нелинейным элементом в цепи отрицательной обратной связи

Так как через нелинейный элемент протекает ток $I = U_{\text{ВХ}} / R$, то:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U = -f(I) = -f(U_{\text{ВХ}} / R).$$

Полученное выражение означает, что выходное напряжение является функцией от входного по такой же зависимости, по какой напряжение нелинейного элемента зависит от его тока. Значит, чтобы спроектировать схему логарифмического усилителя, необходимо в качестве нелинейного элемента включить p - n -переход, для которого, как известно, при малых токах напряжение

$$U \cong m \cdot \varphi_T \cdot \ln(I/I_0),$$

где m — коэффициент, зависящий от материала; φ_T — температурный потенциал, равный при комнатной температуре приблизительно 25 мВ;

I – ток перехода, задаваемый в схеме входным напряжением и сопротивлением R ; I_0 – тепловой ток.

В простых схемах логарифмических усилителей в качестве p - n -перехода используется полупроводниковый диод. В этом случае предпочтение следует отдать диоду Шоттки, рис. 3.93.

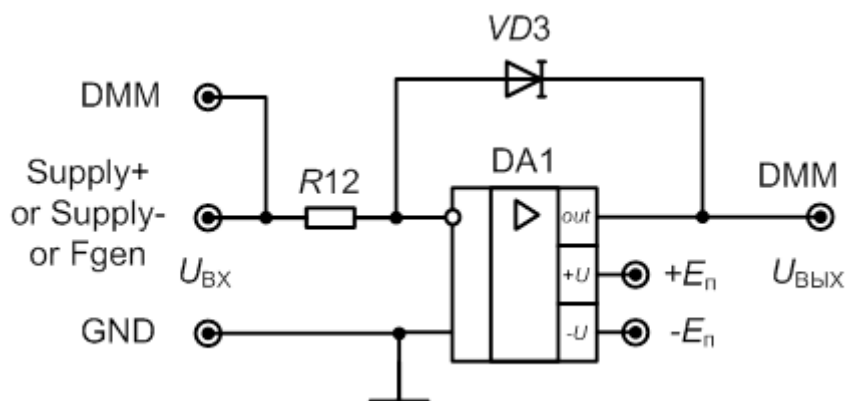


Рис. 3.93. Простой логарифмический усилитель на ОУ

Так как логарифмы не существуют для отрицательных значений, то рабочей областью на амплитудной характеристике является четвертый квадрант декартовой плоскости, а входное напряжение должно быть положительной полярности.

Ошибки логарифмирования в этой схеме обусловлены многими факторами. Они вызываются влиянием сопротивления базы p - n -перехода, нарушающего логарифмический закон между током и напряжением. Влияет также неидеальность ОУ, и, прежде всего, его входные токи и напряжение смещения. Погрешность обуславливается и температурным дрейфом выходного напряжения из-за зависимостей от температуры обратного (теплового) тока диода и дрейфом параметров операционного усилителя.

По указанным причинам реальные схемы на ОУ, реализующие функцию логарифмирования, используют не полупроводниковый диод, а транзисторные сборки в диодном включении. Применение подобранных транзисторныхборок позволяет применять принципы компенсации, минимизирующие погрешности логарифмирования.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации программы откройте панель комплекта измерительных приборов.

4.2. Исследование схем компараторов напряжения

4.2.1. Исследование нуль-компаратора

- Соберите схему нуль-компаратора, аналогичную схеме, изображенной на рис. 3.78, но имеющей в отличие от нее вид амплитудной характеристики, показанной на рис. 3.94.

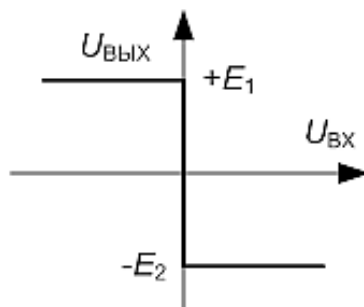


Рис. 3.94. Амплитудная характеристика нуль-компаратора

- Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и подключите источник Supply+ к входу компаратора, а его выход присоедините к каналу СН 1 осциллографа, также вызвав его из меню приборов.

- Произведите измерение напряжения срабатывания компаратора. С этой целью обнулите с помощью Reset значение напряжения источника Supply+ и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Затем увеличивайте напряжение Supply+ с шагом (инкрементом), возможным для источника. Если при напряжении несколько десятков милливольт компаратор не срабатывает, то необходимо вместо источника Supply+ подключить источник Supply-. Если компаратор сработал при использовании источника Supply+, то снова обнулите его, а затем увеличивайте его напряжение от нуля с шагом 10 мВ до момента срабатывания компаратора. Это напряжение в первом приближении соответствует напряжению срабатывания компаратора. При необходимости аналогичную процедуру необходимо произвести с напряжением источника Supply-. Объясните, почему у реального нуль-компаратора напряжение срабатывания не равно нулю? Определите, соответствуют ли полученные данные заказанной амплитудной характеристике.

- Изучаем временные диаграммы сигналов компаратора, поясняющие его работу. Переберите схему, подав на вход сигнал с генератора. Установите частоту 1 кГц, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы требуемый вид амплитудной характеристики и полученное ранее напряжение срабатывания. Если результаты существенно не совпадают, то объясните причины их расхождений.

4.2.2. Исследование компаратора с опорным напряжением

- Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 3.95.
- Иницилируйте для определения напряжения срабатывания компаратора виртуальные панельные элементы регулируемого источника VPS и осциллографа Scope. Обнулите с помощью Reset значение напряжения источника Supply+.
- Установите значение опорного напряжения на инвертирующем входе, ОУ равное +1 В, изменяя сопротивление потенциометра R13 и используя канал CH 0 осциллографа.
- Определите значение выходного напряжения компаратора и зафиксируйте его. Поясните, почему оно такое в проведенном эксперименте.

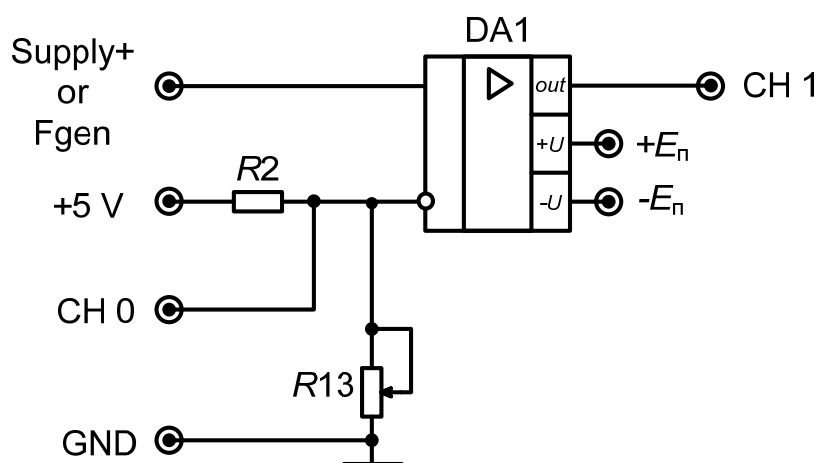


Рис. 3.95. Схема компаратора с опорным напряжением

- Установите значение напряжения Supply+ несколько ниже, чем 1 В, учитывая результаты исследований, только что проведенных по определению напряжения срабатывания компаратора. Следите, чтобы при этом компаратор не сработал.
- Повышайте с возможно меньшим шагом напряжение Supply+ до момента срабатывания компаратора и зафиксируйте напряжение срабатывания. Как соотносится это напряжение с выставленным ранее опорным напряжением? Сделайте выводы в отчете.
- Подключите на вход компаратора генератор и вызовите его из меню. Установите частоту 1 кГц, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы вид амплитудной характеристики компаратора и полученное ранее напряжение срабатывания. Если имеет место существенное несовпадение результатов, то объясните причины их расхождений.

4.2.3. Исследование схемы компаратора с гистерезисом

- Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 3.84.
- Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и осциллограф Scope. Обнулите с помощью Reset значение напряжения источника Supply+ и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Временно подключите канал CH 1 осциллографа к инвертирующему входу операционного усилителя и с помощью потенциометра R13 установите напряжение +1 или –1 В в зависимости от значения выходного напряжения.

- Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. При этом воспользуйтесь методикой мысленного эксперимента, изложенной в теоретическом разделе. В ходе эксперимента используйте источники Supply+ и Supply-. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Полученные данные занесите в таблицу. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

- Измените с помощью потенциометра R13 напряжение на инвертирующем входе ОУ (значение напряжения выберите сами). Проведите эксперимент, используя методику предыдущего пункта. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса. Чем определяются напряжения срабатывания компаратора и ширина зоны гистерезиса?

- Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 3.96. По изложенной выше методике проведите исследование схемы, определив ее амплитудную характеристику и изучив временные диаграммы сигналов при входном гармоническом напряжении, полученном с генератора. Результатами исследований являются: расчетные выражения, определяющие работу схемы, теоретические и экспериментальные значения напряжений срабатывания и ширина зоны гистерезиса, временные диаграммы сигналов.

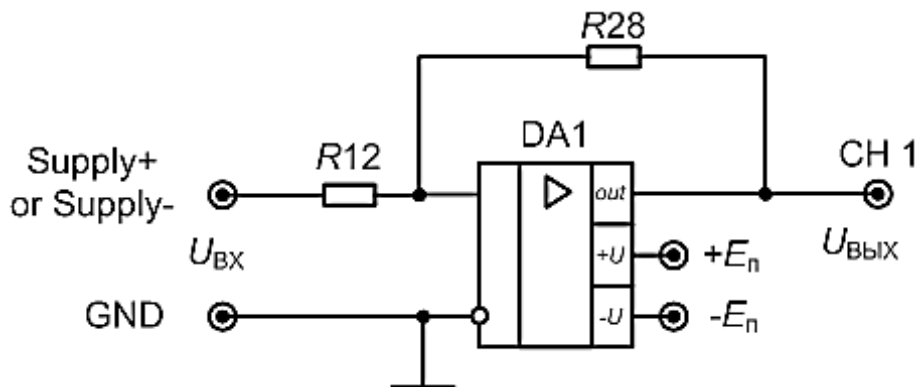


Рис. 3.96. Схема компаратора с положительной обратной связью

4.3. Исследование схемы операционного выпрямителя

- Соберите схему операционного выпрямителя, изображенную на рис. 3.86.
- Вызовите из меню генератор FGEN и осциллограф Scope. Установите частоту гармонического сигнала 1 кГц и амплитуду 2,5 В. Какова ожидаемая амплитуда сигналов, которые будут наблюдаться на выходах выпрямителя? Определите и зафиксируйте эти значения.
- Получите временные диаграммы сигналов, действующие на входе и выходах 1 и 2 выпрямителя, используя дважды два канала CH 0 и CH 1 осциллографа. В отчете объедините и синхронизируйте полученные временные диаграммы сигналов.
- Получите данные по преобразовательной характеристике двухполупериодного выпрямителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, изменяя амплитуду входного гармонического напряжения от 2,5 до 1 В с интервалом 0,1 В и измеряя постоянную составляющую выходного напряжения с помощью вольтметра постоянного тока или осциллографа с открытым входом. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о линейности характеристики.

4.4. Исследование ограничителя на ОУ

- Соберите схему ограничителя, изображенную на рис. 3.90.
- Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и осциллограф Scope.
- Получите данные по амплитудной характеристике ограничителя, изменяя входное напряжение от +1 до +7 В с интервалом в 1 В источника Supply+ и измеряя выходное напряжение с помощью измерителей напряжения осциллографа. Затем используйте источник Supply- и продолжите исследования, изменяя входное напряжение от –1 до –7 В с интервалом в –1 В. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о соответствии эксперимента и теории.
- Отключите регулируемые источники питания (VPS) и вместо них на вход схемы подайте максимальное по амплитуде напряжение (2,5 В) гармонического колебания на частоте 1 кГц с генератора FGEN.
- Определите по осциллограмме выходного напряжения, почему не работает стабилитрон VD4, так как на ней отсутствует ограничение на соответствующем уровне его стабилизации.
- Переберите схему ограничителя, обращая внимание на номиналы сопротивлений R23, R27, R28, которые можно поставить в цепь обратной связи ограничителя так, чтобы стабилитрон VD4 пробивался ($U_{\text{ст}}$ приблизительно от 4,7 до 6,2 В в разных макетах) и участвовал при ограничении выходного сигнала. Установите нужный резистор R в схему.

4.5. Исследование логарифмического усилителя на ОУ

- Соберите схему логарифмического усилителя, изображенную на рис. 3.93.
- Вызовите из меню регулируемые источники питания VPS и универсальный вольтметр DMM.
- Установите на источнике VPS напряжение $U_{ВХ} = 0$ В и запишите значение выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ в память DMM, как напряжение нуля, нажав кнопку Null на DMM.
- Регулируя входное напряжение с помощью источника VPS, заполните табл. 3.4.

Таблица 3.4

$U_{ВХ}, \text{В}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$U_{ВЫХ}, \text{В}$							
$U_{ВЫХ. \text{РАСЧ.}}, \text{В}$							

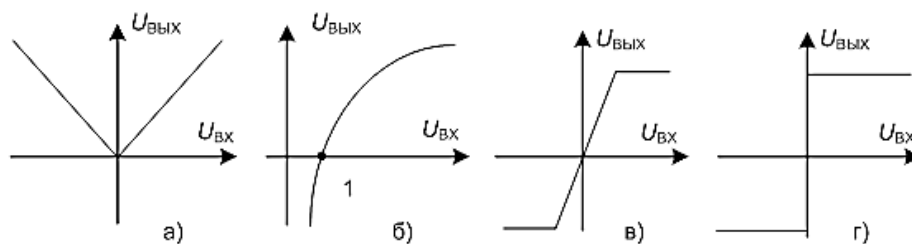
- Для расчета значений $U_{ВЫХ. \text{расч.}}$ воспользуйтесь следующим соотношением:

$$U_{ВЫХ} = -m \cdot \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{U_{ВХ}}{I_0 \cdot R_{12}} \right),$$

где $m = 1,1$ – коэффициент, зависящий от материала; $\varphi_T = (25 \dots 30)$ мВ – температурный потенциал; $I_0 = 2$ мкА – тепловой ток.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Какие функции, обозначенные ниже и реализуемые в устройствах на ОУ, относятся к нелинейным функциям:

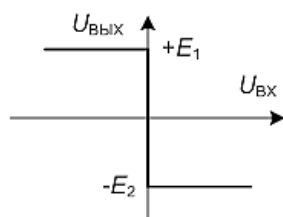


- 5.2. Определите и докажете соответствие между названиями устройств на ОУ (1-я группа) и видами функций (2-я группа), отображенных по порядку (а → б → в → г) в предыдущем вопросе.

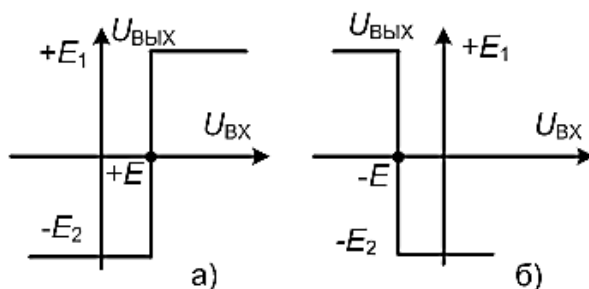
1-я группа:

1. Схема выделения модуля (двухполупериодный выпрямитель гармонических сигналов).
2. Двухсторонний ограничитель.
3. Нуль-компаратор.
4. Схема логарифмирования положительных напряжений.

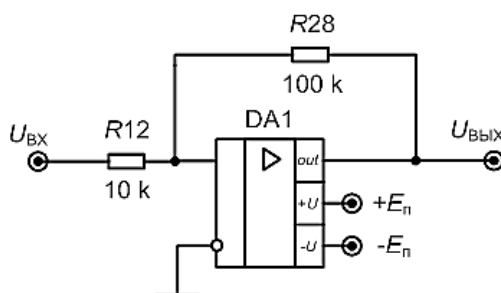
- 5.3. По условиям эксперимента со схемой выпрямителя необходимо рассчитать ожидаемые амплитуды сигналов, которые будут наблюдаться на выходах выпрямителя. Произведите этот расчет.
- 5.4. Определите ожидаемые значения постоянных составляющих напряжений на выходах выпрямителя на идеальном ОУ, если углы отсечки равны 90° , а амплитуда входного напряжения – 2,5 В.
- 5.5. Приведите схему на идеальном операционном усилителе, реализующую следующий вид амплитудной характеристики.



- 5.6. Объясните, почему у реального нуля-компаратора напряжение срабатывания не равно нулю? Поясните процедуру экспериментального определения этого напряжения.
- 5.7. Как изменятся временные диаграммы сигналов, поясняющих работу операционного выпрямителя (рис. 3.86), если вместо резистора R_9 с сопротивлением 5,1 кОм установить резистор $R_{12} = 10$ кОм? Приведите исправленные диаграммы напряжений.
- 5.8. Предложите схемы компараторов, которые реализуют при идеальных ОУ следующие виды амплитудных характеристик:



- 5.9. В ходе эксперимента исследовалась схема компаратора, изображенная на рисунке ниже. Докажите, какой вид амплитудной характеристики будет иметь эта схема.



- 5.10. Почему при исследовании исходной схемы ограничителя не работает стабилитрон $VD4$ при подаче на вход максимального напряжения, выдаваемого генератором FGEN.
- 5.11. Определите, какое сопротивление необходимо установить в цепи обратной связи ограничителя, чтобы обеспечить ограничение за счет стабилитрона схемы? Приведите расчет.
- 5.12. В схеме усилителя-ограничителя, изображенной на рис. 3.90, убрали резистор $R27$. Как теперь будет выглядеть амплитудная характеристика схемы? Приведите для измененной схемы временные диаграммы входного гармонического напряжения и выходного напряжения.
- 5.13. В схеме формирователя нелинейной зависимости выходного сигнала от входного, в отличие от изображенной на рис. 3.92, нелинейный элемент (НЭ) и резистор R поменяли местами. Функциональная зависимость элемента между его током и падением напряжения на нем осталась прежней. Докажите, какая будет зависимость выходного напряжения от входного.
- 5.14. По каким причинам в схемах, обеспечивающих логарифмирование входного сигнала, вместо полупроводникового диода устанавливают транзисторную сборку? Приведите необходимые пояснения.
- 5.15. Определите причины, по которым схема лабораторного эксперимента обеспечивает логарифмирование входного сигнала только одной полярности. Какой? Как нужно видоизменить схему, чтобы она логарифмировала входной сигнал другой полярности?
- 5.16. Каким образом нужно видоизменить схему, обеспечивающую логарифмирование входного сигнала, чтобы выходной сигнал был экспоненциальной функцией входного напряжения.
- 5.17. При поступлении в университет на экзамене по математике была широко использована формула $e^{\log x} = x$. Используя это выражение, предложите схему, выполняющую операцию $z = x \cdot y$.

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты измерений (таблицы, графики) и заключения по ним;
- выводы.

Модуль 5. Автогенераторы периодических колебаний

Лабораторная работа № 5.1

Автогенераторы синусоидальных колебаний на операционных усилителях

1. Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде NI ELVIS схем автогенераторов на ОУ, генерирующих гармонические и прямоугольные колебания.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования схемы автогенератора гармонических колебаний на ОУ с использованием функционального генератора (FGEN), осциллографа (Scope), анализатора амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (Bode Analyzer) и анализатора спектра (Dynamic Signal Analyzer – DSA);
- обработка полученных экспериментальных данных, подготовка и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

Исследуемые в этой лабораторной работе схемы принципиально отличаются от всех ранее анализируемых схем лабораторного цикла по аналоговой электронике. Отличительной особенностью изучаемых ранее схем, какие бы они не были пассивные или активные и какие бы преобразования они не выполняли, было то, что они требовали наличия на их входах сигналов. Другими словами, все схемы осуществляли определенные линейные или нелинейные преобразования над входным или входными сигналами, причем пассивные схемы осуществляли их без привлечения источников питания.

В этой лабораторной работе Вы исследуете другой класс схем – генераторов электрических сигналов, которые сами служат источниками измерительных, синхронизирующих и управляющих сигналов для схем

аналоговых, импульсных и цифровых устройств. В отличие от различных усилительных и преобразовательных схем, если исключить у генераторных схем задачи их управления, синхронизации, модуляции и т. п., в генераторах отсутствуют входы, куда ранее в предыдущих схемах извне подавался сигнал.

Существует следующее определение: генератором электрических сигналов называется устройство, посредством которого энергия источника питания преобразуется в электрические колебания определенной формы с заданной амплитудой и частотой. Однако такое определение подойдет и для усилительных устройств. На наш взгляд, необходимо добавить, что такое преобразование осуществляется исключительно за счет внутренних ресурсов схемы и при отсутствии традиционного входа и входного сигнала на нем. Говоря по существу, процессы в любой схеме усилителя или преобразователя входных сигналов описываются дифференциальным уравнением с правой частью. Процессы же в автогенераторах при указанных выше ограничениях будут описываться однородными дифференциальными уравнениями, т. е. с правой нулевой частью. Из этого четко подтверждается предыдущий вывод: параметры сигналов в генераторе определяются параметрами элементов его схемы.

В общем случае автогенератор генерирует сигналы произвольной формы. Однако наиболее часто возникает потребность в сигналах гармонической и прямоугольной форм. Автогенераторы синусоидальных колебаний будут исследоваться в данной лабораторной работе.

3.1. Задачи исследования

При исследовании любой схемы автогенератора появляются следующие вопросы:

- При каких условиях возникают колебания в исследуемой схеме автогенератора?
- По какому закону нарастают колебания от их возникновения до стационарной амплитуды?
- Как определить стационарное (установившееся) значение выходного напряжения автогенератора?
- Насколько устойчивы параметры установившегося выходного напряжения автогенератора и, прежде всего, его частоты и амплитуды? Другими словами, речь идет о стабилизации частоты и амплитуды напряжения автогенератора.

Указанные задачи являются классическими. Они могут быть дополнены вопросами, специфическими для конкретной исследуемой схемы.

3.2. *RC*-автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

3.2.1. О составе автогенератора

Прежде всего, Вас должен заинтересовать ответ на вопрос: «А что должно обязательно входить в состав схемы любого автогенератора гармонических колебаний?» Рассуждения на этот счет могут быть следующими.

Раз в идеальном случае автогенератор должен генерировать синусоидальные колебания на одной избранной пользователем частоте, то в составе схемы мы должны обнаружить линейную избирательную цепь и избирательный усилитель, на ней построенный.

Чтобы обеспечить условия неустойчивости такого усилителя, последний должен быть охвачен цепью положительной обратной связи на частоте «квазирезонанса» и, к тому же, иметь на этой частоте петлевое усиление, превышающее единицу. Если эти условия имеют место, то будут нарастать колебания в автогенераторе по тому или иному закону.

Однако в линейной схеме нарастание колебаний будет происходить до бесконечности, так как линейные элементы не изменяют своих параметров от значений тока или напряжения. Значит, в составе схемы любого автогенератора должна присутствовать нелинейность, которая и возьмет на себя ответственность за получение требуемой стационарной амплитуды гармонического колебания.

Однако и это еще не все. Если заинтересоваться стабилизацией значения (действующего, амплитудного, средневыпрямленного) выходного напряжения автогенератора, то в схеме можно различить дополнительную цепь отрицательной обратной связи по выбранному интегральному или амплитудному значению сигнала, реализующую формирование отрицательной производной коэффициента передачи усилителя генератора от значения выходного напряжения.

Если отвлечься от оговоренного выше типа автогенератора гармонических колебаний, то при генерации таких колебаний актуальным становится вопрос о стабилизации их частоты. В автогенераторах, в которых избирательные цепи реализованы в виде элементов *LC*- или *RC*-базиса, стабильность частоты стационарных колебаний в основном обусловлена температурной и временной стабильностью этих элементов. Когда их стабильность не удовлетворяет пользователя, то обращают внимание на кварцевые генераторы, а затем на молекулярные.

В лабораторной работе будет исследоваться автогенератор, использующий в качестве избирательной *RC*-цепи Γ -образный четырехполюсник, известный как цепь Вина.

Схема автогенератора синусоидальных колебаний с цепью Вина изображена на рис. 3.97.

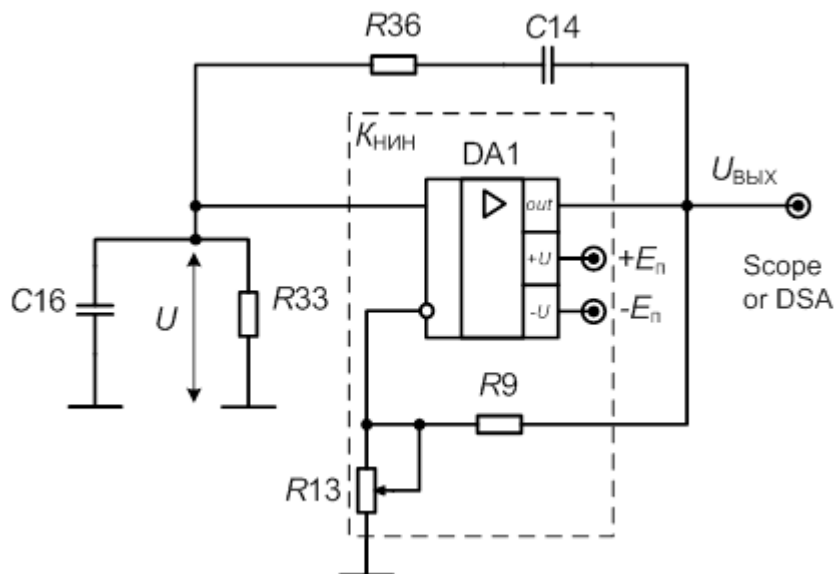


Рис. 3.97. Автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

В составе автогенератора находим избирательную цепь, которую можно исследовать на ее частотные свойства, рис. 3.98.

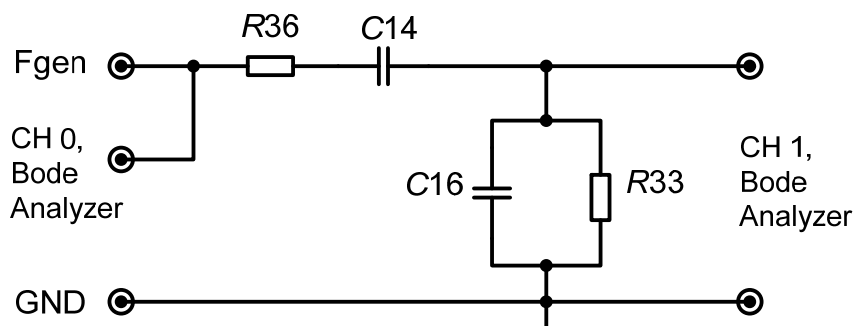


Рис. 3.98. Цепь Вина и схема исследования ее АЧХ и ФЧХ

Как видно из рис. 3.97, кроме цепи Вина в составе автогенератора находится неинвертирующий усилитель на ОУ (обозначен на схеме пунктиром). Цепь и неинвертирующий усилитель образуют петлю положительной обратной связи на частоте «квазирезонанса», когда передача цепи вещественна, а фазовый сдвиг равен нулю. С другой стороны, неинвертирующий усилитель образуется, когда ОУ охватывается цепью последовательной отрицательной обратной связи по напряжению, в нашем случае, через сопротивления $R9$ и $R13$. Г-образный четырехполюсник, как цепь положительной обратной связи, и четырехполюсник из сопротивлений $R9$ и $R13$, как цепь отрицательной обратной связи, об-

разуют мостовую схему, баланс которой на частоте «квазирезонанса» зависит от значения сопротивления $R13$, рис. 3.99. При разбалансировке моста в ту или иную сторону изменяется фаза входного дифференциального напряжения ОУ на противоположную по знаку.

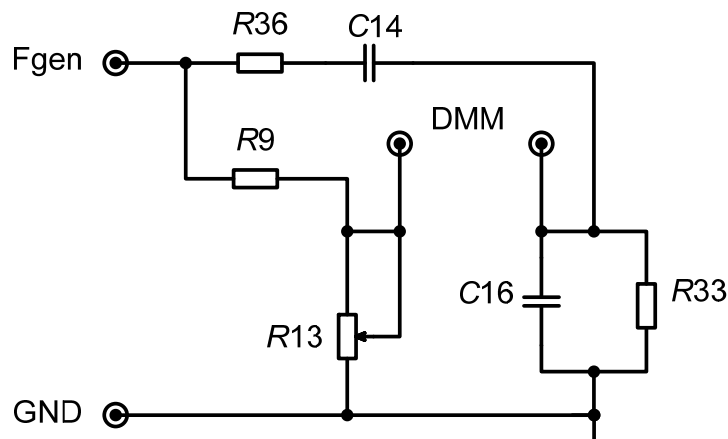


Рис. 3.99. Мостовая схема в RC-автогенераторе

Избирательный усилитель в схеме автогенератора просматривается в следующем виде на рис. 3.100.

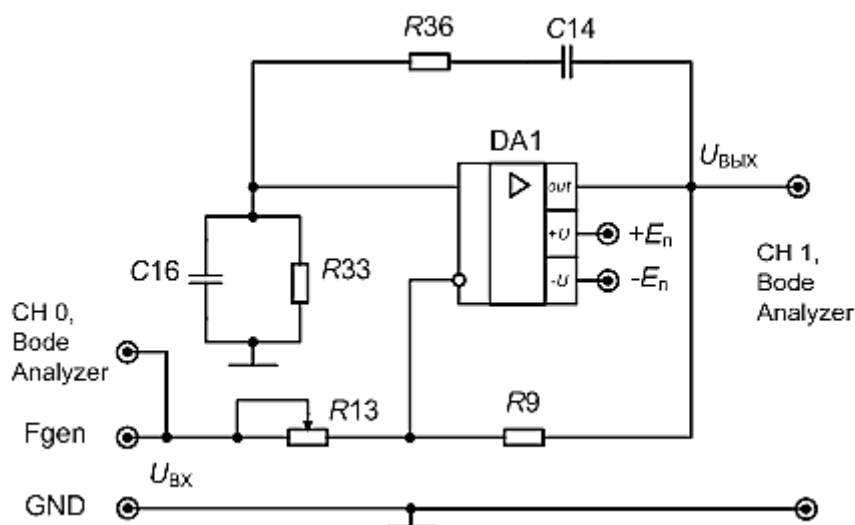


Рис. 3.100. Избирательный усилитель с Г-образной RC цепью Вина и схема его исследования

В схеме приведенного избирательного усилителя условие баланса фаз выполняется. Действительно, фазовый набег определяется как сумма фазовых сдвигов, вносимых цепью Вина и схемой на ОУ при его неинвертирующем включении. Однако, как известно, при обозначенных ограничениях (без учета инерционности операционного усилителя на частоте «квазирезонанса») оба фазовых сдвига равны нулю.

Для того чтобы схема превратилась в автогенератор, выполнение условия баланса фаз является необходимым, но не достаточным. Для этого петлевое усиление вдоль цепи положительной обратной связи автогенератора должно превышать единицу. Это произойдет, когда $R9 > 2 \cdot R13$.

Действительно, петлевое усиление будет больше единицы, т. е. $T = K_{\text{НИН}} \cdot A_0 > 1$ при коэффициенте передачи цепи Вина на частоте «квазирезонанса» $A_0 = 1/3$, когда коэффициент передачи по напряжению неинвертирующего усилителя $K_{\text{НИН}} = 1 + R29/R13$ будет больше трех.

И, наконец, попытаемся разобраться, где в автогенераторе находится нелинейность. В приведенной схеме цепи обратных связей собраны из линейных элементов. Значит, ограничение амплитуды выходных колебаний будет происходить из-за нелинейности амплитудной характеристики неинвертирующего усилителя.

3.2.2. Условия возникновения колебаний

Классическим способом решения этой задачи является составление дифференциального уравнения. Из-за малости амплитуд сигналов при их возникновении дифференциальное уравнение будет линейным (точнее, линеаризованным), несмотря на наличие нелинейности в составе автогенератора. Для данной схемы уравнение удобно составлять для напряжения U , действующего на неинвертирующем входе ОУ (рис. 3.97).

Ток, протекающий через $C14$ и $R36$ цепи Вина, если $R33 = R36 = R$ и $C16 = C14 = C$, равен $I = \frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt}$. Тогда:

$$U_{\text{вых}} = U + U_C + U_R = 2 \cdot U + R \cdot C \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int \left(\frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt} \right) \cdot dt.$$

С другой стороны: $U_{\text{вых}} = U \cdot K_{\text{НИН}}$.

Учитывая полученные выражения, имеем дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 U}{dt^2} + \frac{3 - K_{\text{НИН}}}{\tau} \cdot \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 \cdot U = 0,$$

где $\tau = R \cdot C$ – постоянная времени; ω_0 – частота «квазирезонанса».

Характеристическое уравнение принимает вид:

$$a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0,$$

где $a_2 = 1$; $a_1 = (3 - K_{\text{НИН}}) / \tau$; $a_0 = \omega_0^2$, а его решение (корни):

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 - a_0}.$$

Согласно полученным корням автогенератор будет неустойчивым при $a_2 > 0$, если a_0 – отрицательно. Последнее происходит, когда $K_{\text{нин}} = 1 + \frac{R9}{R13} > 3$, т. е. когда $R9 > 2 \cdot R13$, что и было использовано ранее.

Другими словами, любая система, а в нашем случае автогенератор, будет неустойчивой «в малом» (по Ляпунову), если хотя бы один корень ее характеристического уравнения находится в правой части комплексной плоскости, т. е. имеет положительную вещественную часть. Именно в этом случае с течением времени амплитуда колебаний в линейной системе будет неограниченно нарастать.

Действительно, условие $K_{\text{нин}} > 3$ легко переводится в условие, когда петлевое усиление $T = K_{\text{нин}} \cdot A_0 > 1$, учитывая, что передача цепи Вина на частоте «квазирезонанса» $A_0 = 1/3$.

Во временной области, когда колебания только начали нарастать и их амплитуда мала, система – линейна. Коль скоро за период колебаний энергия, вносимая в колебательную систему, больше теряемой энергии, то амплитуда колебаний нарастает и нас начинает интересовать закон такого нарастания.

3.2.3. По какому закону могут нарастать колебания в автогенераторе?

К сожалению, для решения этой задачи приходится составлять нелинейное дифференциальное уравнение, строгое решение которого в общем виде отсутствует.

Однако, учитывая, что в автогенераторах обычно стараются использовать высокодобротные избирательные усилители, такое уравнение получается специфическим – с относительно малым коэффициентом a_1 (с малыми потерями, с малой диссипацией) при первой производной в дифференциальном уравнении второго порядка.

Такие уравнения получили название уравнений Ван дер Поля. Именно для этих уравнений разработан ряд методов приближенных решений и, в частности, метод медленно меняющихся амплитуд.

Аналитические выкладки можно значительно упростить, если заинтересоваться только видом переходного процесса вблизи момента возникновения колебаний, когда еще можно воспользоваться линеаризованным дифференциальным уравнением.

Используя полученные в предыдущем разделе значения корней характеристического уравнения, зададимся получением ответа на вопрос: «Какой закон – колебательный или апериодический – может наблюдаться в непосредственной близости к моменту возникновения колебаний?»

Когда $(a_1/2)^2 \ll (a_0)^2$, то корни комплексно сопряженные. В этом случае от начала возникновения колебаний переходный процесс развивается как колебательный на частоте, незначительно отличающейся от частоты «квазирезонанса» цепи Вина (конечно считая, что на этой частоте ОУ не вносит фазового сдвига, т. е. является идеальным). Однако, если декремент (подкоренное выражение корней характеристического уравнения) станет равным нулю, то, начиная с этого момента, процесс станет апериодическим.

Как нетрудно убедиться на основе простейших выкладок, это произойдет, когда коэффициент усиления по неинвертирующему входу $K_{\text{нин}}$ будет больше пяти. Ясно, что переходный процесс будет происходить по гармоническому закону с нарастающей по экспоненте амплитудой при условии, если $3 < K_{\text{нин}} < 5$. При усилении $K_{\text{нин}} > 5$ мы должны наблюдать апериодический закон нарастания.

Учитывая, что усиление $K_{\text{нин}}$ легко изменяется за счет вариации сопротивления потенциометра R_{13} , мы можем попытаться пронаблюдать разницу в работе автогенератора в двух указанных выше режимах. По мере нарастания амплитуды гармонического напряжения во время переходного процесса, связанного с возникновением колебаний в автогенераторе, из-за влияния нелинейности коэффициент передачи по напряжению падает. С физической точки зрения последнее означает, что введение энергии в колебательную систему автогенератора также уменьшается. Очевидно, что стационарное значение выходного напряжения в автогенераторе наступит при равенстве вносимой и теряемой энергий за период генерируемых колебаний. Такая ситуация будет иметь место, если коэффициент a_1 при первой производной дифференциального или характеристического уравнений станет равным нулю. Таким образом, нарастание колебаний заканчивается в рассматриваемой схеме при условиях, когда наряду с балансом фаз выполняется условие баланса амплитуд:

$$K_{\text{нин}} = 3 \text{ или } K_{\text{нин}} \cdot A_0 = 1,$$

где $K_{\text{нин}}$ – передача неинвертирующего усилителя по напряжению по первой гармонике выходного напряжения.

3.2.4. *К определению амплитуды установившихся колебаний*

Выше отмечалось, что процесс установления стационарной амплитуды колебаний в автогенераторе обусловлен влиянием нелинейности, обязательно входящей в состав любого автогенератора. Из-за влияния нелинейности амплитудной характеристики схемы неинвертирующего включения ОУ по мере нарастания амплитуды гармонического колебания от периода к периоду возрастают нелинейные искажения выходного сигнала. Искажения формы сигнала особенно становятся заметными,

если амплитуда выходного сигнала достигает предельных значений на амплитудной характеристике схемы на ОУ. В этом случае выходное напряжение имеет явные признаки двухстороннего ограничения (при симметричном питании ОУ).

Для определения стационарной амплитуды выходных колебаний необходимо теоретически или экспериментально получить так называемую колебательную характеристику неинвертирующего усилителя, т. е. зависимость значения первой гармоники выходного напряжения (в общем случае несинусоидального – «квазисинусоидального») от значения входного гармонического напряжения. Мы трансформируем эту зависимость в виде $K_1 = f(U)$, где K_1 определяется как отношение значения первой гармоники выходного напряжения к входному гармоническому напряжению U , действующему на неинвертирующем входе ОУ.

В программно-аппаратной среде NI ELVIS измерение первой гармоники в спектре выходного напряжения более точно определяется с помощью анализатора спектра DSA.

Однако, при относительно малых значениях нелинейных искажений сигнала (коэффициента THD при использовании анализатора спектра DSA), меньших, например, 10 %, можно без существенной погрешности подменить измерение первой гармоники измерением среднеквадратического (действующего) значения (С.К.З.) выходного напряжения.

Таким образом, под K_1 в лабораторной работе мы будем подразумевать отношение С.К.З. (RMS) выходного напряжения к такому же значению входного. Чтобы не вносить дополнительной погрешности в измерение С.К.З. (RMS) напряжений из-за возможного присутствия в них постоянной составляющей, целесообразно определение значений проводить при закрытом входе осциллографа.

Экспериментальную зависимость $K_1 = f(U)$ получаем, проводя исследования неинвертирующего усилителя, как части автогенератора (рис. 3.101). Затем, используя условие баланса амплитуд, определяем значение стационарной амплитуды $U_{ст}$ как координату точки пересечения кривой колебательной характеристики и линии обратной связи $1/A_0 = 3$. Эти построения проведены на рис. 3.102.

Обратим внимание, что при указанном виде колебательной характеристики полученное стационарное решение, как правило, является устойчивым. Действительно, если из-за любых дестабилизирующих факторов значение амплитуды U , например, уменьшится, то, возводя перпендикуляр в этой точке, получим значение усиления K_1 больше трех. Тогда петлевое усиление станет больше единицы и создадутся условия увеличения напряжения до стационарного значения.

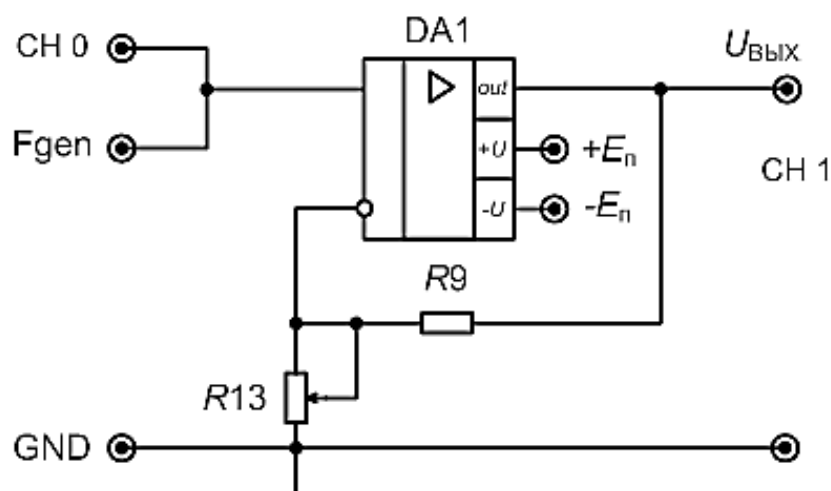


Рис. 3.101. Схема для снятия колебательной характеристики неинвертирующего усилителя автогенератора

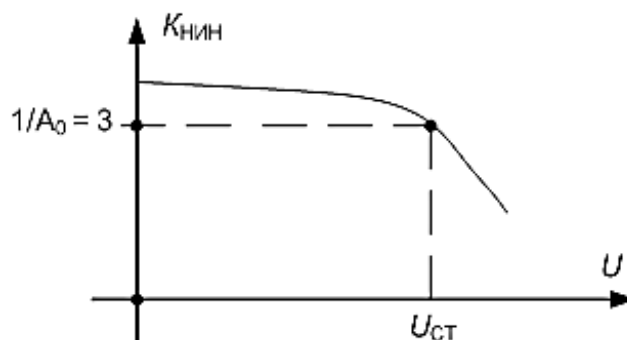


Рис. 3.102. Определение амплитуды стационарных колебаний

Аналогичные рассуждения можно провести для случая первоначального отклонения от стационарной амплитуды в большую сторону. Однако, если при работе автогенератора стационарная точка «проскакивается», то стационарное решение является неустойчивым, а автогенератор работает в режиме прерывистой генерации.

3.2.5. Стабилизация амплитуды колебаний в автогенераторе

Более конкретно речь идет о стабилизации различных значений стационарных гармонических колебаний. Как известно, такими значениями могут быть амплитудное, действующее (среднеквадратическое), а также средневывпрямленное значения выходного напряжения автогенератора. При изучении устойчивости стационарного напряжения автогенератора было отмечено важное положение о том, что, если по каким-либо причинам напряжение уменьшилось (увеличилось), необходимо, чтобы усиление неинвертирующего усилителя автогенератора увеличилось (уменьшилось).

На этом основании можно сделать вывод: для стабилизации выходного напряжения необходимо, чтобы в схеме реализовывалась отрицательная производная коэффициента передачи усилителя по напряжению, т. е. стабилизация напряжения сопряжена с наличием контура отрицательной обратной связи.

Среди возможных технических реализаций отметим две: с использованием в обратной связи инерционно нелинейного элемента, как правило, малогабаритных ламп накаливания или термисторов или применением различных схем стабилизации с необходимым типом детектора (выпрямителя того или иного значения гармонического колебания) и регулятора на полевом транзисторе.

Примеры построения таких схем изображены на рис. 3.103 и 3.104 соответственно.

Для схемы на рис. 3.103 механизм стабилизации действующего значения выходного напряжения состоит в следующем. Если по каким-либо причинам выходное напряжение уменьшится, то уменьшится ток в цепи отрицательной обратной связи, в том числе и ток, протекающий по лампе накаливания (ЛН). Как известно, при этом уменьшится ее сопротивление, а значит, и коэффициент отрицательной обратной связи. В свою очередь, это приведет к увеличению K_y , а значит, и выходного напряжения.

Таким образом, уменьшение напряжения вызвало увеличение коэффициента усиления, т. е. в схеме реализована отрицательная производная коэффициента передачи усилителя по напряжению, что необходимо для целей стабилизации выходного напряжения.

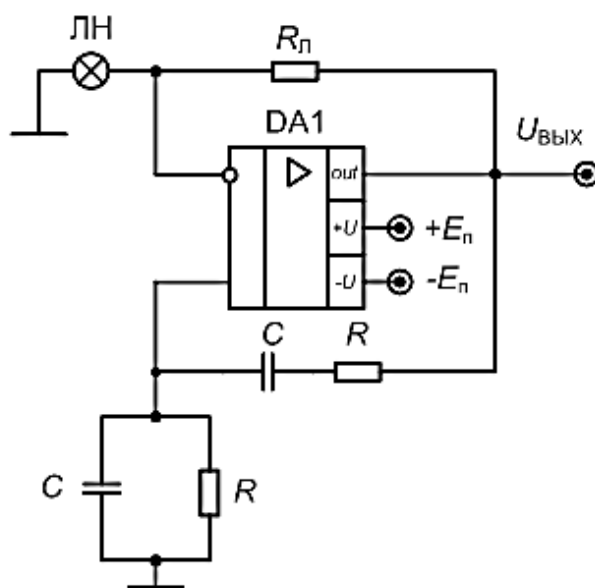


Рис. 3.103. Автогенератор с инерционной нелинейностью

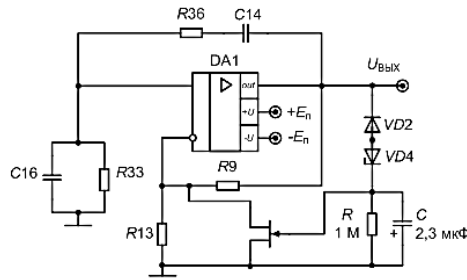


Рис. 3.104. Стабилизация напряжения с использованием регулятора на полевом транзисторе

Схема, показанная на рис. 3.104, в цепи отрицательной обратной связи содержит схему однополупериодного выпрямителя на $VD2$ для получения постоянной составляющей отрицательной полярности, которая за вычетом напряжения на стабилитроне $VD4$ управляет полевым транзистором, работающим в режиме электрически управляемого сопротивления, установленного в местную обратную связь неинвертирующего ОУ.

Стабилизация средневывпрямленного значения выходного напряжения происходит так. Если напряжение генератора уменьшилось, то уменьшилось постоянное напряжение на выходе выпрямителя и на затворе полевого транзистора. Полевой транзистор приоткрылся, сопротивление его канала уменьшилось, что привело к уменьшению глубины обратной связи для ОУ и увеличению усиления неинвертирующего усилителя, а значит, и выходного напряжения.

Начав рассуждения с уменьшения выходного напряжения, мы, пройдя по цепи обратной связи, пришли к выводу, что схема стремится вернуть прежний уровень выходного напряжения.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации программы откройте панель комплекта измерительных приборов.

4.2. Исследование характеристик цепи Вина

Проводится, если не выполнялся п. 4.6 лабораторной работы № 4.2. «Функциональное применение операционных усилителей (линейные преобразования сигналов)».

- Проведите анализ цепи Вина (домашняя проработка). Определите частоту «квазирезонанса» RC -цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте «квазирезонанса». Теоретически определите добротность цепи и ожидаемый вид АЧХ и ФЧХ.

- Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 3.98.
- Вызовите анализатор Боде.
- На виртуальной панели анализатора установите амплитуду гармонического сигнала 2,5 В. Задайте автоматический режим работы по Y-Scale. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Гц, конечную частоту 10 000 Гц и число шагов за декаду 20. Установите также новые значения частот в Гц по осям АЧХ и ФЧХ: слева – 100, справа – 10 000.
- Запустите в работу анализатор. Сравните полученные и ожидаемые характеристики. Сохраните экспериментальные данные и графики АЧХ и ФЧХ.
- По экспериментальным данным уточните частоту «квазирезонанса» избирательной цепи и определите ее добротность. Добротность определите следующим образом: по нулевому фазовому сдвигу на ФЧХ уточните частоту «квазирезонанса» и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте. Затем от полученного значения отнимите 3 дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания цепи, а потом и саму полосу как разность полученных значений. Добротность приблизительно определяется как отношение частоты «квазирезонанса» цепи к полосе ее пропускания. Совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные? Сделайте выводы по проделанному исследованию.

4.3. Исследование автогенератора гармонических колебаний

4.3.1. Исследование условий возникновения колебаний

Подготовительные исследования:

- Вызовите цифровой мультиметр DMM, установив режим Resistance для измерения сопротивлений.
- Проведите измерение сопротивления R_9 , а затем, измеряя сопротивление R_{13} , найдите и запомните положение движка потенциометра R_{13} , когда его сопротивление составляет половину сопротивления R_9 и усиление неинвертирующего усилителя будет равно 3. Найдите также и запомните положение движка потенциометра, когда сопротивление R_9 в четыре раза больше сопротивления R_{13} и коэффициент усиления неинвертирующего усилителя станет равным 5. Установите также направление вращения движка потенциометра, при котором, например, его сопротивление увеличивается.
- Соберите схему для исследования моста Вина, изображенную на рис. 3.99.
- Установите у цифрового мультиметра режим измерения напряжения переменного тока (AC Voltage).

- Вызовите и включите генератор FGEN, установите значение рассчитанной ранее частоты «квазирезонанса» для цепи Вина и максимальную амплитуду (2,5 В) гармонического напряжения.
- Установите движок потенциометра R_{13} в положение, когда его сопротивление примерно составляет половину сопротивления R_9 , а затем, вращая движок, сбалансируйте мост. Зафиксируйте значение минимального напряжения. Почему оно не равно нулю? Совпало ли положение движка с исходным положением (в начале пункта). Отметьте, что разбалансировка моста приводит к увеличению выходного напряжения моста и к изменению его фазы на инверсное значение.
- Проверьте, что при балансе моста напряжение на выходе цепи Вина и резистивного делителя составляет определенную долю (какую?) от входного напряжения, получаемого с генератора. Чтобы выполнить этот пункт, подсоединяйте поочередно DMM к входу и к одному или другому выходу моста. Полученные данные зафиксируйте и сравните их с теоретическими значениями.

4.3.2. Исследование разомкнутой системы автогенератора, получение условий возникновения колебаний в автогенераторе

- В схеме автогенератора отсоедините цепь Вина от выхода ОУ для исследования условий возникновения колебаний по поведению АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы. С этой целью соберите схему, изображенную на рис. 3.105, и оставьте в ней соединения, необходимые для использования анализатора Боде.

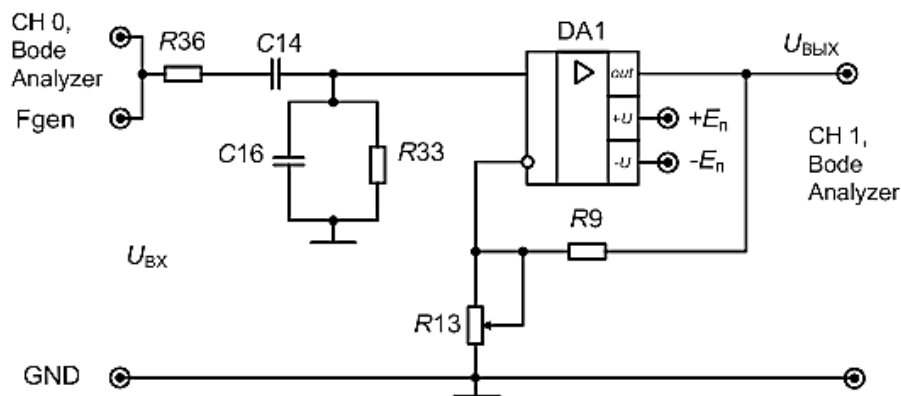


Рис. 3.105. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы автогенератора

- Вызовите из меню виртуальных приборов анализатор Боде. На виртуальной панели анализатора установите амплитуду гармонического сигнала 2,5 В. Задайте автоматический режим работы по Y-Scale. Поставьте начальную частоту сигнала 100 Гц, конечную частоту 10 000 Гц

и число шагов за декаду 20. Установите также новые значения частот в Гц по осям АЧХ и ФЧХ: слева – 100, справа – 10 000.

- Установите движок потенциометра $R13$ в положение, когда его сопротивление больше половины сопротивления $R9$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя меньше 3.

- Запустите анализатор Боде. На полученной ФЧХ по нулевому фазовому сдвигу определите частоту «квазирезонанса», а затем на этой частоте переместитесь на АЧХ петлевого усиления и определите его значение. Если это значение меньше единицы, то, несмотря на выполнение условия баланса фаз, при замыкании петли обратной связи генерация колебаний будет отсутствовать, так как не выполняются необходимые амплитудные соотношения. Выключите питание станции.

- Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т.е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 3.97. Вместо анализатора Боде выберите из меню осциллограф. Включите питание станции и убедитесь в отсутствии колебаний.

- Вернитесь снова к схеме рисунка 3.105, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R13$ было чуть-чуть меньше половины сопротивления $R9$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

- Далее сделайте аналогичные действия с анализатором Боде, а затем соберите схему автогенератора (рис. 3.97) и включите осциллограф. Почему генератор заработал? Попробуйте уменьшить искажения в выходном сигнале. Что при этом получается?

- Снова вернитесь к схеме рисунка 3.105, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R13$ было равно чуть меньше одной четверти сопротивления $R9$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 5.

- Сделайте аналогичные действия, как в предыдущих пунктах. Сформулируйте выводы по выполненному разделу.

4.3.3. Определение стационарной амплитуды колебаний автогенератора

Исследование колебательной характеристики неинвертирующего усилителя:

- Соберите схему, изображенную на рис. 3.101. Положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R13$ было чуть-чуть меньше половины сопротивления $R9$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

- Вызовите из меню виртуальных приборов генератор и осциллограф. На лицевой панели генератора установите частоту гармонического сигнала, равную (близкую) частоте «квазирезонанса» цепи Вина. Канал СН 0 переведите на наблюдение действующего значения входно-

го напряжения. Входы обоих каналов осциллографа закройте, т. е. переведите в режим АС.

- Получите данные исследуемой характеристики, изменяя амплитуду входного напряжения генератора от 0,2 до 2,4 В через 0,2 В. Для каждого уровня входного напряжения регистрируйте действующее значение входного и выходного напряжений, используя измерители осциллографа, а затем рассчитывайте коэффициент усиления как отношение полученных значений. Разработайте вид таблицы, внесите в нее данные, а потом по ним постройте график.

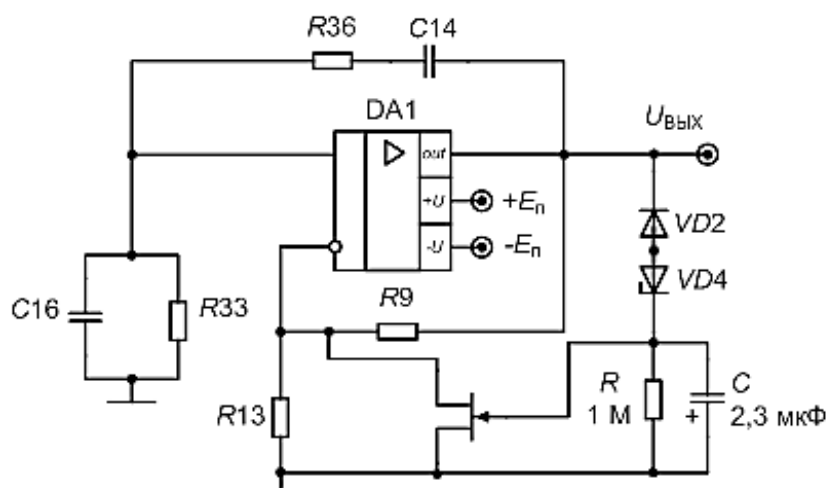
- Определите по колебательной характеристике действующее значение выходного напряжения, используя линию положительной обратной связи, которая определяется коэффициентом передачи цепи Вина на частоте «квазирезонанса».

- Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т. е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 3.97. Для наблюдения и измерения действующего значения выходного напряжения используйте осциллограф в режиме АС. Сравните значения выходного напряжения, полученные в этом и предыдущем пунктах. Сделайте выводы.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Назовите части, из которых должен состоять любой автогенератор синусоидальных колебаний.
- 5.2. Каким образом экспериментально определяются частотные свойства цепи Вина? Приведите схему и алгоритм исследования.
- 5.3. Аналитически определите выражения для АЧХ и ФЧХ цепи Вина. Чему равна эквивалентная добротность этой RC -цепи?
- 5.4. Каким образом экспериментально определяются частотные свойства избирательного усилителя на цепи Вина? Приведите схему и алгоритм исследования.
- 5.5. Докажите, что в анализируемой схеме автогенератора выполняется условие баланса фаз.
- 5.6. Составьте дифференциальное уравнение схемы анализируемого автогенератора.
- 5.7. Сформулируйте условия возникновения автоколебаний на основе анализа дифференциального и характеристического уравнений, описывающих работу автогенератора.
- 5.8. Рассчитайте значение сопротивления R_{13} , приводящее к возникновению колебаний в схеме. Поясните Вашу последовательность действий по определению такого положения движка потенциометра R_{13} .
- 5.9. Поясните, каким образом с использованием анализатора Боде будет определена частота «квазирезонанса» при исследовании АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы автогенератора.

- 5.10. Сформулируйте, как ведет себя схема автогенератора, когда проводится эксперимент с разными положениями движка потенциометра $R13$.
- 5.11. Докажите, что состояние после включения автогенератора будет неустойчивым, если анализ его дифференциального уравнения фиксирует наличие хотя бы одного корня характеристического уравнения, находящегося в _____ части комплексной плоскости.
- 5.12. Поясните, почему при анализе переходного процесса и определении установившихся значений колебаний в автогенераторе обязательно должна учитываться нелинейность.
- 5.13. Каким образом в ходе лабораторной работы определяется колебательная характеристика усилителя автогенератора?
- 5.14. Как, используя колебательную характеристику усилителя автогенератора, определить амплитуду установившихся колебаний?
- 5.15. Определите условия, при которых в автогенераторе устанавливается стационарный режим работы.



- 5.16. Проанализируйте работу схемы, приведенную выше. Поясните формирование отрицательной производной коэффициента передачи неинвертирующего усилителя автогенератора от уровня выходного напряжения, которое необходимо для стабилизации его амплитуды.

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты (таблицы, графики, заключения);
- выводы.

Модуль 5. Автогенераторы периодических колебаний

Лабораторная работа № 5.2

Автогенераторы прямоугольных колебаний на операционных усилителях

1. Цель работы

Овладение методикой исследования в программно-аппаратной среде NI ELVIS схем автогенераторов на ОУ, генерирующих гармонические и прямоугольные колебания.

2. Задачи исследования

- подготовка к лабораторной работе, т. е. формирование знаний и пониманий процессов, происходящих в исследуемой схеме;
- проработка разделов порядка выполнения работы. Поиск ответов по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- приобретение навыков исследования схем с ОУ с использованием функционального генератора (FGEN), осциллографа (Scope), анализатора амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик – АЧХ/ФЧХ (Bode Analyzer) и анализатора спектра (Dynamic Signal Analyzer – DSA);
- обработка экспериментальных данных и защита отчета.

3. Краткие сведения из теории

3.1. Общие положения

Прежде чем мы выйдем на конкретные схемы таких автогенераторов импульсных сигналов, подметим ряд особенностей сигналов прямоугольной формы, рис. 3.106.

Как видно из рисунка, для импульсного сигнала такой формы можно ввести следующие параметры: $T = 1/f$ – период колебаний, f – частота следования, $t_{\text{и}}$ – длительность импульса, $t_{\text{п}}$ – длительность паузы, $Q = T/t_{\text{и}}$ – скважность. Если длительности импульса и паузы одинаковы, то скважность равна двум, и для такого сигнала может быть использован термин «меандр».

Из рис. 3.106 следует, что идеализированное прямоугольное напряжение содержит участки с большой (бесконечно большой) производной (фронты – передний и задний) и участки с малой (нулевой) производной – вершины импульса и паузы.

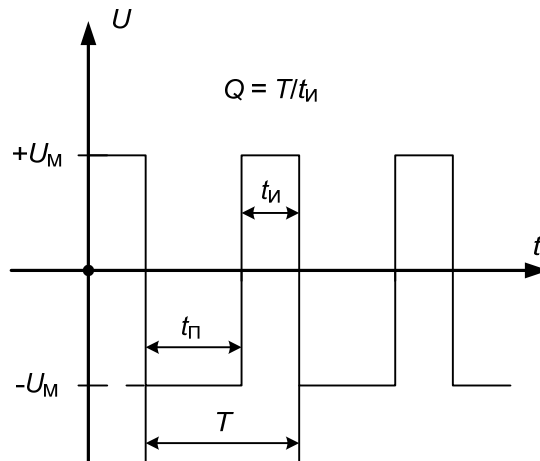


Рис. 3.106. График разнополярного прямоугольного напряжения

Пусть при $t = 0$ (жирная точка на графике рис. 3.106) была включена схема импульсного генератора. Как видно из рисунка, должен пройти быстрый процесс нарастания напряжения до некоторого максимального уровня $+U_M$.

Значит, при включении состояние автогенератора должно быть неустойчивым за счет присутствия в схеме эффективно действующей положительной обратной связи. При этом закон формирования фронта может быть и аperiodическим, и критическим, и даже колебательным, но относительно быстрым, что косвенно отражает слабую инерционность работы задействованных в регенеративном процессе элементов схемы.

Когда закончится процесс формирования фронта? Когда физически все время существующая в схеме положительная обратная связь, постепенно снижая петлевое усиление за счет нелинейности амплитудной характеристики, практически «исчезнет» из-за того, что усилительные элементы, находящиеся в петле обратной связи, потеряют свои усилительные свойства. К примеру, это произойдет, когда во время регенеративного процесса часть биполярных транзисторов из усилительного режима перейдет в режим насыщения, а часть из усилительного режима — в режим отсечки.

Итак, быстрые процессы формирования фронтов импульсного сигнала приводят к «выключению» усилительных свойств у транзисторов и к достижению максимальных значений напряжений положительной или отрицательной полярности. Эти же процессы должны запустить «внутренние часы» импульсного автогенератора, ответственные за формирование длительностей импульса и паузы, а значит, периода и частоты следования импульсов.

Такие «часы» в большинстве схем автогенераторов обусловлены процессами перезаряда емкостей, имеющих исходные начальные усло-

вия, доставшиеся им из конечных условий, предшествовавших аналогичному переходному процессу, так как емкости практически не могут изменить свое напряжение во время относительно очень коротких длительностей фронтов.

Другими словами, один временно устойчивый процесс, например формирования длительности импульса, завершается, когда напряжение на емкости достигает определенного значения, что фиксируется устройством сравнения – компаратором. В этот момент усилительные свойства транзисторов уже восстановились, вновь создаются условия неустойчивости, развивается регенеративный процесс смены состояний, в результате которого мы переходим к другому временно устойчивому состоянию – формированию длительности паузы и т. д.

3.2. Импульсный автогенератор на ОУ

Классическая схема генератора прямоугольных напряжений на ОУ изображена на рис. 3.107.

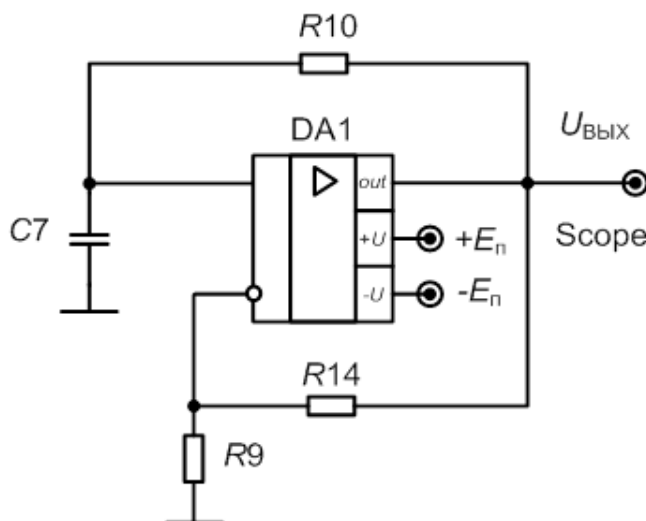


Рис. 3.107. Схема импульсного автогенератора

На рис. 3.107 видно, что ОУ охвачен двумя цепями ОС:

- первая цепь – безинерционная, с элементами $R14$ и $R9$ образует положительную ОС (ПОС);
- вторая цепь – инерционная, с элементами $R10$ и $C7$, образует ООС.

ОУ, охваченный ПОС, представляет собой компаратор с гистерезисом (схема приведена на рис. 3.84, а на рис. 3.83 – его характеристика).

При включении схемы (рис. 3.107) напряжение на емкости скачком измениться не может. Значит, инвертирующий вход ОУ для анализа переходного процесса практически заземлен. Тогда, считая, что инерционность ОУ определяется звеном первого порядка с постоянной времени τ_y ,

т. е., например, звеном типа интегрирующей RC -цепи, можно составить дифференциальное уравнение относительно выходного напряжения:

$$\tau_y (du/dt) + (1 - \gamma \cdot K(0))u = 0,$$

где $K(0)$ – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе, т. к. $K(0) \gg 1$, то в характеристическом уравнении $\tau_y p - \gamma K(0) = 0$ единственный корень находится в правой части комплексной плоскости, что говорит о том, что система неустойчива и будет формироваться апериодический фронт импульса, достигая при этом максимального уровня выходного напряжения ОУ ($+E_1$ или $-E_2$).

Пусть установится напряжение $+E_1$, тогда на емкости, т. е. на инвертирующем входе ОУ (рис. 3.107), во время переходного процесса будет наблюдаться экспоненциальное нарастание положительного напряжения. В этом условно устойчивом состоянии, когда формируется длительность импульса, на неинвертирующем входе ОУ установлено опорное напряжение, равное γE_1 ($\gamma = R_9/(R_9 + R_{14})$) В. Значит, длительность импульса соответствует интервалу времени, пока емкость не будет заряжена до уровня опорного напряжения, тогда компаратор сработает и на выходе установится напряжение $-E_2$, а на неинвертирующем входе станет равно $-\gamma E_2$.

Итак, процесс формирования длительности импульса, начавшись с регенеративного процесса, который завершил процесс формирования паузы, закончится при граничном значении напряжения на емкости $U_{сгр} = \gamma E_1$, когда дифференциальное входное напряжение компаратора пройдет через нулевое значение. Компаратор при этом сработает, его выходное напряжение примет уровень $-E_2$, что повлечет смену опорного напряжения на $-\gamma E_2$, а автогенератор войдет в режим формирования паузы, когда емкость, перезаряжаясь от $+\gamma E_1$ по экспоненте, не прервет этот режим, достигнув напряжения $-\gamma E_2$. Указанные процессы подтверждаются временными диаграммами, изображенными на рис. 3.108.

Чтобы рассчитать длительность импульса, определим три характерных точки на диаграмме $U_C(t)$: $U_C(0) = -\gamma E_2$ – напряжение на емкости на начало формирования длительности импульса; $U_{сгр} = \gamma E_1$ – напряжение на конце этого интервала; $U_C(\infty) = +E_1$ – напряжение, до которого зарядилась бы емкость, если бы процесс ее заряда не был прерван срабатыванием компаратора. Тогда можно составить уравнение:

$$U_C(t) = U_C(\infty) - [U_C(\infty) - U_C(0)] \cdot e^{-t/\tau}.$$

Когда $t = t_{и}$, напряжение $U_C(t_{и}) = U_{сгр}$. Решив полученное уравнение относительно $t_{и}$, определите, от чего зависит этот временной интервал при формировании прямоугольного напряжения.

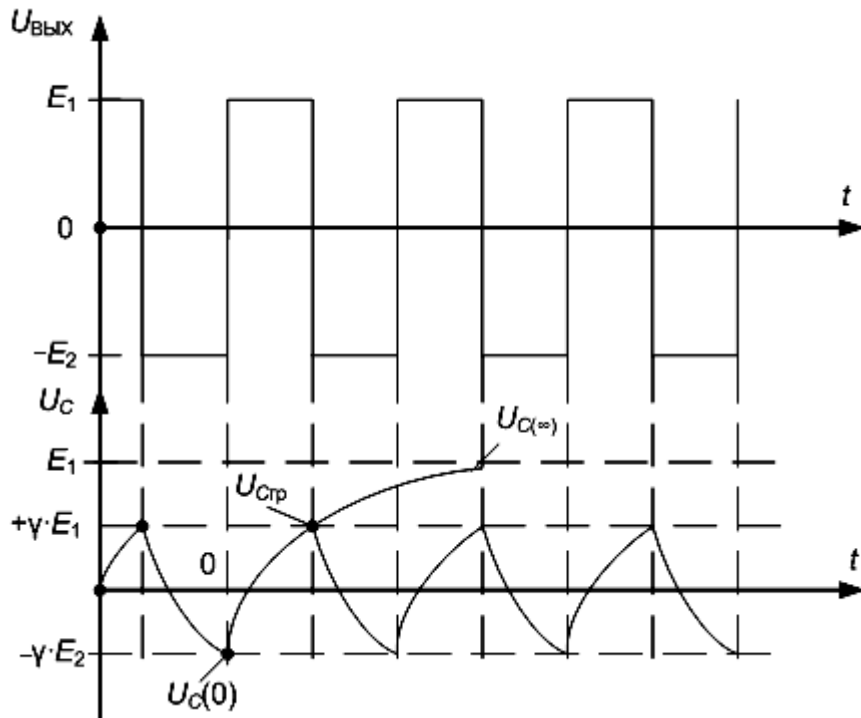


Рис. 3.108. Временные диаграммы сигналов генератора

Аналогичные выкладки проведите для определения длительности паузы. После этого легко найти период колебаний и частоту их следования.

3.3. Изменение параметров импульсов автогенератора

Анализ временных диаграмм напряжений автогенератора показывает, что изменение длительности импульсов или паузы можно осуществлять, если изменять постоянную времени цепи для отдельных временных интервалов импульсного напряжения или при неизменных параметрах RC -цепи получать для этих интервалов различные значения опорных напряжений.

Первый способ иллюстрирует схема, изображенная на рис. 3.109.

Если Вы не используете ни одну из перемычек, подключающих параллельно резистору $R10$ дополнительную цепь из резистора $R7$ и одного из диодов, то, как отмечалось выше, длительность и пауза импульса одинаковы, а скважность равна 2. Однако, если Вы подсоедините цепь с диодом $VD5$, то перезаряд емкости положительным напряжением произойдет с постоянной времени $\tau_+ = (R7 \parallel R10) \cdot C7$, а отрицательным — с постоянной $\tau_- = R10 \cdot C7$. При таком варианте длительность импульса будет короче длительности паузы. Используя другую перемычку, Вы получите противоположные соотношения. Если же включить обе перемычки, то скважность опять станет равной двум, но период и частота импульсов изменятся.

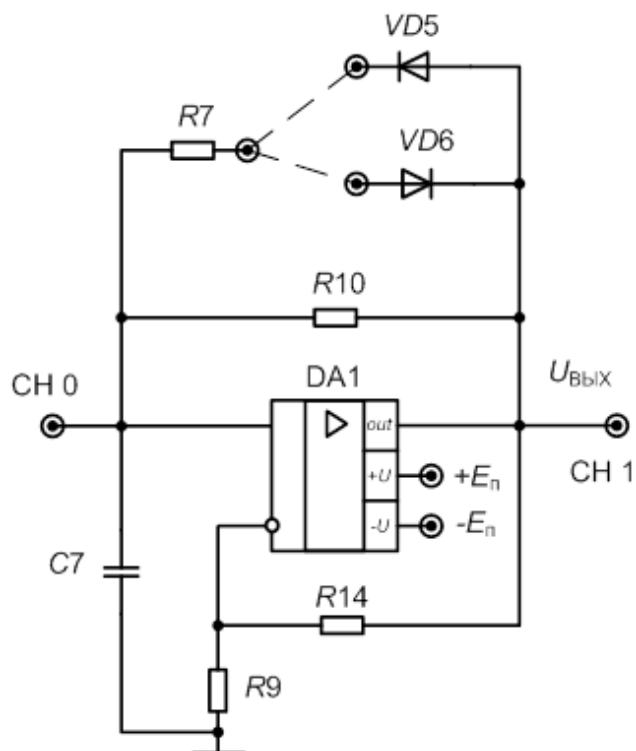


Рис. 3.109. Импульсный автогенератор с возможной регулировкой постоянной времени RC-цепи

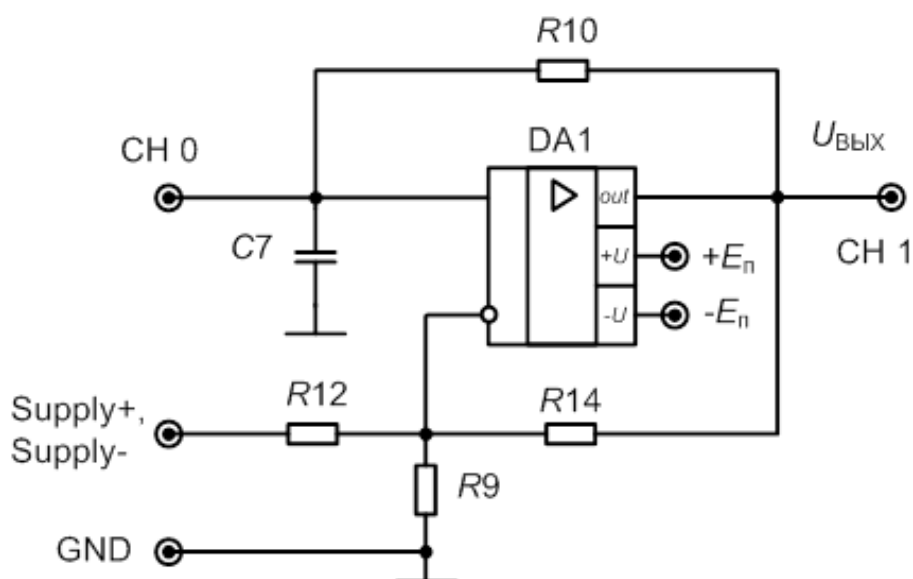


Рис. 3.110. Импульсный автогенератор с регулировкой опорного напряжения компаратора

Второй способ реализован в схеме рис. 3.110. В этой схеме на неинвертирующем входе ОУ происходит суммирование двух напряжений: одно из них ($U_{\text{ВХ}}$) поступает с источника VPS, а другое с выхода операционного усилителя ($U_{\text{ВЫХ}}$), которое будет разнополярным в зависимости от то-

го, формируется или длительность импульса или паузы. Таким образом, можно получить выражение для опорного напряжения компаратора:

$$U_{гр} = U_{вх} \cdot (R20 \parallel R21) / (R15 + R20 \parallel R21) + \\ + U_{вых} \cdot (R15 \parallel R21) / (R20 + R15 \parallel R21),$$

из которого следует возможность установки их разных значений для длительности импульса и паузы.

4. Программа лабораторной работы

4.1. Начало работы

- Включите питание для NI ELVIS.
- Запустите программное обеспечение NI ELVIS; после инициализации программы откройте панель комплекта измерительных приборов.

4.2. Импульсный автогенератор

4.2.1. Исследование работы схемы компаратора с гистерезисом

- Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 3.84.
- Вызовите из меню регулируемые источники питания (VPS) и осциллограф Scope. Обнулите с помощью Reset значение напряжения источника Supply+ и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора.
- Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. В ходе эксперимента используйте источники Supply+ и Supply-. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Полученные данные занесите в разработанную Вами таблицу. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

4.2.2. Исследование процессов в автогенераторе

- Соберите схему генератора, изображенную на рис. 3.107.
- Вызовите из меню осциллограф Scope.
- Получите временные диаграммы и поясните их ход в отчете. Определите по диаграммам значения опорных напряжений компаратора и параметры выходного напряжения.

4.2.3. Исследование схем с изменением параметров импульсов

Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 3.109, в ходе домашней подготовки, рассчитайте длительность импульса и период импульсов при подключении цепи с диодом VD5.

- Соберите схему такого импульсного генератора и с помощью осциллографа исследуйте временные диаграммы сигналов. Сравните полученные параметры импульсов с расчетными данными.

- Для схемы автогенератора, приведенной на рис. 3.109, в ходе домашней подготовки, рассчитайте длительность паузы и период импульсов при подключении цепи с диодом *VD6*.
- Соберите схему такого импульсного генератора и с помощью осциллографа исследуйте временные диаграммы сигналов. Сравните полученные параметры импульсов с расчетными данными.
- Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 3.109, рассчитайте частоту следования импульсов, если одновременно переключателями включены обе цепи с диодами *VD5* и *VD6*.
- Соберите схему такого импульсного генератора и, используя временные диаграммы, рассчитайте частоту следования импульсов и сравните их с теоретическим значением.
- Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 3.110, в ходе домашней подготовки, рассчитайте параметры импульсов при выбранном Вами значении Supply+ или Supply-.
- Соберите схему такого импульсного генератора и, используя временные диаграммы, рассчитайте параметры импульсов и сравните их с теоретическим значением.
- Пронаблюдайте, как изменяются временные диаграммы сигналов и параметры импульсов при изменении напряжения источников VPS. Сформулируйте выводы.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Какие процессы протекают во время формирования фронтов последовательности прямоугольных импульсов?
- 5.2. Укажите процессы, приводящие к формированию длительности импульсов и их паузы.
- 5.3. Для схемы автогенератора определите начальное, граничное и конечное условия, которые определяют длительность импульса прямоугольного напряжения.
- 5.4. Используя обозначения постоянной времени *RC*-цепи и коэффициента передачи цепи четырехполюсника положительной обратной связи, выведите выражение для расчета времени длительности импульса.
- 5.5. Каким образом можно изменять скважность импульсного напряжения в автогенераторе?
- 5.6. Поясните работу схем, в которых можно изменять скважность прямоугольных импульсов.
- 5.7. Как поставить лабораторный эксперимент для определения амплитудной характеристики компаратора автогенератора и нахождения напряжения его срабатывания?

5.8. Каким образом будет осуществлена синхронизация временных диаграмм сигналов автогенератора, полученных двухканальным осциллографом? Приведите временные диаграммы.

5.9. Для автогенератора с диодами в обратной связи рассчитайте длительность и период импульсов при подключении диода $VD5$.

5.10. Для схемы автогенератора рассчитайте частоту следования импульсов, если переключателями включены цепи с диодами $VD5$ и $VD6$.

5.11. Для схемы автогенератора рассчитайте параметры импульсов при выбранном Вами значении напряжения Supply+ или Supply-.

5.12. Как изменяются временные диаграммы сигналов и параметры импульсов в генераторе при изменении напряжения источников VPS?

5.13. Как с помощью осциллографа определить длительность фронтов прямоугольных импульсов?

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты (таблицы, графики, заключения);
- выводы.

Модуль 6. Усилители мощности

Лабораторная работа № 6.1

Исследование бестрансформаторных усилителей мощности

1. Цель работы

- получить навыки расчета и экспериментального определения мощностей и КПД в различных усилительных каскадах;
- сформировать выводы о путях повышения КПД в бестрансформаторных усилителях мощности;
- закрепить умения обработки результатов экспериментов и наглядного их представления.

2. Задачи работы

- подготовиться к лабораторной работе, т. е. знать и понимать процессы, происходящие в исследуемых схемах;
- проработать разделы порядка выполнения работы, отвечая по каждому пункту на вопросы: как его реально выполнить? Что должно быть получено в результате его выполнения (прогнозируемый результат)?;
- ответить на контрольные вопросы методических указаний;
- обработать полученные экспериментальные данные, подготовить и защитить отчет.

3. Краткие сведения для подготовки к лабораторной работе

3.1. Общие положения

Характерной чертой усилителей мощности является высокое абсолютное значение выходной мощности усиливаемого сигнала, от нескольких десятков до сотен ватт, приемлемые нелинейные искажения в заданном частотном диапазоне. При этом важнейшей характеристикой усилителя становится коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение мощности, выделяемой в нагрузке (P_n), к мощности, потребляемой от источника питания ($P_{ип}$) постоянного тока

$$\eta = \frac{P_n}{P_{ип}}.$$

Низкий КПД, означающий, что значительная часть энергии, потребляемой усилителем от источника питания, в процессе усиления тратится бесполезно на нагрев элементов усилителя, приводит к двум негативным последствиям. С одной стороны, сами по себе бесполезные

потери энергии являются экономическими потерями, а с другой – чрезмерный разогрев элементов может привести к их тепловому разрушению, для исключения которого необходимо применять специальные меры по охлаждению. Элементы системы охлаждения (радиаторы, вентиляторы) приводят к увеличению массы и габаритов, к дополнительному удорожанию усилителя.

3.2. Линейные усилители мощности

Под линейными обычно понимают усилители, в которых управляемые (активные, усилительные) элементы (УЭ) работают в непрерывном режиме. В линейных усилителях используют следующие режимы (классы) работы активных элементов: A , B , AB .

Класс A – режим, когда ток в выходной цепи активного элемента протекает в течение всего периода входного сигнала. Обязательно используется при разнополярных входных сигналах и одном активном элементе. Характеризуется сравнительно низким КПД и малыми нелинейными искажениями.

Класс B – режим работы активного элемента, при котором выходной ток протекает в течение половины периода входного сигнала. Характеризуется высоким КПД, но большими искажениями сигнала. Используют для усиления однополярных сигналов и при построении специальных двухтактных усилителей, для которых необходимо минимум два активных элемента.

Класс AB – выходной ток протекает больше, чем полпериода, но меньше периода действия входного сигнала. Для усиления разнополярных сигналов необходимы два активных элемента. Основные отличия: КПД больше, чем в классе A , но меньше, чем в классе B ; искажения значительно меньше, чем в классе B .

На рис. 3.111 приведены проходные характеристики активного элемента, показано положение рабочей точки и протекание выходных токов за период действия входного сигнала.

Обобщенные структурные схемы линейных усилителей с последовательным и параллельным включением нагрузки (H) изображены на рис. 3.112.

В схеме усилителей по рис. 3.112, a напряжение на нагрузке может иметь только одну полярность (за счет однополярного источника питания). В результате этого получение двуполярного (например, гармонического) сигнала в нагрузке возможно лишь с постоянным «пьедесталом» (рис. 3.113).

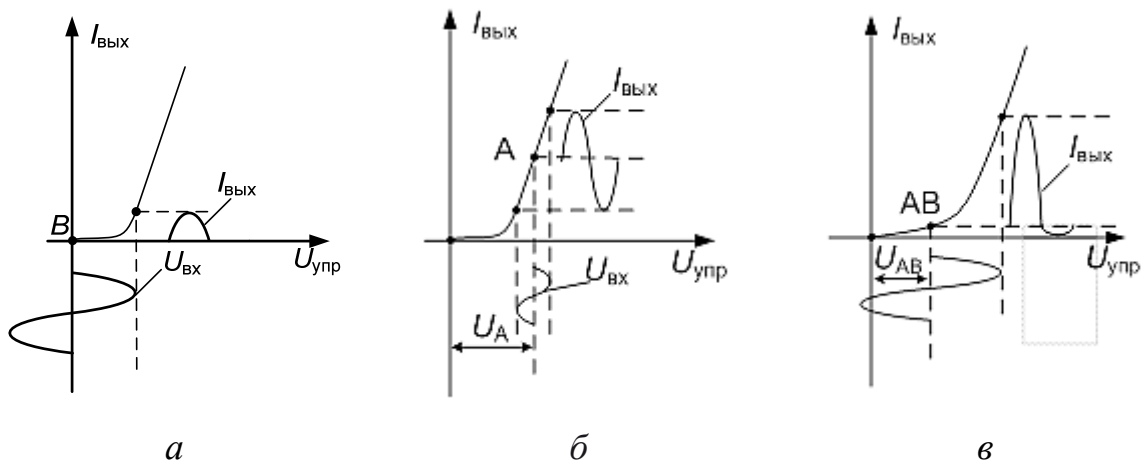


Рис. 3.111. Проходные характеристики активного элемента:
(а) класс В; (б) класс А; (в) класс АВ

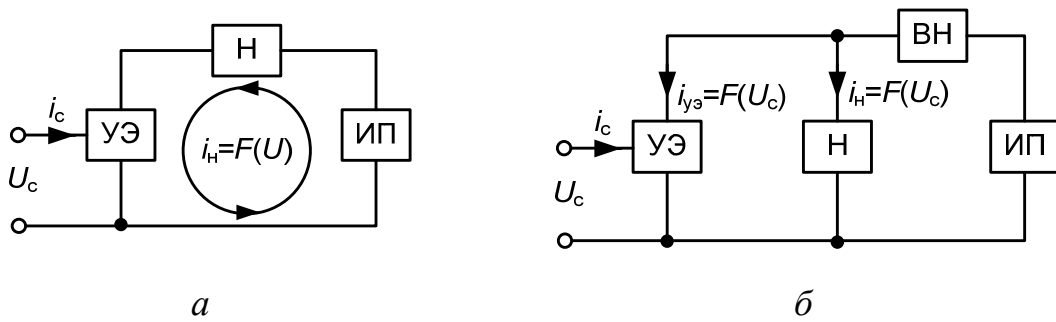


Рис. 3.112. Схемы усилителей мощности:
а) с последовательным включением нагрузки; б) с параллельным включением нагрузки

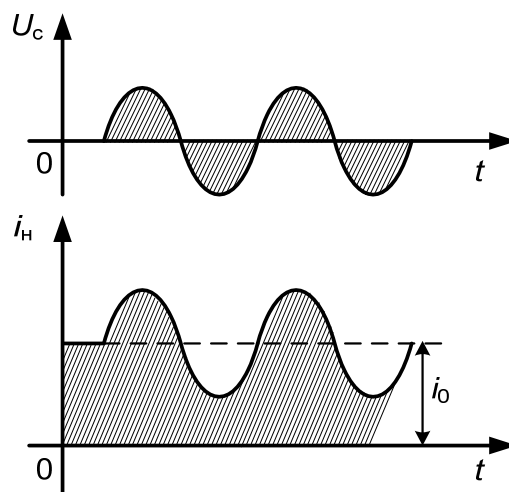


Рис. 3.113. Диаграмма выходного тока для однотоктного усилителя мощности

В случае параллельного включения нагрузки необходимо наличие дополнительного элемента – внутренней нагрузки (ВН), на которой тратится часть энергии источника питания (ИП), и мощности, выдаваемой усилительным элементом, т. е. еще больше понижает КПД. Отделение переменной составляющей осуществляется с помощью разделительной емкости. Такая схема при построении усилителей мощности практически не применяется, а используется в маломощных каскадах из-за удобства «заземления» управляющего элемента, источника питания и нагрузки.

Определим максимальный КПД (η) усилителя мощности по схеме, приведенной на рис. 3.112:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ИП}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T U_m \cdot \cos \omega t \cdot i_m \cos(\omega t) dt}{E_{ИП} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_{ИП}(t) dt} = \frac{U_m \cdot i_m}{2 E_{ИП} \cdot i_{ИП}^0}.$$

Примем, что внутренняя нагрузка (ВН) и нагрузка (Н) – активные сопротивления $R_{ВН}$, R_H . При гармоническом входном и выходном сигналах и фазовом сдвиге $\varphi = 0$ и $R_{ВН} = R_H$, $U_m = (1/3 E_{ИП})$ и $I_m = 1/(2 \cdot I_a)$, т. е.:

$$\eta = 0,5 \cdot \gamma_u \cdot \gamma_i,$$

где $\gamma_u = U_m / E_{ИП}$, $\gamma_i = I_m / I_{ИП}$ – коэффициенты использования по напряжению и току соответственно.

Для рассматриваемого усилителя максимальное значение $\gamma_u = 1/3$, а $\gamma_i = 1/2$, то без учета потерь на активном элементе максимальный КПД составит 8,3 %. Реальные схемы имеют еще более низкий КПД. Повысить КПД можно, используя в качестве $R_{ВН}$ элемент, имеющий небольшое сопротивление для постоянного тока и большое для переменного, т. е. $R_i \gg R_H$. Такими свойствами обладают транзисторы. Усилители такого типа называют *усилителями с динамической неуправляемой нагрузкой*. В них коэффициент использования по напряжению становится равным 1/2, а коэффициент использования по току стремится к единице, таким образом КПД составит 25 %.

Экономичный режим воспроизведения знакопеременного сигнала при отсутствии или незначительном потреблении энергии от источника питания в режиме «покоя» возможен в двухтактных схемах усилителей, одна из разновидностей которых приведена на рис. 3.114, а. Эпюры токов в такой схеме изображены на рис. 3.114, б.

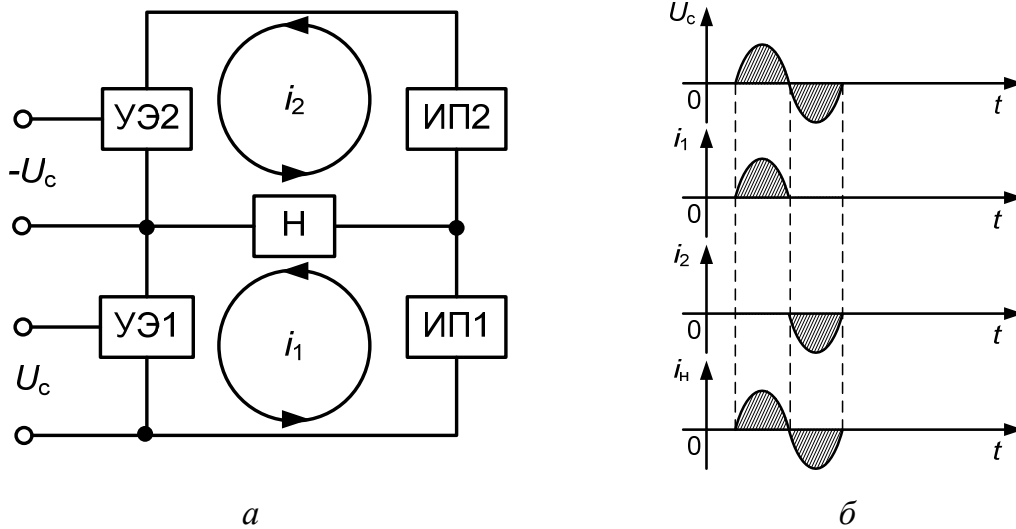


Рис. 3.114. Функциональная схема двухтактного каскада (а) и диаграмма токов (б)

Определим факторы, обеспечивающие максимально возможное значение КПД двухтактного усилителя. По определению КПД – это отношение мощности сигнала в нагрузке (P_H) к мощности, потребляемой при этом от источника питания ($P_{ин}$):

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ин}} = \frac{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U_H(t) i_H(t) dt}{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} E_{ин}(t) i_{ин}(t) dt}.$$

В общем случае значение КПД зависит от формы сигнала – $U_H(t)$, $I_H(t)$, поэтому принято определять предельное значение КПД линейных усилителей при гармоническом сигнале в нагрузке

$$U_H(t) = U_m \cdot \cos \omega t; \quad i_H(t) = i_m \cdot \cos(\omega t + \varphi).$$

Тогда, полагая, что $E_{ин} = const$, и учитывая наличие в схеме двух источников, получаем

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T U_m \cdot \cos \omega t i_m \cos(\omega t + \varphi) dt}{2E_{ин} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_{ин}(t) dt} = \frac{\frac{U_m i_m}{2} \cdot \cos \varphi}{2E_{ин} \cdot i_{ин}^0},$$

где $T = 2\pi/\omega$ – период сигнала; $i_{ин}^0$ – постоянная составляющая источника питания.

Минимальное значение КПД ($\eta = 0$) имеет место при чисто реактивной (емкостной или индуктивной) нагрузке, когда фазовый сдвиг между током и напряжением достигает 90° ($\varphi = \pi/2$). В этом случае активная мощность в нагрузке не развивается и вся мощность, отбираемая от источника питания, рассеивается на управляемых элементах. При чисто активной нагрузке ($\varphi = 0$) имеем:

$$\eta = \frac{U_m \cdot i_m}{4 \cdot E_{\text{ип}} \cdot i_{\text{ип}}^0}.$$

Отсюда следует, что значение КПД зависит от коэффициента использования напряжения источника питания $\gamma_u = U_m / E_{\text{ип}}$ и коэффициента использования тока источника питания $\gamma_i = I_m / I_{\text{ип}}^0$.

Из рис. 3.114, *a* следует, что приращение напряжения в нагрузке одной полярности не может превышать напряжения источника питания одного плеча двухтактного каскада:

$$U_m < E_{\text{ип}}.$$

Степень этого неравенства зависит от вида вольт-амперных характеристик управляемых элементов и способа их включения. На рис. 3.115 приведен пример графического построения эпюр напряжения и тока в нагрузке для одного плеча двухтактной схемы на полевых транзисторах с режимом покоя в точке *A*.

Из построений на рис. 3.115 хорошо видно, что коэффициент использования напряжения $\gamma_u < 1$ из-за наличия остаточного напряжения U_0 (точка *A''*).

Очевидно, что наиболее благоприятным в энергетическом смысле режимом работы линейных транзисторных усилителей является режим достижения заданной мощности в нагрузке при высоких значениях амплитуды напряжения и низких значениях амплитуды тока. При этом, с одной стороны, увеличивается отношение U_m / U_0 , а с другой – уменьшается абсолютное значение U_0 . Если при заданных нагрузке и мощности значения U_m и I_m оказываются неблагоприятными в указанном выше смысле, то можно, если это допустимо с других точек зрения, применить согласующий трансформатор. Выбором коэффициента трансформации можно на выходе усилителя (на первичной обмотке) получить требуемое высокое значение напряжения при заданном низком его значении в нагрузке. С учетом сделанных замечаний предельное значение $\gamma_u \rightarrow 1$.

Для определения максимального значения коэффициента γ_i рассмотрим эпюру тока в цепи источника питания двухтактной схемы при заданном токе покоя I_0 , рис. 3.116.

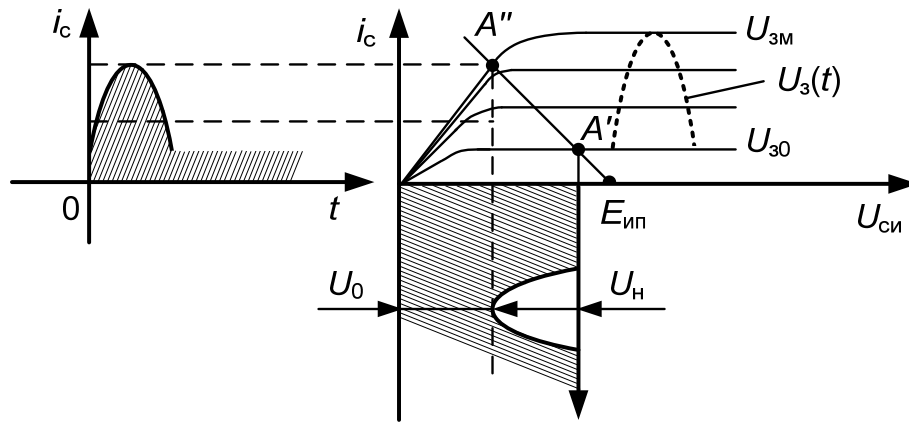


Рис. 3.115. Диаграммы напряжения и тока для одного плеча двухтактной схемы

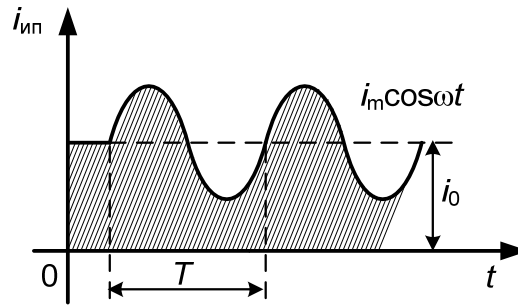


Рис. 3.116. Диаграмма выходного тока одного плеча двухтактного усилителя

Постоянная составляющая тока может быть подсчитана по соотношению:

$$i_{ип}^0 = i^0 + \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_m \cos \omega t dt - \frac{1}{T} \int_0^T i^0 \cos \omega t dt = i^0 + \frac{i_m}{\pi} - \frac{i^0}{\pi}$$

или, обозначив $i^0 = \varepsilon \cdot i_m$,

$$i_{ип}^0 = i_m \frac{1 + \varepsilon \cdot (\pi - 1)}{\pi}; \quad \gamma_i = \frac{\pi}{1 + \varepsilon \cdot (\pi - 1)}.$$

Очевидно, что значение $i_{ип}^0$, соответствующее максимуму γ_i , достигается при $\varepsilon = 0$, когда $\gamma_i = \pi$. Полагая, что предельные значения $\gamma_u = 1$ и $\gamma_i = \pi$, получаем максимальное значение КПД двухтактного каскада при гармоническом выходном сигнале:

$$\eta_{\max} = \frac{\pi}{4} \approx 78 \%.$$

Мощность, рассеиваемая на каждом управляемом элементе, равна половине общей мощности потерь:

$$P_{уэ} = \frac{P_{ип} - P_{н}}{2} = \frac{\frac{P_{н}}{\eta} - P_{н}}{2} = 0,14 \cdot P_{н}.$$

3.3. Описание принципиальной схемы лабораторного макета

В настоящее время широкое применение в усилителях мощности находят МДП-транзисторы, обладающие меньшими потерями и большей температурной устойчивостью. Ввиду того, что полевые транзисторы имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления канала, то при параллельном соединении можно не включать в источник выравнивающие резисторы.

Усилители мощности на полевых транзисторах, по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах, быстрее переключаются.

Мощные полевые транзисторы характеризуются большими значениями емкостей затвор–сток и затвор–исток, поэтому целесообразно использовать мощные полевые транзисторы в качестве истоковых повторителей. Тогда вследствие эффекта Миллера не увеличивается емкость затвор–сток и значительно уменьшается емкость затвор–исток благодаря наличию компенсационной обратной связи.

Экспериментальная часть данной работы содержит определение реальных значений КПД бестрансформаторных усилителей мощности (БУМ) на основе повторителя напряжения:

- с резистивной нагрузкой;
- с нелинейной (динамической) нагрузкой на однотипных транзисторах;
- по двухтактной схеме на разнотипных транзисторах (канал *n*-типа, канал *p*-типа);
- исследование схемы защиты от короткого замыкания.

В лабораторном макете используются мощные полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом (с обогащением). На рис. 3.117 приведены их вольт-амперные характеристики.

Напряжение отсечки $U_{зи} = 3,5$ В, т. е. работать в усилительном режиме транзистор начинает при $U_{зи}$ больше 3,5 В. Сопротивление канала открытого транзистора меньше 0,05 Ом, крутизна 1000 мА/В, междуэлектродные емкости $C_{вх. (зи)} = 180$ пФ, $C_{вых. (си)} = 80$ пФ, $C_{прох. (зс)} = 15$ пФ.

Графическое изображение транзисторов с каналом *n*-типа и каналом *p*-типа приведено на рис. 3.118.

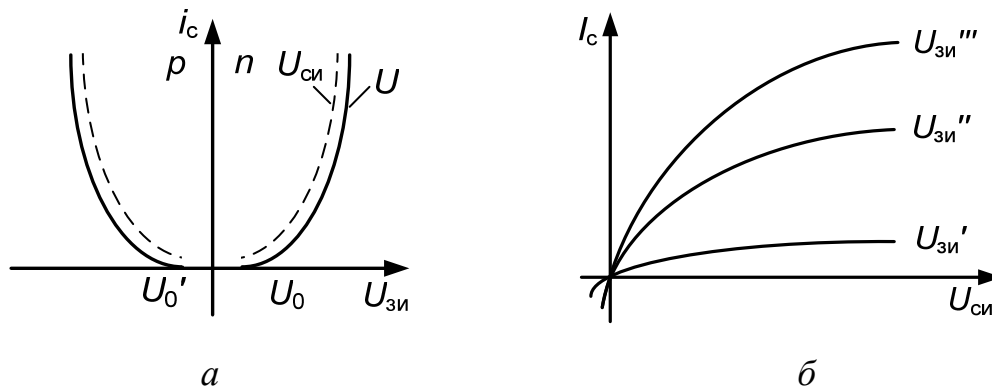


Рис. 3.117. Проходные (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики транзисторов, используемых в лабораторном макете



Рис. 3.118. Графическое изображение транзисторов с каналом n-типа (а) и каналом p-типа (б)

3.4. Истоковый повторитель

На рис. 3.119 приведена схема повторителя напряжения, у которого внутренняя ($R_{и}$) и внешняя ($R_{н}$) нагрузки – резисторы, а в качестве активного элемента – полевой транзистор VT1.

На рис. 3.120 приведены выходные характеристики транзистора и построены нагрузочные прямые по постоянному (а–б) и переменному (в–г) токам. Приведены эпюры токов и напряжений.

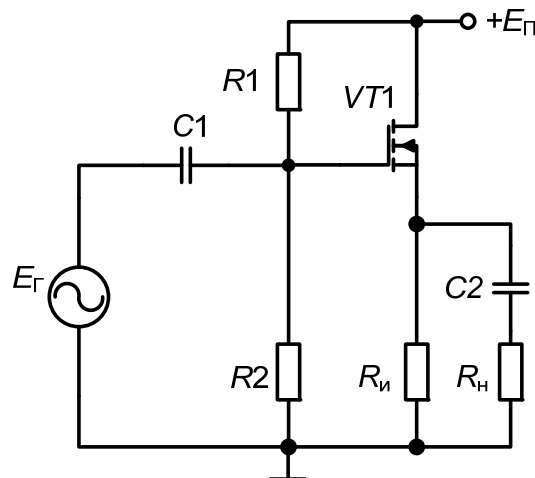


Рис. 3.119. Схема повторителя напряжения

202

Как известно, таким свойством обладает любой нелинейный элемент, у которого на вольт-амперной характеристике имеется участок, на котором ток слабо зависит от напряжения.

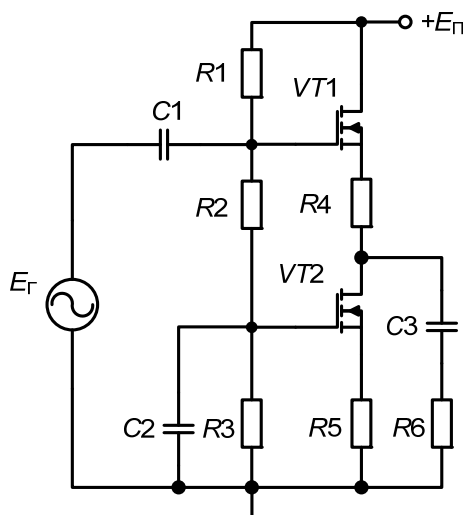


Рис. 3.121. Схема БУМ с динамической нагрузкой

Таким свойством обладает и полевой транзистор. Например, возьмем ВАХ (рис. 3.120) при постоянном $U_{зи}$ в рабочей точке (А) – статическое сопротивление равно отношению $U_{си}/I_{са}$ и имеет небольшое значение, а дифференциальное (отношение приращений) – намного больше. Схема БУМ с динамической нагрузкой с использованием полевых транзисторов изображена на рис. 3.121.

Анализ схемы приводит к следующему:

1) практически весь переменный ток транзистора $VT1$ идет в нагрузку, так как динамическая нагрузка на $VT2$ имеет существенно большее сопротивление, чем сопротивление нагрузки R_n . Тогда ток стока в рабочей точке ($I_{са}$) можно выбирать равным $I_{нм}$, поэтому коэффициент использования тока транзистора $\gamma_i \rightarrow 1$;

2) напряжение на транзисторах ($U_{си}$) делается равным $(1/2) E_n$ и, пренебрегая остаточным напряжением $U_{ост}$ (рис. 3.120), получаем $U_{нм} \rightarrow (1/2) E_n$, тогда $\gamma_u \rightarrow 0,5$.

Таким образом, благодаря использованию динамической нагрузки, максимальный КПД теоретически возрос до 25 % при оптимальной нагрузке, которая обеспечивает полное использование тока (I_c) и напряжения ($U_{си}$) транзистора $VT1$, тогда $R_n = U_{си}/I_c$.

Существенным недостатком таких каскадов является не только низкий КПД, но и потребление энергии от источника питания в состоянии покоя практически на том же уровне, как и при передаче полезного сигнала в нагрузку. В схеме с динамической нагрузкой используется два усилительных элемента, а ток в нагрузку отдает только один.

3.6. Двухтактные БУМ

Двухтактные усилительные каскады содержат минимум два усилительных элемента (рис. 3.114), управление которыми должно осуществляться противофазными сигналами, которое обеспечивает поочередную работу усилительных элементов, т. е. двухтактный режим.

В настоящее время имеется достаточно большой выбор комплементарных пар мощных транзисторов (транзисторы разного типа проводимости с одинаковыми характеристиками), которые используются для построения УМ. В этом случае управление осуществляется одним сигналом.

На рис. 3.122 приведена схема двухтактного УМ на комплементарных полевых транзисторах $VT1$ и $VT2$, которая представляет собой истоковый повторитель. Режим работы транзисторов задается цепью $R1$, $VD1$, $VD2$, $R2$. Стабилитроны устанавливают напряжения $U_{зи} = 3,6$ В при этих напряжениях транзисторы закрыты; ток стока $I_c = 0$, т. е. обеспечивается режим класса B . Емкости $C1$ и $C2$ обеспечивают передачу входного сигнала U_c на транзисторы практически без потерь.

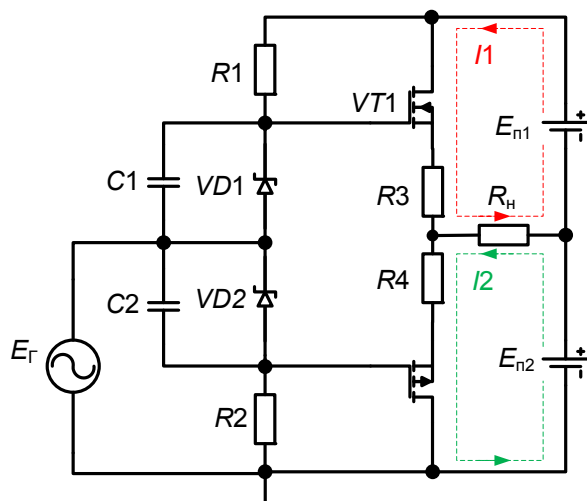


Рис. 3.122. Схема двухтактного УМ на комплементарных транзисторах

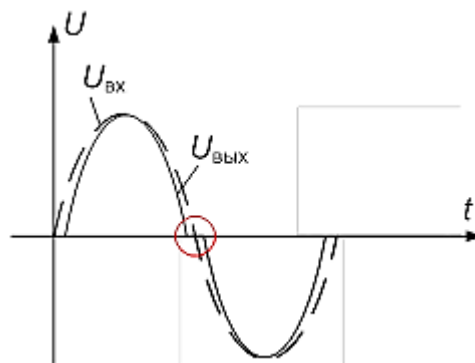


Рис. 3.123. Форма выходного сигнала УМ на комплементарных полевых транзисторах

При подаче входного сигнала положительной полуволной открывается транзистор $VT1$ и ток протекает от $+E_{п1}$ через $VT1$, R_n и на $-E_{п1}$. На нагрузке формируется положительная полуволна выходного сигнала (один такт). Во второй полупериод открывается транзистор $VT2$ и ток протекает от $+E_{п2}$ к $-E_{п2}$ через $VT2$ и R_n в противоположном направлении – формируется отрицательная полуволна выходного сигнала (второй такт). На рис. 3.123 представлена форма выходного сигнала.

Из-за нелинейности ВАХ транзисторов наблюдаются большие искажения сигнала в области перехода через ноль (на рис. 3.123 выделено кружком). Несмотря на глубокую ООС в повторителе, эти искажения не отрабатываются, т. к. транзисторы в этот момент времени оказываются закрытыми и ООС не действует. Энергетические соотношения описаны на стр. 206, максимальный КПД составляет 78 %. Кроме большого КПД, достоинством этого режима является отсутствие потребления мощности от источников питания до подачи входного сигнала. Для уменьшения искажений транзисторы УМ в закрытое состояние не переводятся, работают в активном режиме, но ток в рабочей точке (I_{ca}) значительно меньше тока нагрузки (I_n), т. е. устанавливается режим класса АВ. Искажения сигнала значительно меньше, ООС не разрывается, но из-за увеличения постоянного тока КПД меньше 78 %.

Изменяя напряжение $U_{зи}$, можно поставить транзисторы в режим класса А, при этом будут протекать постоянные токи через нагрузку в противоположных направлениях: от $+E_{п1}$, VT1, R_n к $-E_{п1}$; от $+E_{п2}$, VT2, R_n к $-E_{п2}$. Таким образом, $I_n = I_{a1} - I_{a2} = 0$. При подаче положительной полуволны входного сигнала ток транзистора VT1 увеличится, а VT2 уменьшится на ΔI , при отрицательной полуволне – наоборот, и тогда ток нагрузки $I_n = (I_{a1} + \Delta I) - (I_{a2} - \Delta I) = 2 \cdot \Delta I$.

В пределе $\Delta I = I_a$ и коэффициент использования тока $\gamma_i = 2$, а КПД = 50 %

3.7. Схемы защиты от короткого замыкания

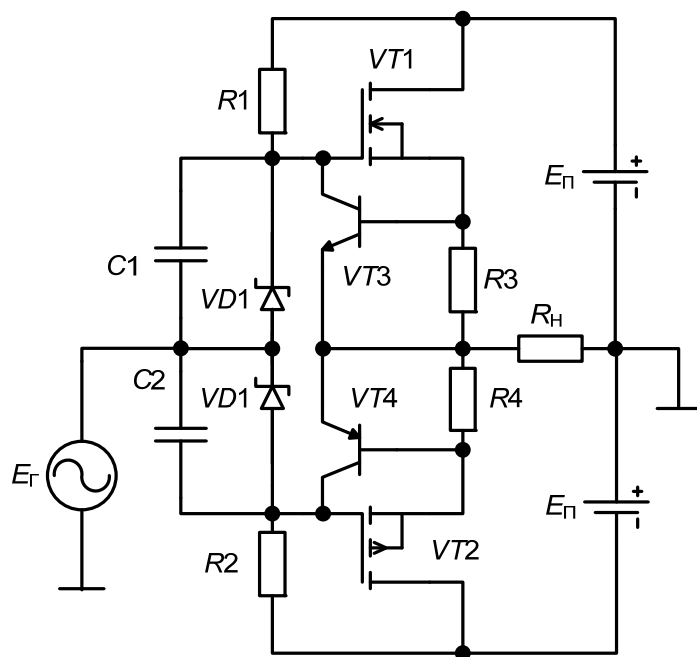


Рис. 3.124. Схема БУМ с защитой от короткого замыкания

В мощных усилителях случайное короткое замыкание нагрузки приводит к протеканию очень больших токов, что может спровоцировать выход из строя и усилителя, и источника питания. С целью исключения этого применяются специальные схемы защиты, один из вариантов которых изображен на рис. 3.124.

Здесь $VT1$, $VT2$ – рабочие транзисторы, а $VT3$, $VT4$ – транзисторы схемы защиты. Резисторы $R3$, $R4$ – датчики тока – выбираются таким образом, что при номинальном токе нагрузки транзисторы $VT3$ ($VT4$) практически заперты и не оказывают влияния на работу схемы. В случае закорачивания нагрузки падение напряжения на $R3$ ($R4$) резко возрастает, транзисторы $VT3$ ($VT4$) входят в насыщение и закорачивают промежуток затвор–исток полевых транзисторов $VT1$ ($VT2$), что приводит к их запиранию. Максимальный ток коллектора $VT3$ ($VT4$) ограничивается резисторами $R1$, $R2$.

4. Программа лабораторной работы

ПРИМЕЧАНИЕ:

1. Обозначение приборов на схемах экспериментов соответствует приборам в программе Multisim.
 2. На всех схемах мультиметр DMM (XMM) работает в режиме измерения постоянного тока.
- 4.1. Собрать схему усилителя мощности (УМ) на повторителе с резистивной нагрузкой, рис. 3.125.

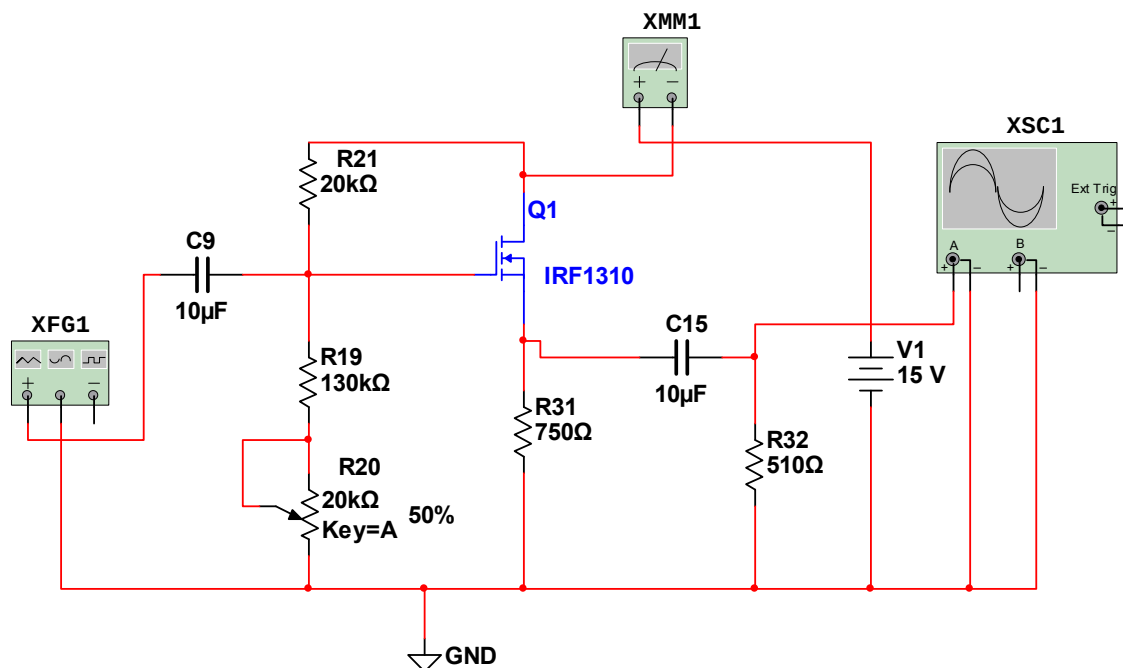


Рис. 3.125. УМ с резистивной нагрузкой

В эксперименте используются следующие приборы: FGEN (XFG1) – генератор синусоидальных колебаний; DMM (XMM1) – мультиметр (работает в режиме измерения постоянного тока); Scope (XSC1) – осциллограф (канал А – выходной сигнал, канал В – измерение постоянного напряжения на R_{31}). Обозначение приборов, приведенных в скобках, соответствует приборам в программе Multisim.

При отсутствии входного сигнала с помощью резистора R_{20} установить величину постоянного тока, потребляемого схемой от источника питания – $I_{ин} \approx 10$ мА, измерить постоянное напряжение на сопротивлении R_{31} . Подать на вход УМ синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц. По осциллографу установить максимальный неискаженный сигнал и измерить его значение. Рассчитать: мощность, выделяемую в нагрузку ($P_H = U_2/R_H$); мощность, потребляемую от источника питания ($P_{ин} = I_{ин} \cdot E_{ин}$), и коэффициент полезного действия ($\eta = P_H/P_{ин}$).

4.3. Собрать схему (рис. 3.126), установить с помощью R_{20} напряжение $U_{Rи} \approx 9,5$ В (напряжение в точке А), $I_{ин} \approx 13$ мА и повторить эксперимент. Сравнить и объяснить полученные результаты.

4.3. Собрать схему усилителя мощности (УМ) на повторителе с нелинейной (динамической) нагрузкой, рис. 3.127.

В этой схеме, в отличие от предыдущей (рис. 3.126), в которой хорошая стабильность тока покоя достигается за счет большой величины резистора обратной связи R_{31} , стабильность тока покоя обеспечивается резистором R_{18} . Для получения необходимого значения входного напряжения к генератору подсоединен усилитель на микросхеме DA1 и резисторах R_6 , R_7 с коэффициентом усиления 5. Питание DA1 осуществляется от источника VPS (± 12 В).

- При нулевом входном сигнале установить величину токов покоя 10 мА с помощью резистора R_{20} , измерить постоянное напряжение сток–земля транзистора VT2.

- Определить величину максимального неискаженного выходного сигнала, постоянную составляющую тока стока. Рассчитать КПД этого УМ.

- Сравнить полученные результаты с предыдущей схемой. Выводы?

4.4. Собрать схему двухтактного УМ на разнотипных транзисторах (канал n -типа, канал p -типа), рис. 3.128. Питание УМ осуществляется от источника VPS (± 10 В), а питание ОУ – от источника ± 15 В. Мультиметр DMM (XMM1) работает в режиме измерения постоянного тока, а осциллограф – в режиме измерения постоянного и переменного напряжений.

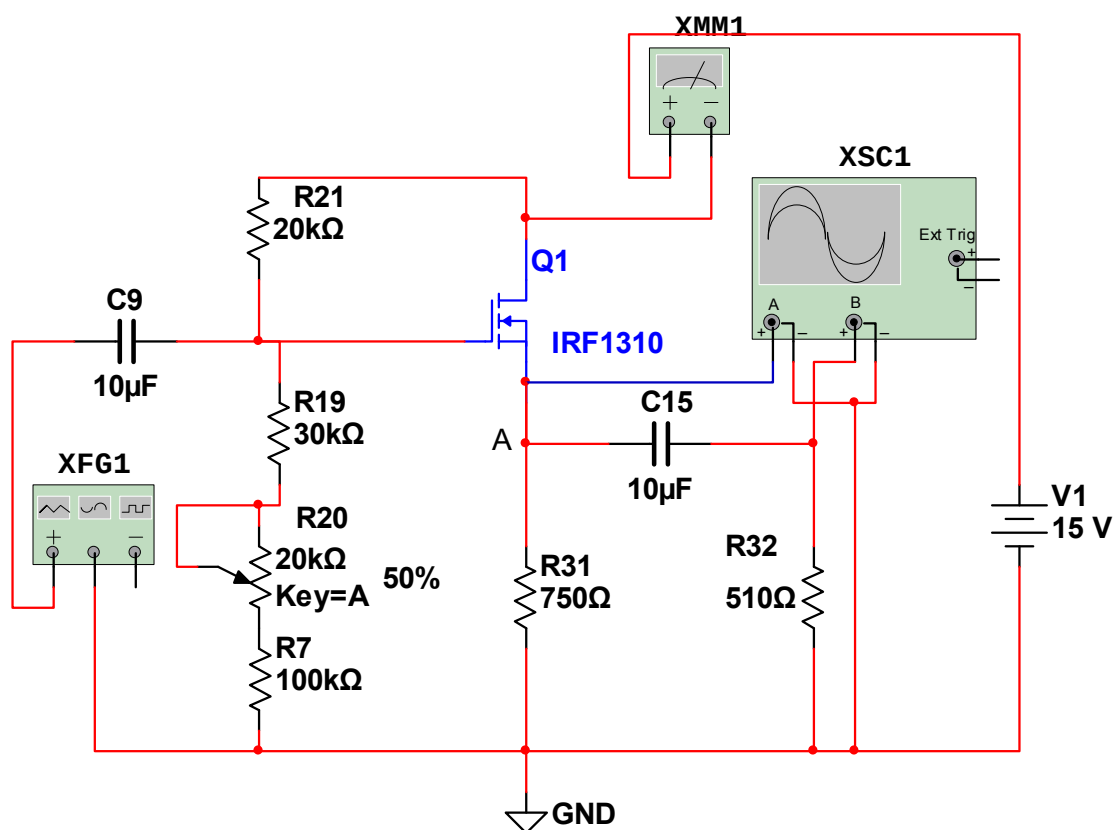


Рис. 3.126. Усилитель мощности с резистивной нагрузкой

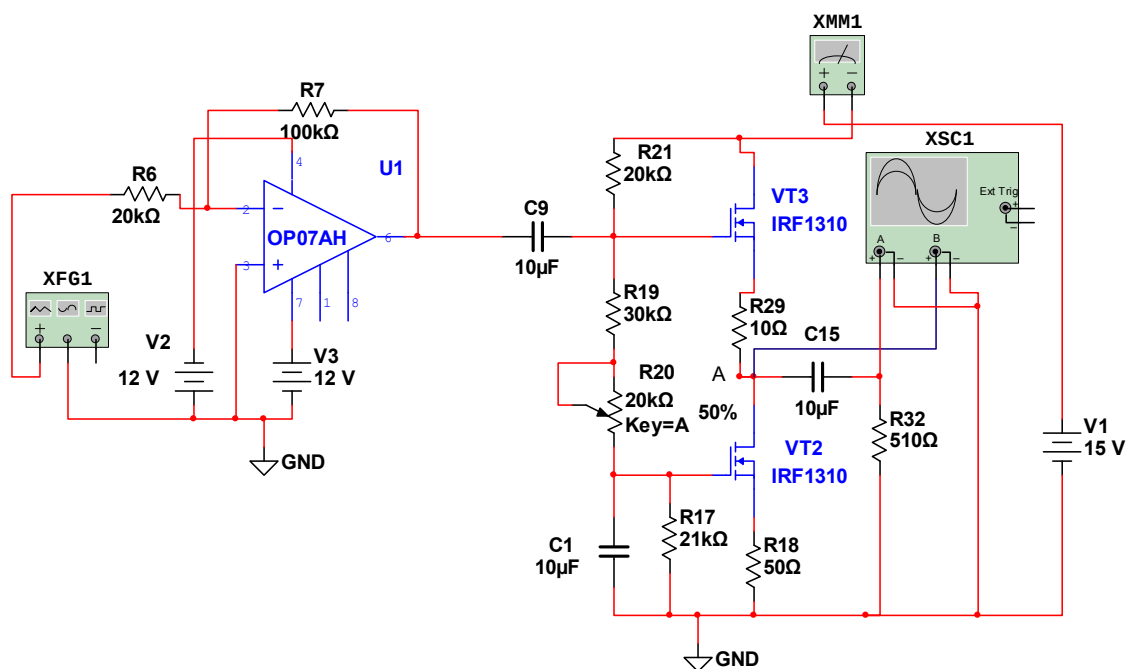


Рис. 3.127. Усилитель мощности с нелинейной (динамической) нагрузкой

5. При нулевом входном сигнале измерить ток покоя и постоянное напряжение на выходе.

6. Подключить нагрузку ($R31$, $R32$, $R35$), в каждом случае установить максимальную величину неискаженного выходного сигнала, определить постоянную составляющую тока стока транзисторов, рассчитать КПД. Определить класс работы транзисторов.

4.5. Собрать схему двухтактного УМ, приведенную на рис. 3.129. Подключение резисторов $R36$, $R37$ в цепь стабилитронов ($VD7$, $VD8$) привело к возрастанию напряжения затвор–исток ($U_{зи}$) транзисторов и появлению небольшого начального тока, т. е. транзисторы перешли в класс AB .

- При нулевом входном сигнале измерить ток покоя.
- Подключить нагрузку ($R31$, $R32$), установить максимальную величину неискаженного выходного сигнала и определить постоянную составляющую тока стока транзисторов, рассчитать КПД. Определить класс работы транзисторов.

4.6. Собрать схему двухтактного УМ на комплементарных транзисторах, рис. 3.130. С помощью резистора $R13$ при нулевом входном сигнале, установить ток покоя 10 мА, т. е. класс A . Подключить нагрузку ($R31$, $R32$), установить максимальную величину неискаженного выходного сигнала при неизменном токе покоя. Рассчитать КПД. Сравнить результаты, полученные в п. 4.4, 4.5 и 4.6.

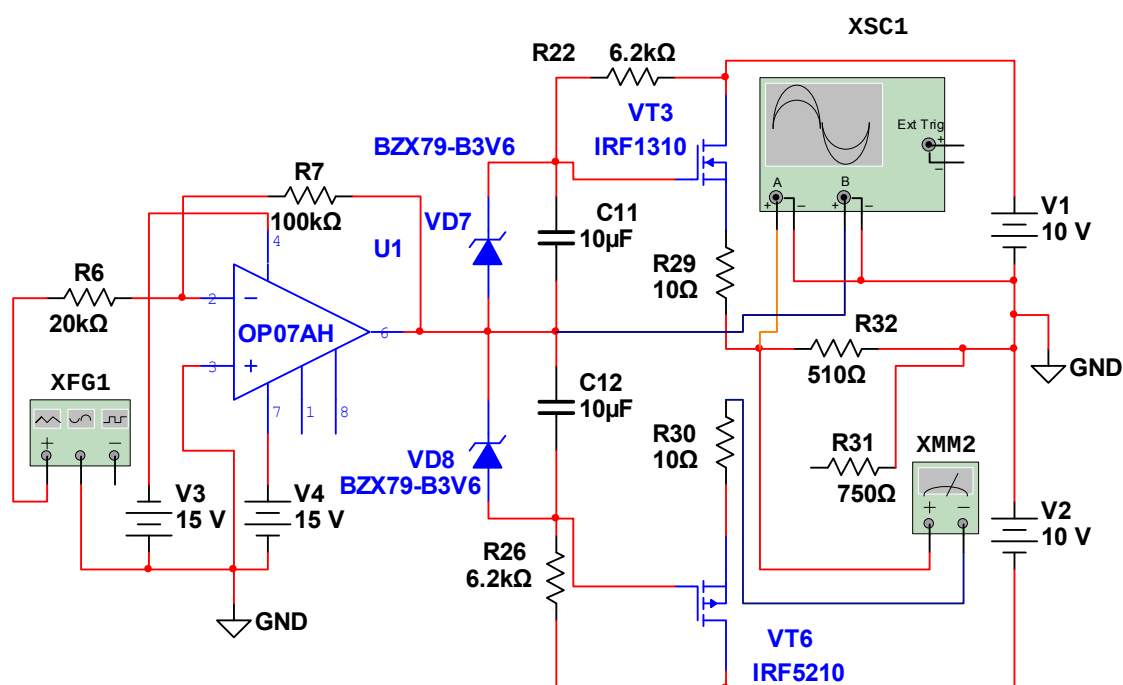


Рис. 3.128. Двухтактный усилитель мощности (класс B)

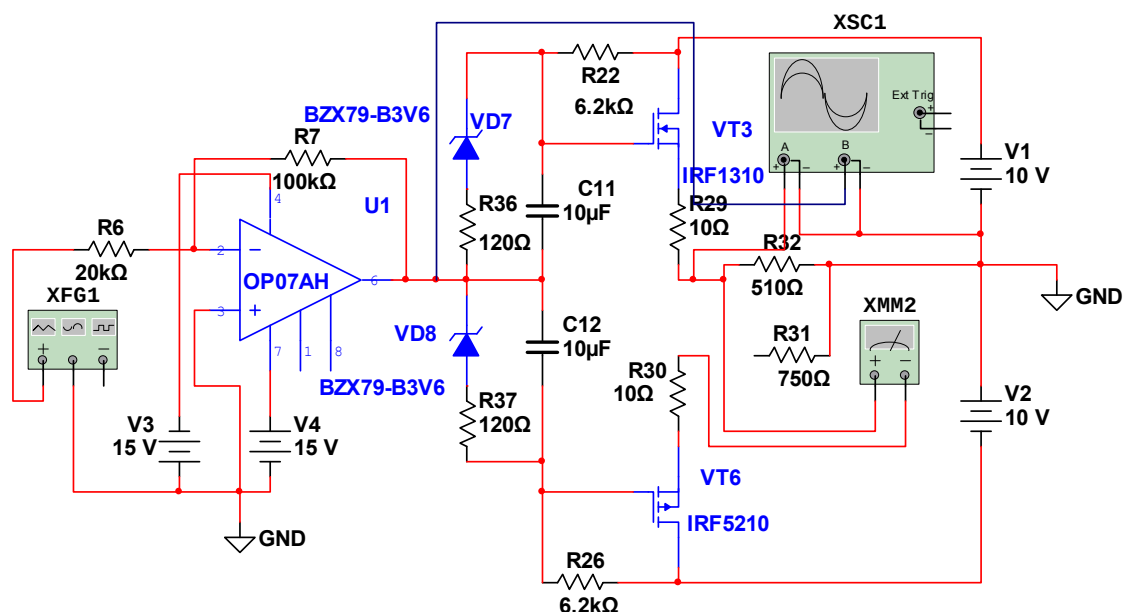


Рис. 3.129. Двухтактный усилитель мощности (класс AB)

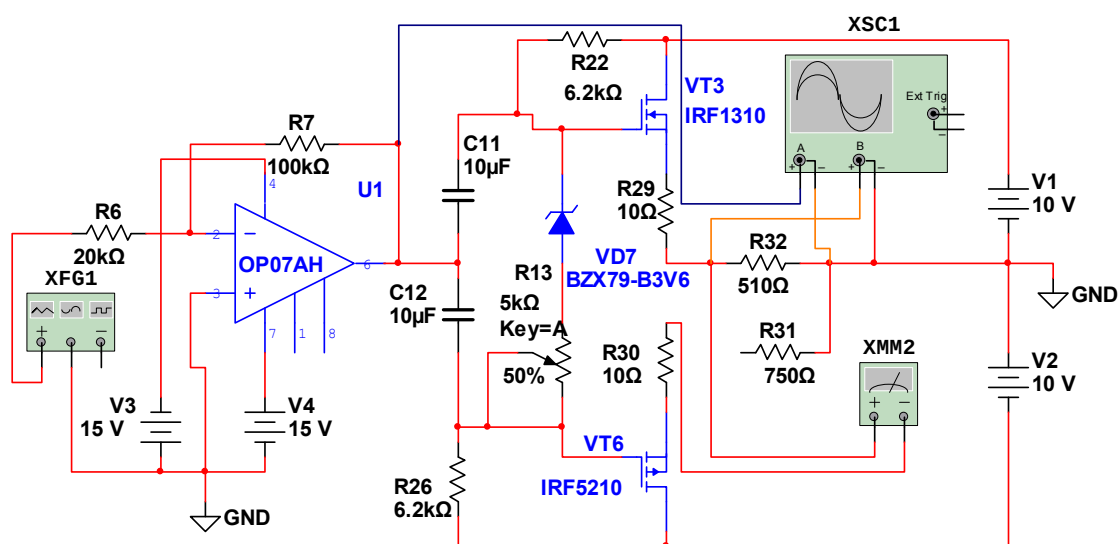


Рис. 3.130. Двухтактный усилитель мощности (класс A)

- 4.7. Снять зависимость КПД двухтактного каскада от величины тока покоя: с этой целью при нулевом входном сигнале устанавливать новые значения тока покоя, меньше исходного, определять напряжение максимального неискаженного выходного сигнала, соответствующее ему значение постоянной составляющей тока стока и КПД. Минимальное значение тока стока должно соответствовать режиму B. Построить график полученной зависимости КПД от тока покоя. Эксперимент проводить при постоянной нагрузке $R_H = R31 || R32$ (параллельное включение сопротивлений).

4.8. Исследование работы схемы защиты от короткого замыкания нагрузки.

- Собрать схему (рис. 3.128), подать входной сигнал и установить его максимальное значение при нагрузке 83,6 Ом ($R31$ включено параллельно $R35$), измерить ток, потребляемый от источника питания.
- Собрать схему (рис. 3.131), подсоединить нагрузку 83,6 Ом и подать входной сигнал, как в предыдущем случае. Зарисовать форму выходного сигнала, измерить ток, потребляемый от источника питания. Сравнить с предыдущим результатом.

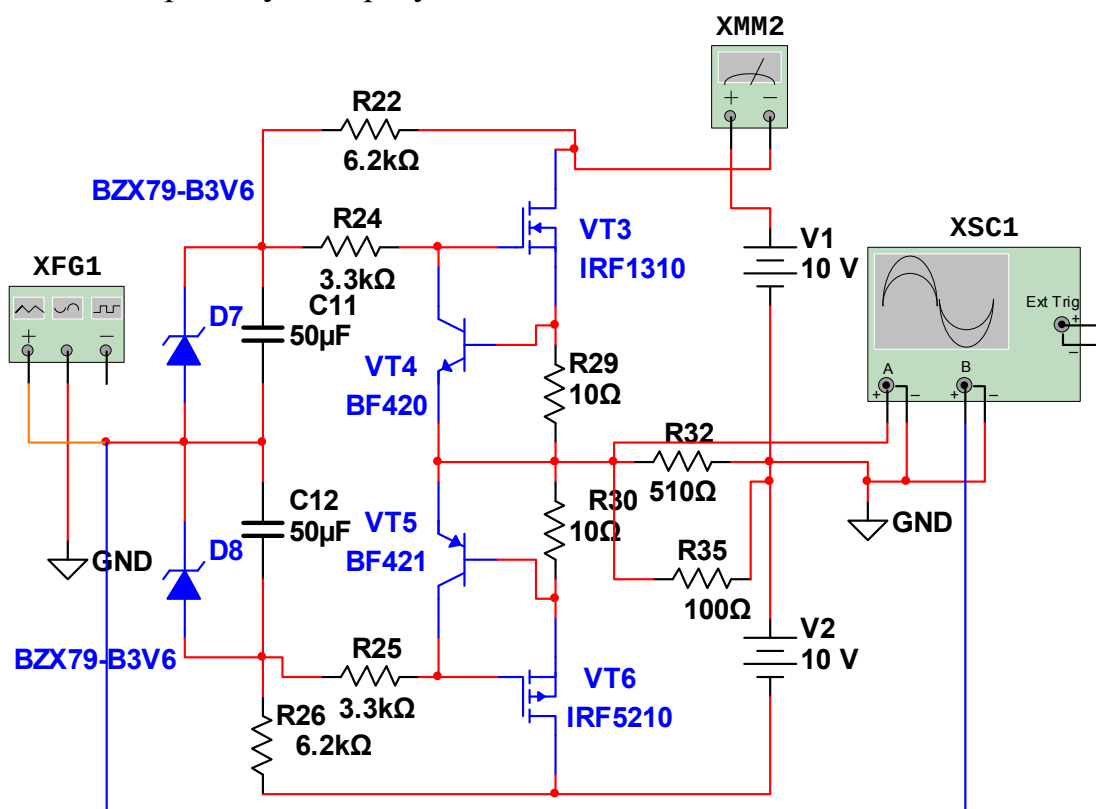


Рис. 3.131. Двухтактный усилитель мощности со схемой защиты от короткого замыкания на выходе

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Почему энергетическими соотношениями интересуются в основном только для оконечных каскадов усилителя?
- 5.2. Поясните, почему при желании сохранить форму выходного сигнала относительно входного гармонического в одноконтурных каскадах транзисторы должны работать в классе A ?
- 5.3. На сток-затворной характеристике полевого транзистора приведите графические построения, иллюстрирующие работу в классах A , AB , B и C .

- 5.4. Приведите алгоритм расчета КПД оконечного каскада.
- 5.5. Приведите на выходной вольт-амперной характеристике транзистора графические построения, необходимые при расчете энергетических соотношений в однотактном каскаде класса A .
- 5.6. Как рассчитать мощности и КПД при работе двухтактного каскада класса A ?
- 5.7. Обоснуйте способы повышения коэффициента γ_i в оконечных каскадах, ведущие к повышению КПД.
- 5.8. Какие способы увеличения коэффициента γ_u используются в оконечных каскадах для повышения их КПД?
- 5.9. Может ли коэффициент использования по току γ_i быть больше единицы? Если нет, то почему? Если да, то при каких условиях?
- 5.10. Может ли коэффициент использования напряжения γ_u быть близким к единице? Если нет, то почему? Если да, то при каких условиях?
- 5.11. Приведите алгоритм исследования энергетических соотношений:
 - а) в эмиттерном повторителе;
 - б) схеме с динамической нагрузкой;
 - в) двухтактных каскадах классов A , AB , B .
- 5.12. Как выглядит зависимость КПД от угла отсечки в двухтактных каскадах?

6. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- схемы проведенных экспериментов;
- результаты измерений (таблицы, графики) и заключения по ним;
- выводы.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В MULTISIM 10

4.1. Основы работы в Multisim 10

Для лучшего понимания технологии эксперимента (зачем, что и как делать?) и ясного представления ожидаемых результатов (что должно получиться?) рекомендуется во время внеаудиторной подготовки проделывать программу лабораторной работы в среде схемотехнического моделирования и анализа электрических схем Multisim.

Multisim позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы разной степени сложности. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя набор наиболее широко распространенных электронных компонентов.

Интерфейс программы Multisim, приведенный на рис. 4.1, состоит из нескольких основных элементов, которые описаны ниже.

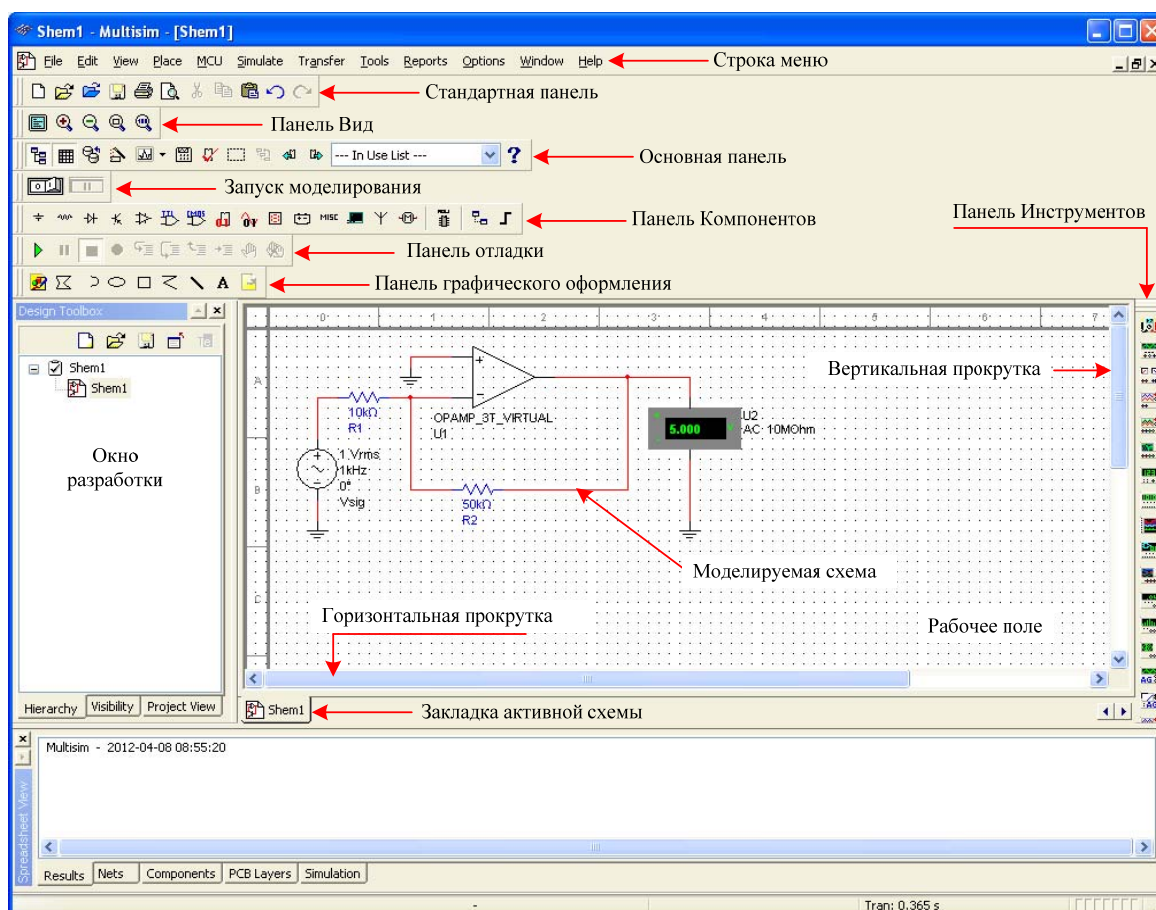


Рис. 4.1. Интерфейс программы Multisim

4.1.1. Окно разработки (Design Toolbox)

В окне разработки (рис. 4.1) находятся средства управления различными элементами схемы. Закладка Иерархия (Hierarchy) отображает взаимосвязь между файлами открытого проекта в виде древовидной структуры. Закладка Доступность (Visibility) позволяет скрыть или отобразить слои схемы рабочей области. Закладка Проект (Project View) содержит информацию об открытом проекте. Пользователь может добавить файлы в папки открытого проекта, изменить доступ к файлам и создать архив проекта.

4.1.2. Глобальные настройки

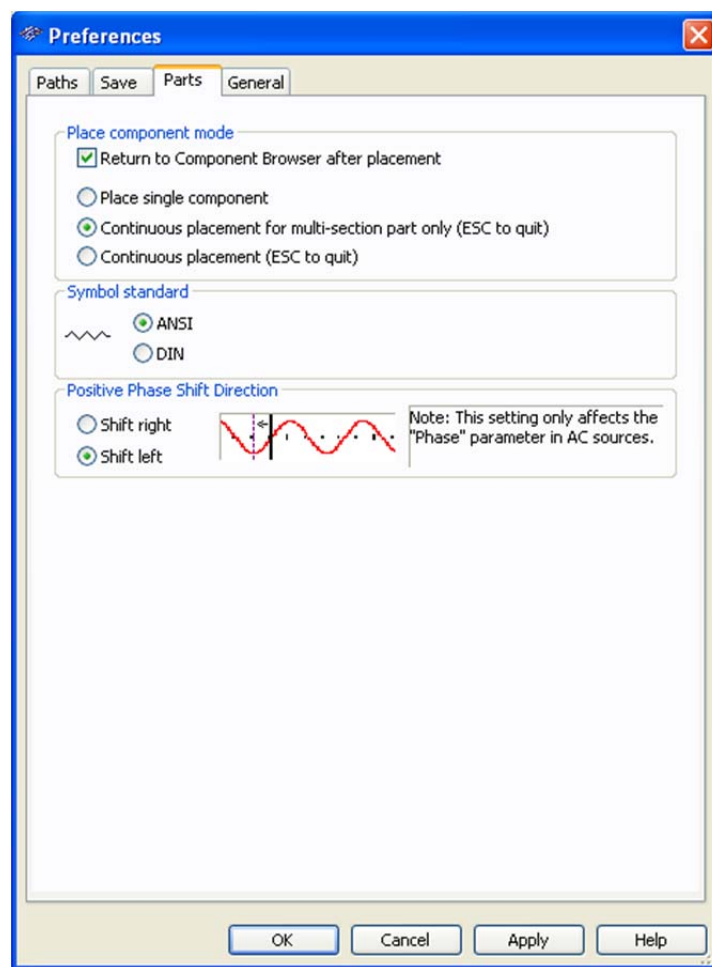


Рис. 4.2. Глобальные настройки

Глобальные настройки позволяют настроить свойства среды Multisim. Доступ к ним открывается из диалогового окна «Свойства» (Preferences). Выберите пункт Опции/глобальные настройки (Options/Global Preferences), откроется окно «Свойства» (Preferences) (рис. 4.2) со следующими вкладками:

- Paths (Путь) – позволяет вам указать путь к файлам баз данных и другие настройки;
- Save (Сохранить) – в этой закладке вы можете настроить период автоматического сохранения;
- Parts (Компоненты) – позволяет вам выбрать режим размещения компонентов и стандарт символов (ANSI или DIN). Также здесь находятся настройки симуляции по умолчанию;
- General (Общие) – здесь вы можете настроить: режимы выделения объектов, колесо мыши и инструменты соединения проводников.

4.1.3. Настройка листа

Диалоговое окно настройки свойств листа (Sheet Properties) используется для изменения свойств каждого листа. Эти свойства сохраняются с файлом схемы, поэтому если проект открывается на другом компьютере, настройки не изменяются. Для того чтобы открыть свойства листа, выберите пункт Опции/Свойства листа (Options/Sheet Properties), откроется окно – рис. 4.3.

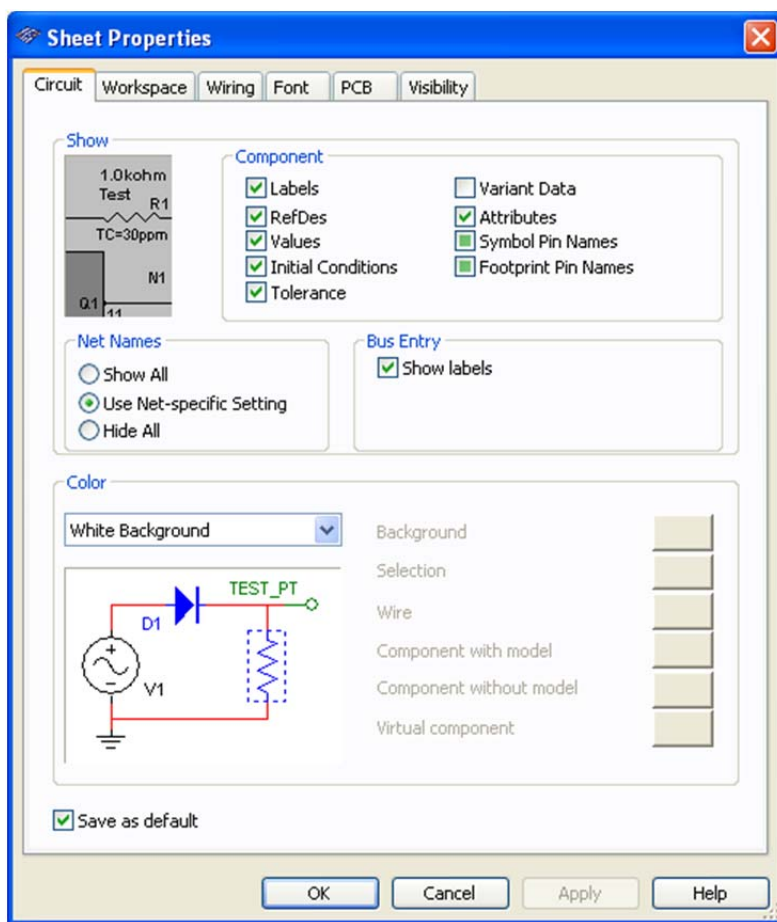


Рис. 4.3. Свойства листа

Настройки листа сгруппированы в следующие закладки:

- Circuit (Схема) – вы можете выбрать цветовую схему и внешний вид текста рабочей области.
- Workspace (Рабочая область) – вы можете настроить размер листа и его свойства.
- Wiring (соединение) – настройки соединений проводников и шин.
- Font (Шрифт) – вы можете выбрать шрифт, его размер и начертание для текстовых элементов схемы.
- PCB (Печатная плата) – настройки печатной платы.
- Visibility (Доступность) – вы можете скрыть или отобразить дополнительные слои комментариев.

Подробное описание каждого свойства листа, а также любых других настроек можно посмотреть в руководстве пользователя Multisim (Multisim User Guide) или в файле справки Multisim (Multisim helpfile).

4.1.4. Обзор компонентов

Компоненты – это основной элемент принципиальной схемы. В среде Multisim присутствуют два типа компонентов: реальные (real) и идеальные (Virtual), рис. 4.4.

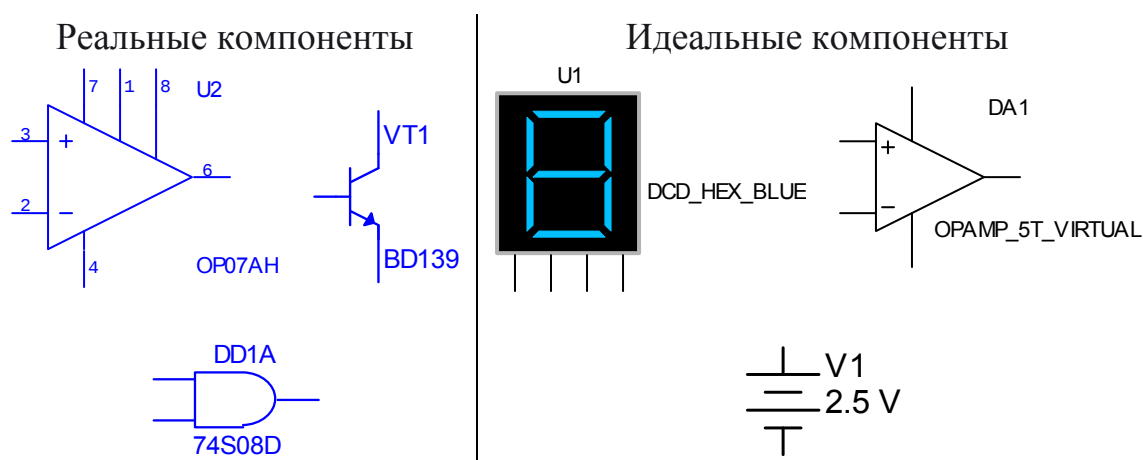


Рис. 4.4. Символы различных компонентов

Реальные компоненты имеют четко определенные неизменяемые значения своих параметров, идеальные компоненты настраиваются пользователем в зависимости от решаемой задачи.

В среде Multisim все компоненты разбиты на группы (groups) и семейства (families) в соответствии с табл. 4.1.

Таблица 4.1

Группы компонентов

Groups	Группы
Source Components	Источники сигналов
Basic Components	Базовые компоненты
Diodes	Диоды
Transistors	Транзисторы
Analog Components	Аналоговые компоненты
TTL	ТТЛ логика
CMOS	КМОП логика
Advanced Peripherals	Периферийные компоненты
Misc. Digital Components	Цифровые с мультивыбором компоненты
Mixed Components	Смешанные компоненты
Indicators	Индикаторы
Power	Силовые компоненты
Misc. Components	Дополнительные компоненты
RF Components	Радиочастотные компоненты
Electromechanical Components	Электромеханические компоненты

Для выбора группы компонентов и размещения компонента на рабочем поле требуется кликнуть по соответствующей пиктограмме на панели компонентов (Components Toolbar), рис. 4.5. Откроется проводник компонентов (Component Browser), рис. 4.6. Горячая клавиша по умолчанию для размещения компонента – Ctrl-W.



Рис. 4.5. Панель «компоненты» (Components)

В Проводнике компонентов (рис. 4.6) отображается текущая база данных (Database), в которой хранятся отображаемые компоненты, описание выбранного компонента (Function), его модель и производитель.

Для поиска компонента на вкладке «группа» (Group) выберите Select all groups (выбрать все группы) и в поле «компонент» (Component) начните набирать название компонента, и проводник автоматически подберет подходящие элементы. Кнопка Поиск (Search) открывает расширенный поиск.

Символ звездочки «*» заменяет любой набор символов. Например, среди результатов запроса «LM*AD» будут как «LM101AD», так и «LM108AD».

В среде Multisim присутствуют интерактивные компоненты, которые могут реагировать на действия пользователя. Изменение парамет-

ров этих компонентов сразу отражается на результатах эмулирования. Компоненты управляются с помощью клавиш, указанных под каждым элементом.

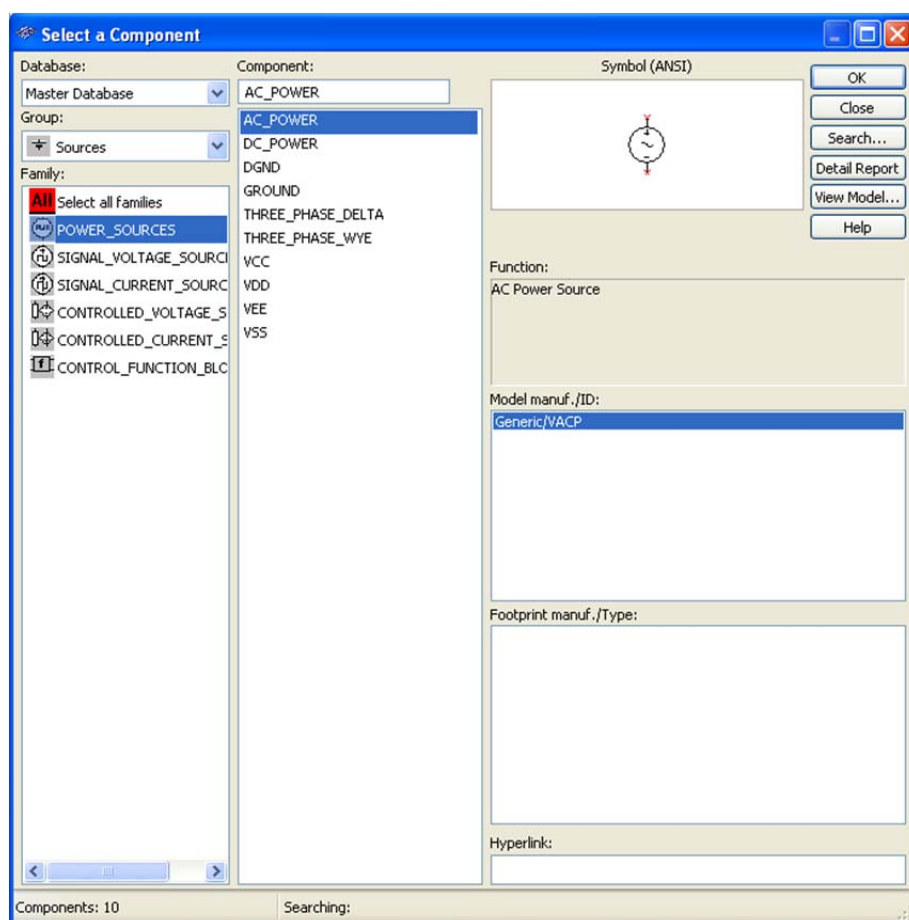


Рис. 4.6. Проводник компонентов (Component Browser)

На рис. 4.7 приведено несколько компонентов: клавиша «А» увеличивает сопротивление потенциометра до 100 % от указанной величины (1 кОм); клавиша «В» изменяет емкость переменного конденсатора; клавиша «С» регулирует индуктивность переменной катушки индуктивности; пробел (space) – открывает или закрывает ключ. Например, чтобы уменьшить сопротивление, зажмите Shift и нажмите «А».



Рис. 4.7. Интерактивные компоненты

Для просмотра или изменения свойств компонента необходимо два раза кликнуть по нему левой кнопкой мыши, после этого откроется окно свойств – рис. 4.8, а.

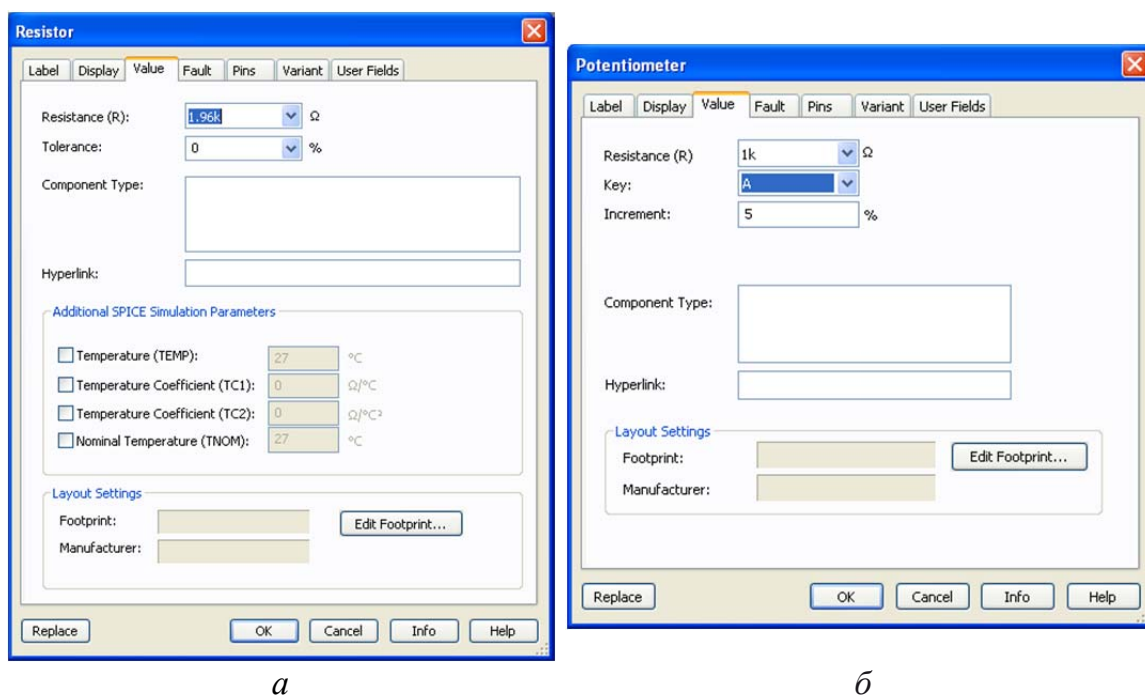


Рис. 4.8. Свойства реального (а) и интерактивного (б) компонентов

Для изменения «горячей клавиши» интерактивного компонента следует в окне свойств (рис. 4.8, б) выбрать нужную клавишу из выпадающего меню «клавиша» (Key). Поле «инкремент» (Increment) позволяет в процентном отношении настроить приращение номинала компонента.

4.1.5. Сдвиг, поворот и выделение компонентов

После выбора компонентов из базы данных они размещаются на рабочем поле и соединяются между собой. Двойной щелчок по наименованию компонента или нажатие клавиши «Ok» в проводнике компонентов позволяет выбрать компонент, а затем, просто кликнув в желаемом месте рабочего поля, можно поместить компонент на него.

Во время размещения компонентов их можно вращать, нажимая «Ctrl+R». Чтобы повернуть установленный компонент, выделите его и нажмите «Ctrl+R» или кликните на нем правой кнопкой мыши, откроется контекстное меню – рис. 4.9. В контекстном меню выберите «повернуть на 90° по часовой стрелке» (90 Clockwise) или «повернуть на 90° против часовой стрелки» (90 CounterCW).

Для выделения компонента просто кликните по нему мышью, тогда он обозначится пунктирной линией. Клавиша Shift позволяет добавлять или снимать выделение с нескольких компонентов.

Для того чтобы отразить компонент, кликните на компоненте правой кнопкой мыши и в контекстном меню выберите «отразить по горизонтали» (Flip Horizontal) или «отразить по вертикали» (Flip Vertical).

Компоненты можно заменять на другие с помощью контекстного меню, для чего кликните на компоненте правой кнопкой мыши и в открывшемся контекстном меню (рис. 4.9) выберите пункт «заменить компоненты» (Replace Components...). Новый компонент выбирается в открывшемся окне проводника компонентов.



Рис. 4.9. Контекстное меню компонента

4.1.6. Соединение компонентов

Для соединения компонентов кликните по выводу одного из компонентов, чтобы начать вести соединяющий проводник, а для завершения соединения их между собой – кликните по конечному выводу. Результат соединения двух компонентов (источника постоянного напряжения и резистора) представлен на рис. 4.10.

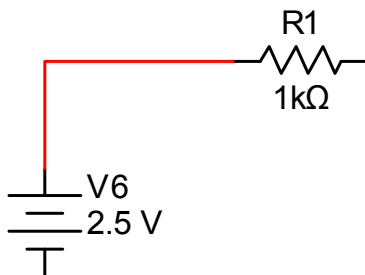


Рис. 4.10. Соединение компонентов

Для размещения на рабочем поле проводника или узла кликните на пустом месте рабочего поля правой кнопкой мыши, откроется контекстное меню, выберите пункт «Добавить схемный объект» (Place Schematic на рис. 4.11), для добавления узла выберите Junction, а для проводника – Wire.

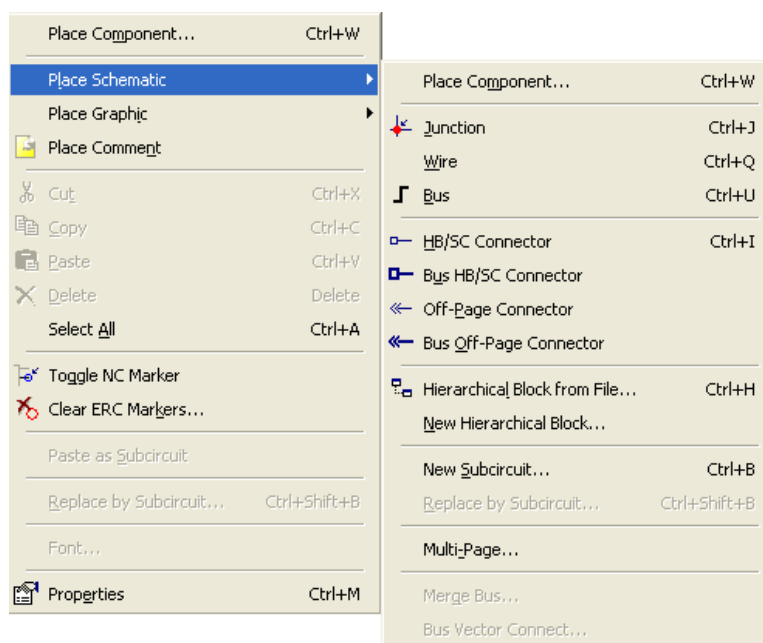
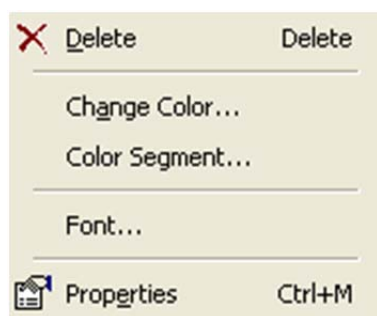
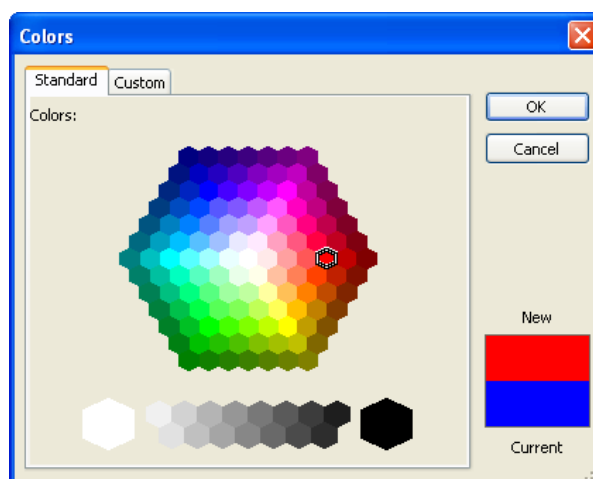


Рис. 4.11. Контекстное меню «Добавить схемный объект» (Place Schematic)

Для изменения цвета проводника кликните на нем правой кнопкой мыши, откроется контекстное меню (рис. 4.12, а), выберите «Изменить цвет» (Change Color), в окне «Цвета» (Colors) (рис. 4.12, б) выберите требуемый цвет и нажмите «Ok».



а



б

Рис. 4.12. Редактирование цвета проводников

Упражнение 1 – Поиск, размещение и соединение компонентов

1. Создайте новый файл: Файл→Новый→Ввод схемы (File→New→Schematic Capture).
2. Вызовите проводник компонентов с помощью кнопки Источники (Sources) на панели компонентов (Components Toolbar), рис. 4.13, или нажмите «Ctrl+W».



Рис. 4.13. Панель компонентов (Components Toolbar)

3. Найдите и поместите на рабочее поле компонент «заземление» (Ground), он находится в семействе источников питания POWER_SOURCES.
4. Найдите и поместите на рабочее поле микросхему операционного усилителя OP297AZ. Для поиска микросхемы на вкладке «группа» (Group) выберите Select all groups (выбрать все группы) и в поле «компонент» (Component) начните набирать название OP297AZ, и проводник автоматически подберет подходящий элемент. Перед тем как поместить компонент на рабочее поле, вам предложат на выбор один из двух операционных усилителей. Это обусловлено тем, что в одном корпусе микросхемы находятся два операционных усилителя.
5. Выберите вариант А, поместите компонент на рабочее поле, затем нажмите отмена (Cancel) – .
6. Разместите на рабочем поле: два источника постоянного напряжения DC_POWER; один источник переменного напряжения AC_POWER; два резистора номиналами 10 и 50 кОм соответственно; один компонент «Заземление» (Ground), рис. 4.14.

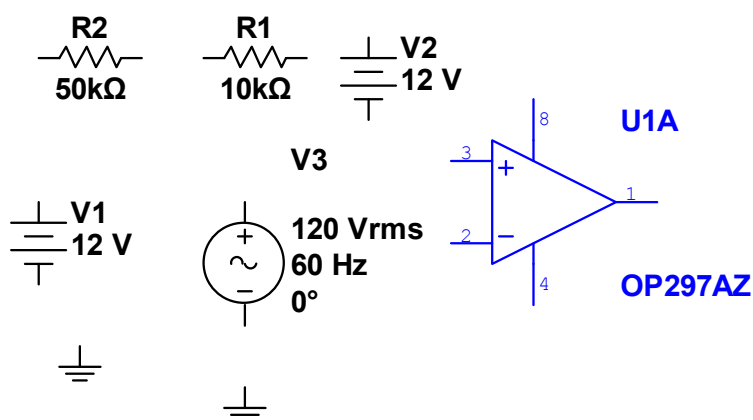


Рис. 4.14. Элементы для сборки схемы

7. Используя команды вращения, соедините компоненты в схему, как показано ниже, рис. 4.15.

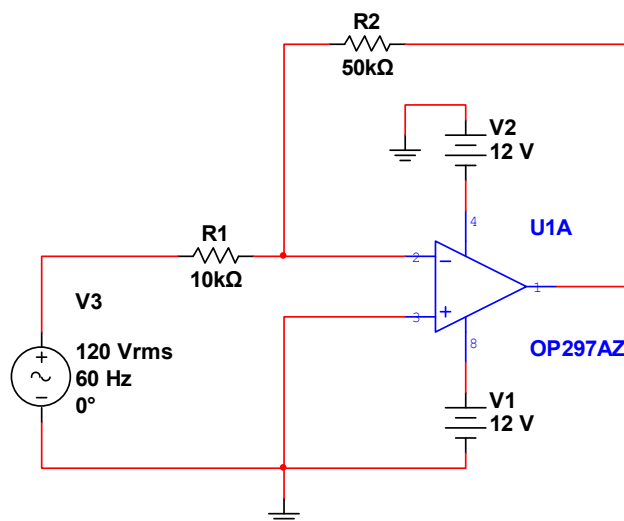


Рис. 4.15. Схема эксперимента

8. Выполните настройку свойств компонентов. Два раза кликните по источнику переменного напряжения AC_POWER левой кнопкой мыши, откроется окно свойств, установите действующее значение напряжения равным 1 В (Voltage (RMS)) и частоту сигнала, равную 1 кГц (Frequency (F)). Аналогично установите напряжение равным 15 В для источников постоянного напряжения DC_POWER. Схема примет вид, показанный на рис. 4.15.

9. Сохраните схему под именем Circuit1 командой Файл→Сохранить как (File→Save As).

10. Конец упражнения.

4.1.7. Графические аннотации

В среде Multisim есть средства для графического оформления схемы. На панели графических аннотаций (Graphic Annotation, рис. 4.16) присутствуют следующие элементы: картинки, многоугольники, дуги, эллипсы, прямоугольники, полилинии, линии, текст и комментарии.



Рис. 4.16. Панель графических аннотаций

Чтобы добавить графический элемент, не используя панель графических аннотаций, кликните на пустом месте рабочего поля правой кнопкой мыши, откроется контекстное меню, рис. 4.17. В контекстном меню выберите пункт «Добавить графический объект» (Place Graphic).

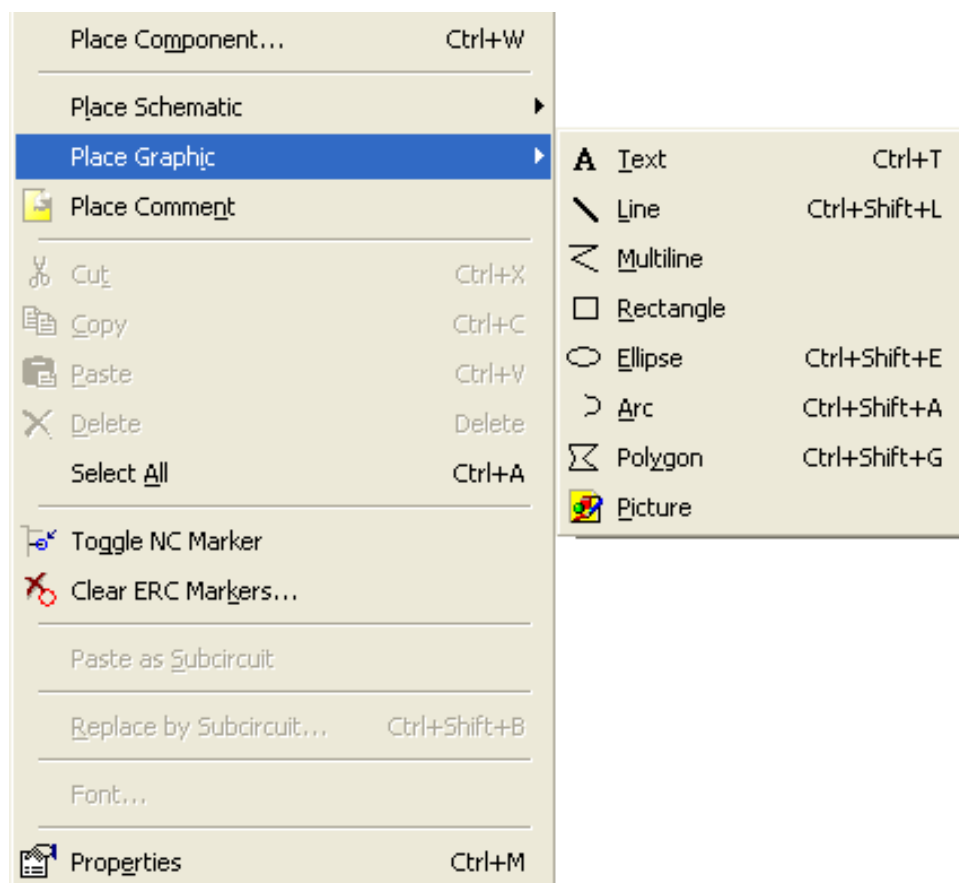


Рис. 4.17. Контекстное меню «Добавить графический объект» (Place Graphic)

4.1.8. Использование интерактивного симулятора схем

Перед началом симуляции внимательно все проверьте. У всех схем должен быть источник и заземление. Когда все готово, нажмите кнопку запуска симулятора  или F5. Запустится интерактивная симуляция.

Настройки интерактивной симуляции можно изменять в меню Симуляция→Настройки интерактивной симуляции (Simulate→Interactive Simulation Settings). Некоторые из настроек приведены на рис. 4.18. По умолчанию установлено время окончания симуляции через $1e+30$ секунд. Шаг по времени и начальные условия определяются автоматически.

Чтобы посмотреть результаты симулирования схемы, воспользуйтесь динамическим пробником (Measurement Probe). Нажмите иконку пробника на панели инструментов (рис. 2.19), и курсор мыши будет выполнять его роль, а при наведении на любой проводник в схеме отобразятся следующие данные:

- напряжение (мгновенное значение, амплитудное, среднеквадратичное и постоянная составляющая);
- частота.

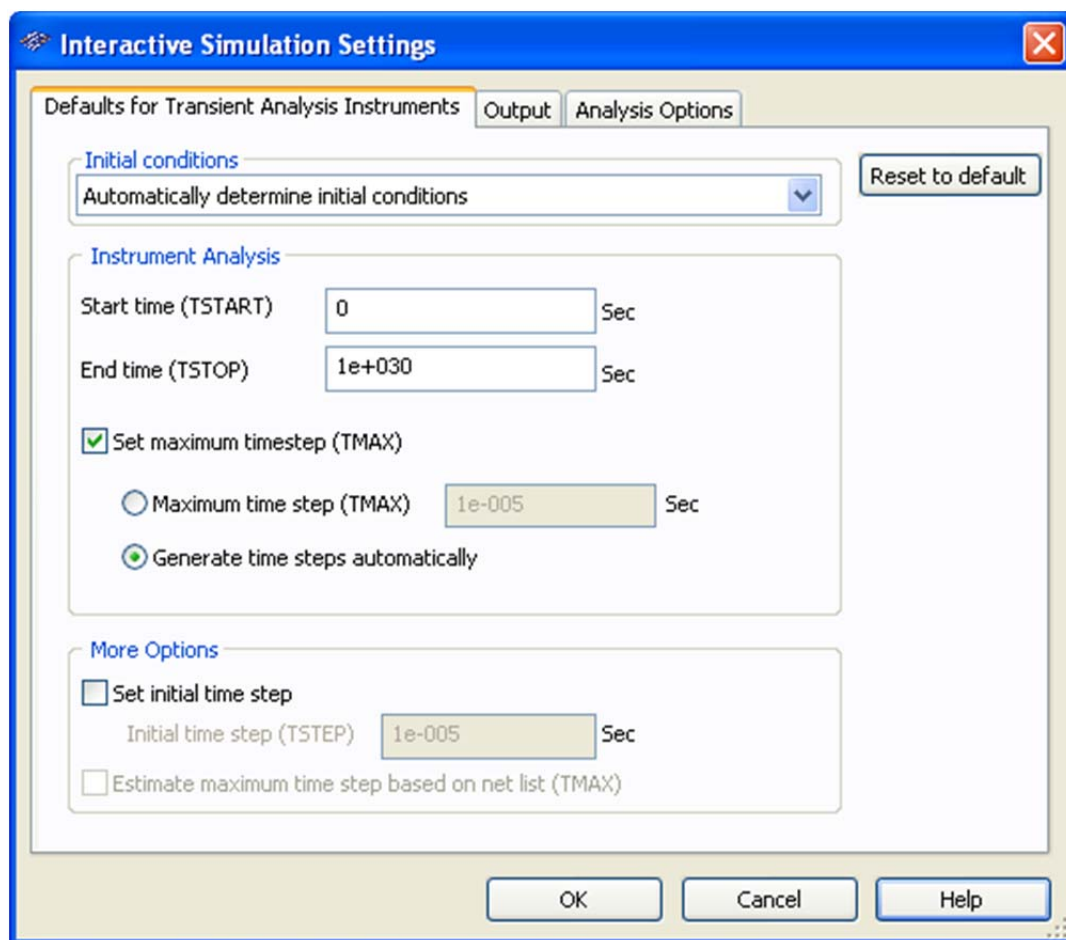


Рис. 4.18. Настройки интерактивной симуляции

Результаты симуляции также отображаются на виртуальных приборах.

4.1.9. Виртуальные приборы

Виртуальные приборы – это модели реальных приборов, таких как осциллографы, генераторы сигналов, анализаторы спектра и плоттеры Боде для отображения результатов эмуляции.

Чтобы добавить виртуальный прибор, кликните по нему левой кнопкой мыши на панели инструментов (Instruments), рис. 4.19.

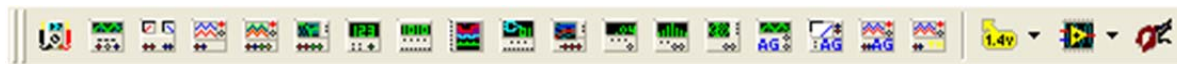


Рис. 4.19. Панель инструментов (Instruments)

Чтобы посмотреть лицевую панель прибора, дважды кликните на иконку прибора левой кнопкой мыши. Выводы прибора соединяются с элементами схемы аналогично соединению компонентов.

В Multisim также есть эмулированные реально существующие приборы. К таким приборам, например, относится Tektronix TDS 2024

Oscilloscope. Они выглядят и действуют точно в соответствии с техническим описанием производителя.

В каждой схеме может быть использовано необходимое количество измерительных приборов, включая копии одного прибора. Каждая копия прибора настраивается и соединяется отдельно.

Рассмотрим основные виртуальные приборы более подробно.

4.1.9.1. Мультиметр (Multimeter)

Мультиметр (Multimeter) предназначен для измерения переменного или постоянного напряжения или тока, сопротивления или затухания между двумя узлами схемы. Иконка и лицевая панель мультиметра приведены на рис. 4.20.



Рис. 4.20. Иконка и лицевая панель мультиметра (Multimeter)

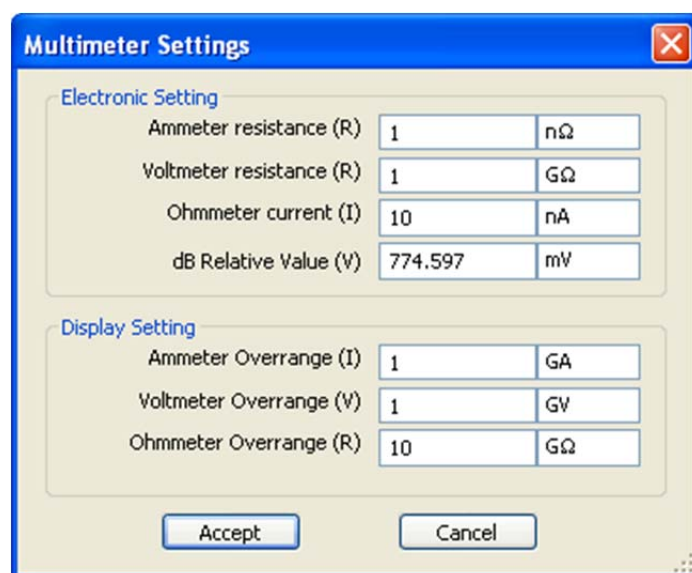


Рис. 4.21. Окно настроек мультиметра (Multimeter Settings)

Диапазон измерений мультиметра устанавливается автоматически. Внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить, кликнув левой кнопкой мыши по кнопке «Set...» на

лицевой панели мультиметра, а в открывшемся окне настроек (Multimeter Settings) установить необходимые параметры, рис. 4.21. На рис. 4.22, а показано подключение мультиметра для измерения тока, на рис. 4.22, б – подключение для измерения напряжения, сопротивления и коэффициента затухания.

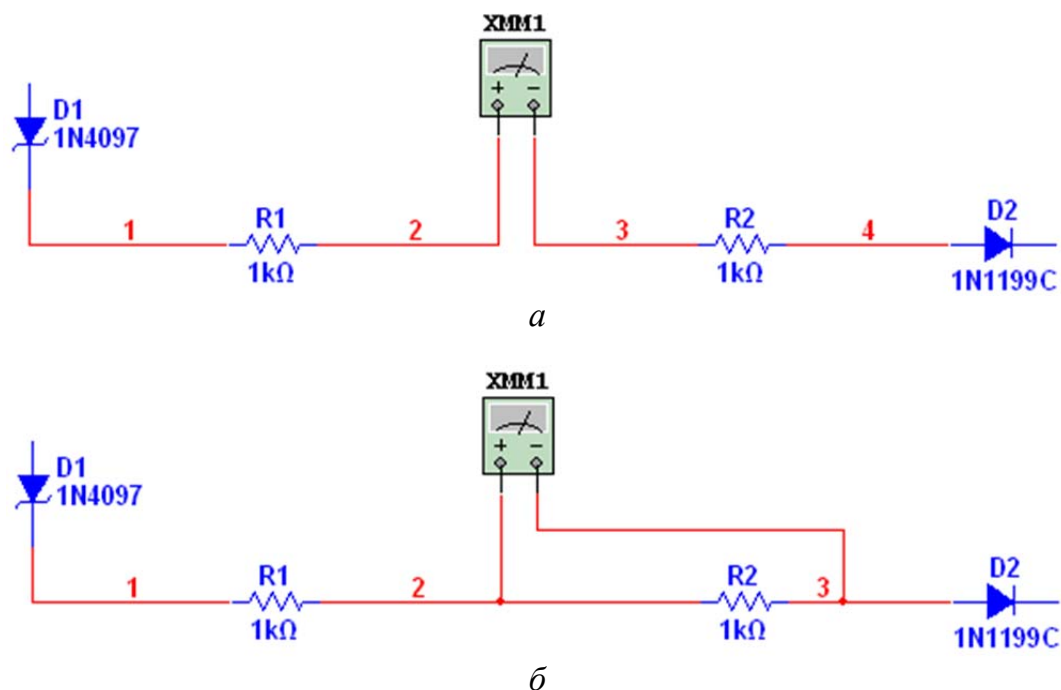


Рис. 4.22. Подключения мультиметра для измерения тока (а) и напряжения, сопротивления, коэффициента затухания (б)

4.1.9.2. Функциональный генератор (Function Generator)

Функциональный генератор (Function Generator) – источник переменного напряжения синусоидальной, прямоугольной и пилообразной формы, иконка и лицевая панель представлены на рис. 4.23.



Рис. 4.23. Иконка и лицевая панель функционального генератора (Function Generator)

Настройки генератора позволяют устанавливать частоту, амплитуду, скважность и смещение сигнала. Для сигнала прямоугольной формы можно регулировать время нарастания и спада соответственно переднему и заднему фронтам, для этого кликните левой кнопкой мыши по кнопке «Set Rise/Fall Time» на лицевой панели генератора.

4.1.9.3. Ваттметр (Wattmeter)

Ваттметр (Wattmeter) предназначен для определения активной мощности. Иконка и лицевая панель ваттметра приведены на рис. 4.24, а схема подключения ваттметра показана на рис. 4.25.



Рис. 4.24. Иконка и лицевая панель ваттметра

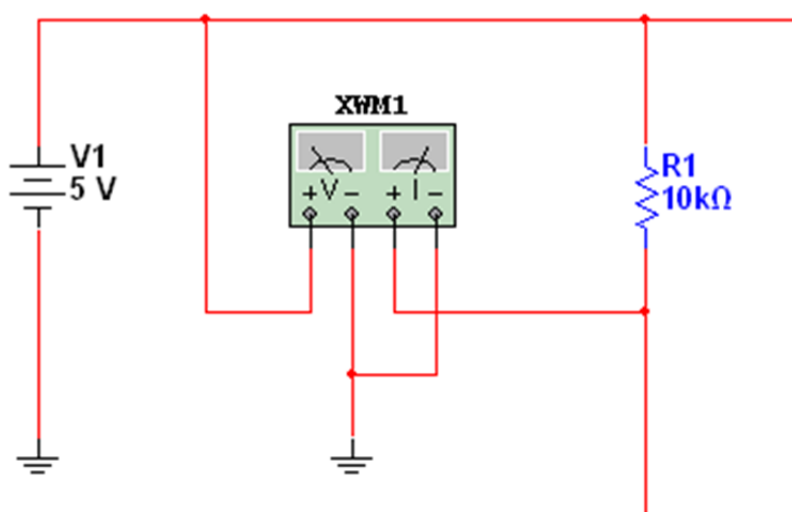


Рис. 4.25. Схема подключения ваттметра

4.1.9.4. Осциллографы (Oscilloscope)

В Multisim существуют двух- и четырехканальные осциллографы (рис. 4.26 и 4.27), управление которых осуществляется так же, как и реальными приборами. Они позволяют устанавливать параметры развертки по напряжению и времени, выбирать открытый или закрытый вход, тип и уровень срабатывания запуска и т. д.

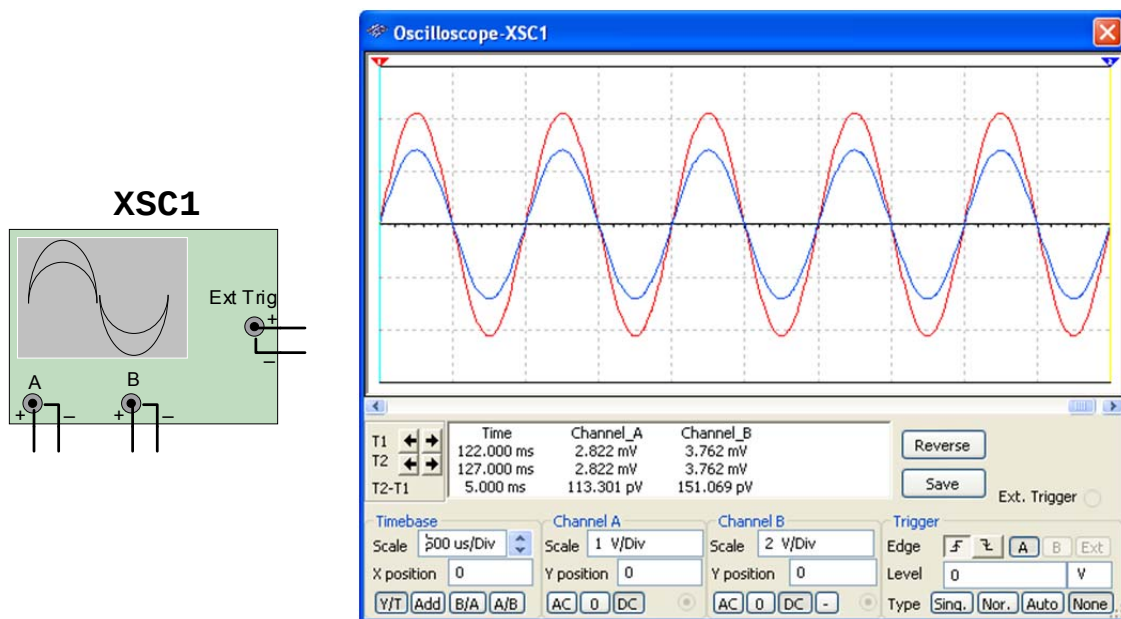


Рис. 4.26. Иконка и лицевая панель двухканального осциллографа

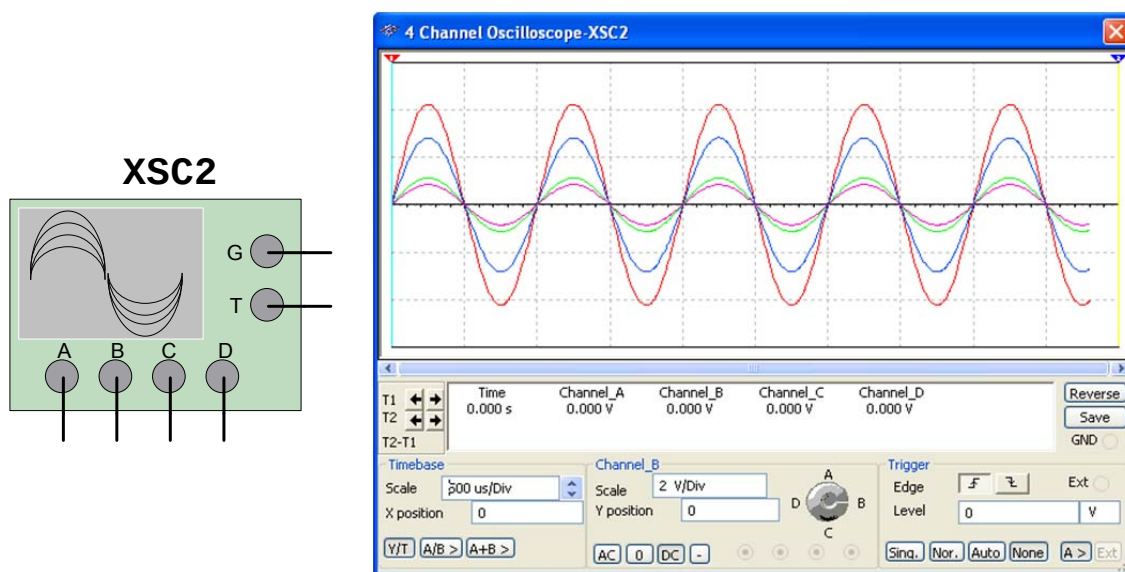


Рис. 4.27. Иконка и лицевая панель четырехканального осциллографа

4.1.9.5. Плоттер Бode (Bode Plotter)

Плоттер Бode (Bode Plotter) позволяет строить амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики, рис. 4.28. Выводы «IN+» и «IN-» виртуального прибора подключаются параллельно входным зажимам исследуемого четырехполюсника, а выводы «OUT+» и «OUT-» – параллельно его выходным зажимам.

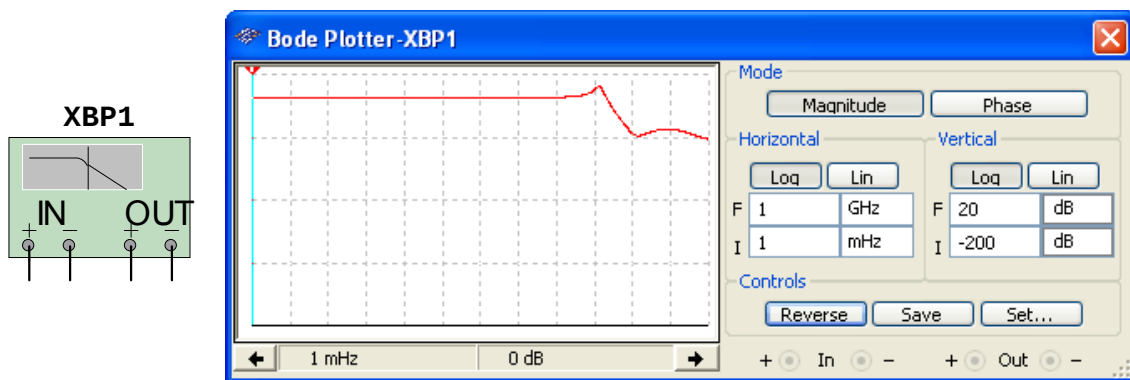


Рис. 4.28. Иконка и лицевая панель Плоттер Бодэ (Bode Plotter)

4.1.9.6. Частотомер (Frequency Counter)

Частотомер (Frequency Counter) предназначен для измерения частоты сигнала, периода следования и длительности импульсов, времени нарастания и спада переднего и заднего фронтов, рис. 4.29.

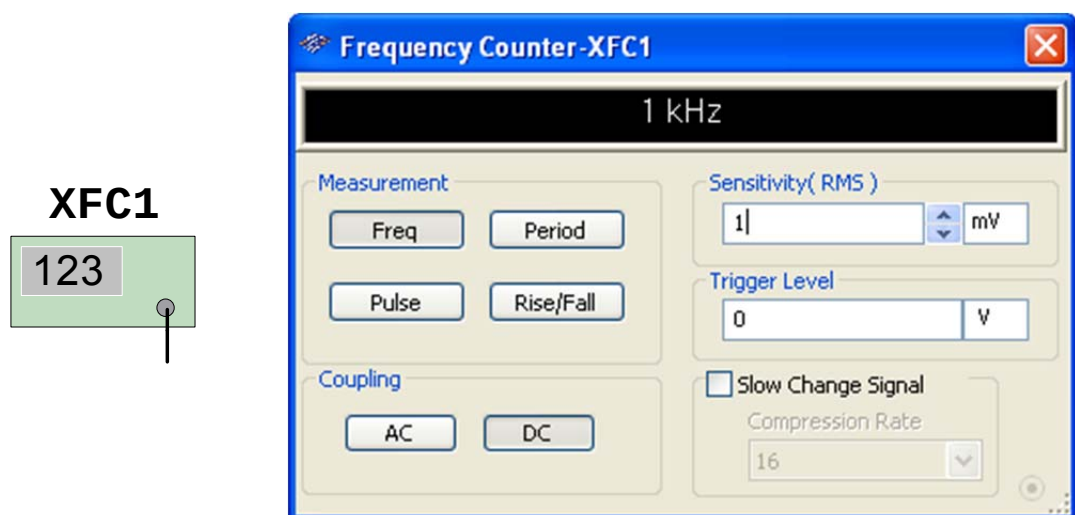


Рис. 4.29. Иконка и лицевая панель частотомера (Frequency Counter)

4.1.9.7. Анализатор вольт-амперных характеристик (IV Analyzer)

Анализатор вольт-амперных характеристик (IV Analyzer) предназначен для определения и визуализации вольт-амперной характеристики (ВАХ) двух- и трехполюсников (диодов, стабилитронов, транзисторов и т. д.), рис. 4.30.

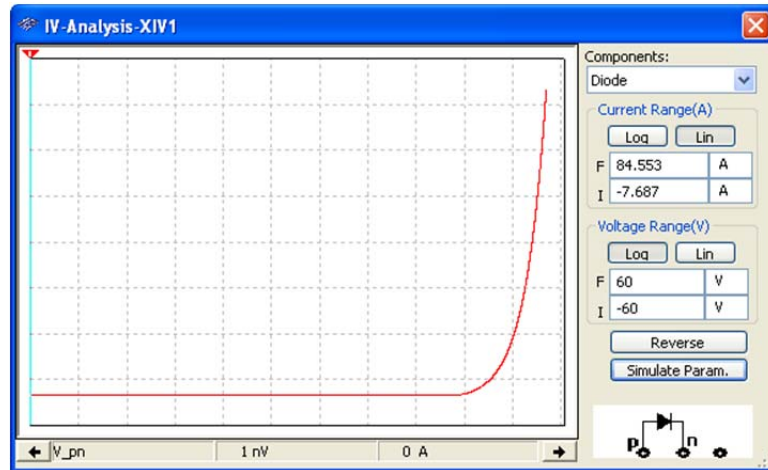
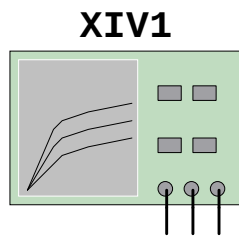


Рис. 4.30. Иконка и лицевая панель анализатора вольт-амперных характеристик (IV Analyzer)

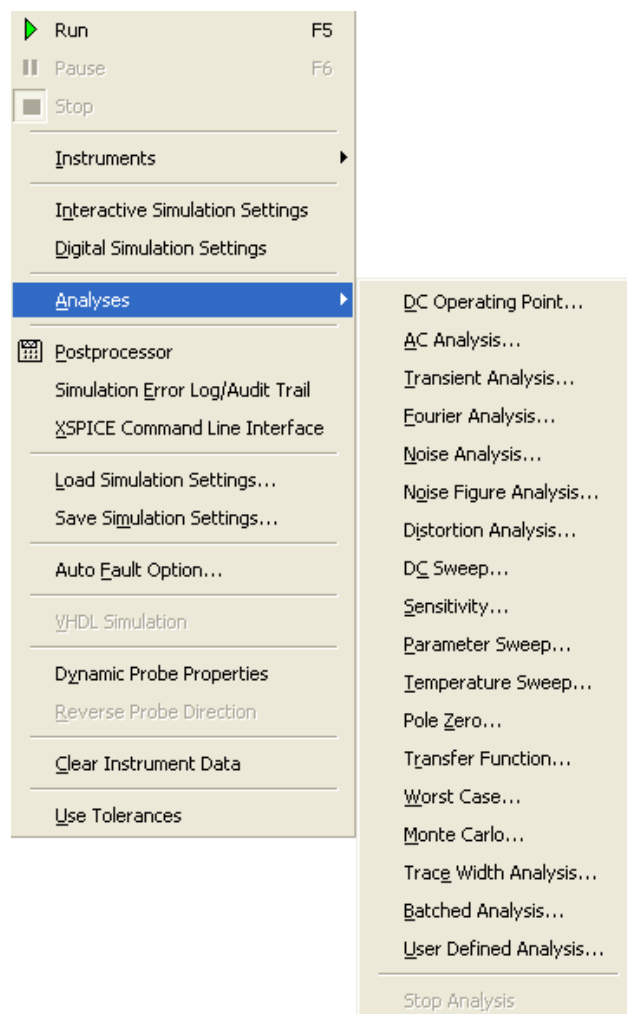
4.1.10. Анализ схем

В составе Multisim имеются средства для анализа данных симуляции. Чтобы начать анализ, зайдите в меню Симуляция→Анализ (Simulate→Analyses) и выберите нужную функцию. Список всех функций Multisim приведен на рис. 4.31.

Для отображения результатов моделирования и анализа в графическом виде в Multisim используются две подпрограммы: постобработка (Postprocessor) и плоттер (Grapher).

Плоттер (Grapher) – это основной инструмент просмотра результатов симуляции. Он открывается из меню Вид→Плоттер (View→Grapher). Различные элементы плоттера представлены на рис. 4.32.

Данные отображаются на графике (Graph) и в таблице (Chart). Окно разделено на несколько закладок, число которых зависит от работающих функций анализа и используемых вирту-



альных приборов. Активный график обозначается красной стрелкой слева от него (рис. 4.32). Перед началом редактирования свойств графика удостоверьтесь в том, что он активен.

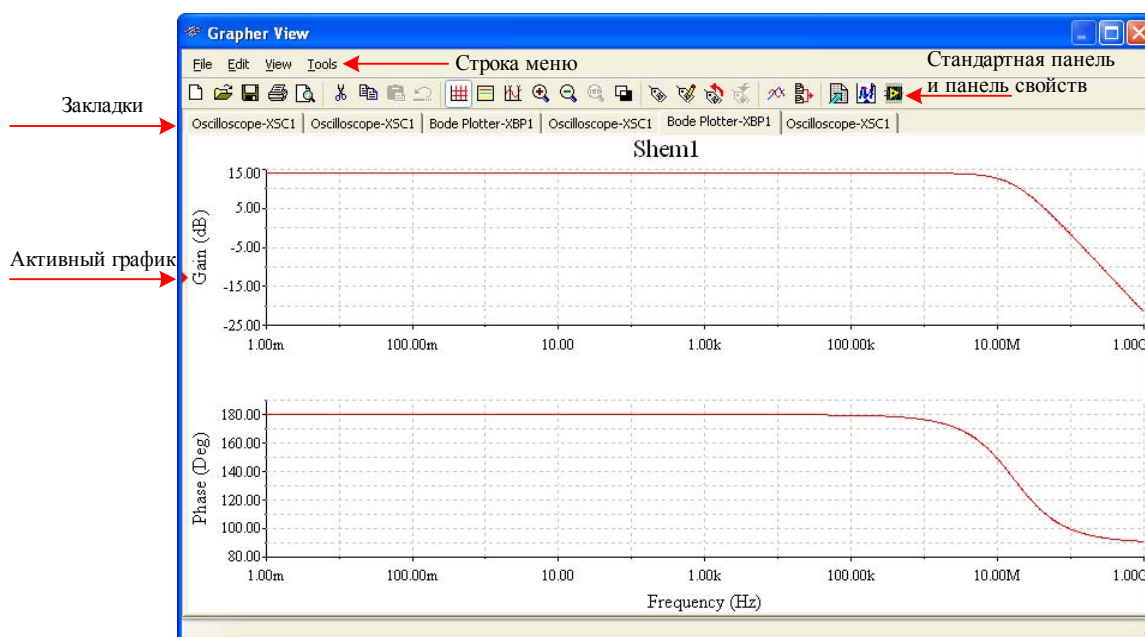


Рис. 4.32. Плоттер (Grapher)

Большинство настроек плоттера находятся на панели свойств, рис. 4.33.



Рис. 4.33. Панель свойств плоттера

Можно изменять масштабы, диапазоны, заголовки, стили линий осей и многие другие параметры. Чтобы открыть окно свойств плоттера (Page Properties) или окно свойств активного графика, воспользуйтесь пунктами меню Редактировать→Свойства плоттера (Edit→Page Properties) или Редактировать→Свойства графика (Edit→Properties), рис. 4.34 и 4.35 соответственно, или нажмите на соответствующие пиктограммы на панели свойств.

Для инициирования курсорных измерений кликните по соответствующей пиктограмме на панели свойств или воспользуйтесь пункта-

ми меню Вид→Отобразить курсоры (View→Show Cursors). Курсоры можно перетаскивать с помощью левой кнопки мыши. Для изменения настроек курсора кликните на нем правой кнопкой мыши, откроется контекстное меню, рис. 4.36.

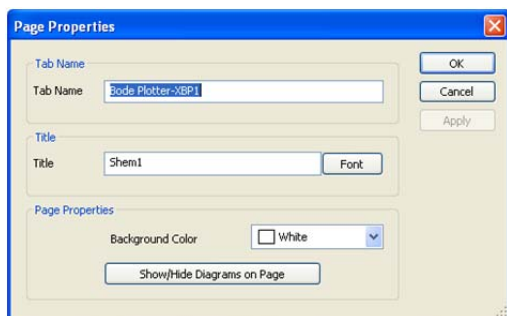


Рис. 4.34. Окно свойств
плоттера

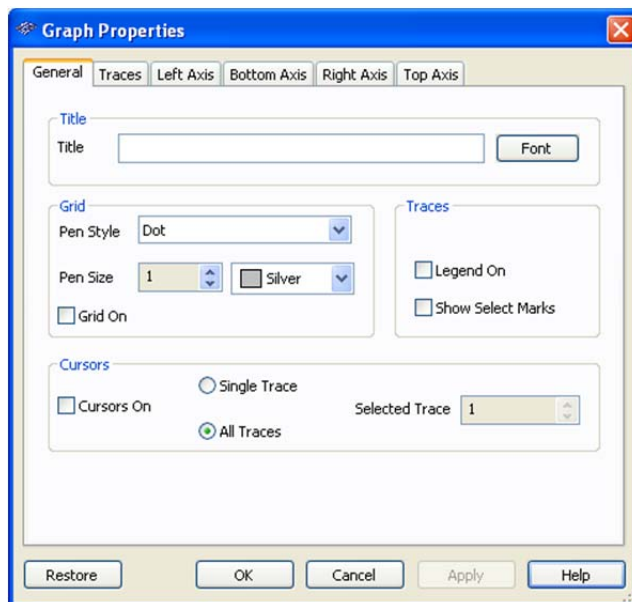


Рис. 4.35. Окно свойств графика

Можно переместить курсор на заданное значение по оси X/Y или к следующему минимуму/максимуму в любом направлении, рис. 4.37.



Рис. 4.37. Контекстное меню курсора

4.2. Программа самостоятельной подготовки к выполнению лабораторных работ по «Электронике» в среде Multisim 10

Лабораторная работа № 2.1

Исследование диодов и диодных схем

1.1. Исследование схем однополупериодного выпрямителя

Соберите схему для снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода, приведенной на рис. 4.38. Для этого найдите и поместите на рабочее поле компоненты: заземление (Ground) – он находится в семействе источников питания POWER_SOURCES, источник постоянного напряжения DC_POWER – находится там же, и диод 1N4148 – семейство Diode.

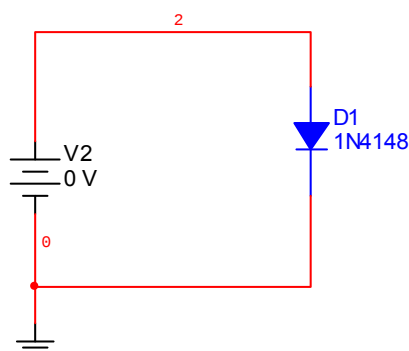


Рис. 4.38. Схема для снятия ВАХ диода

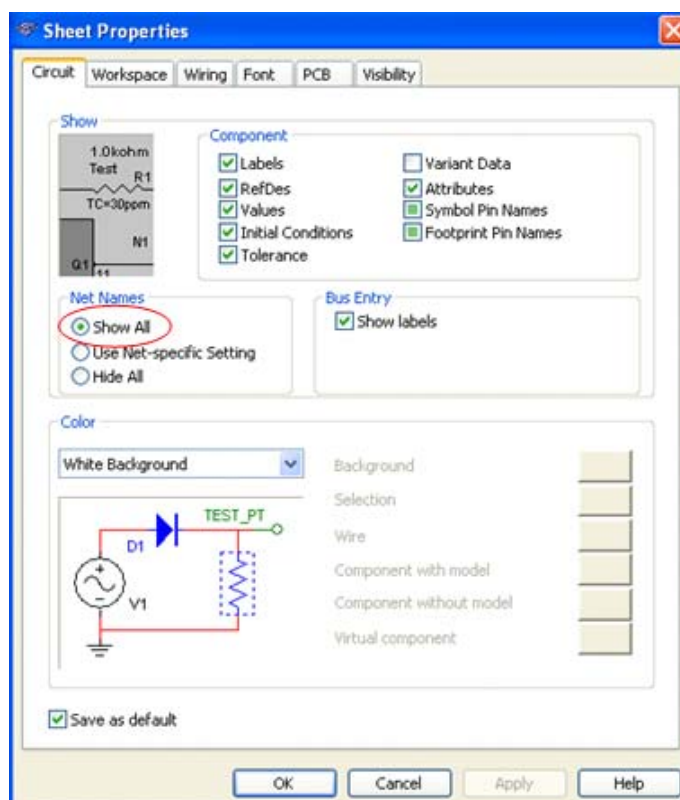
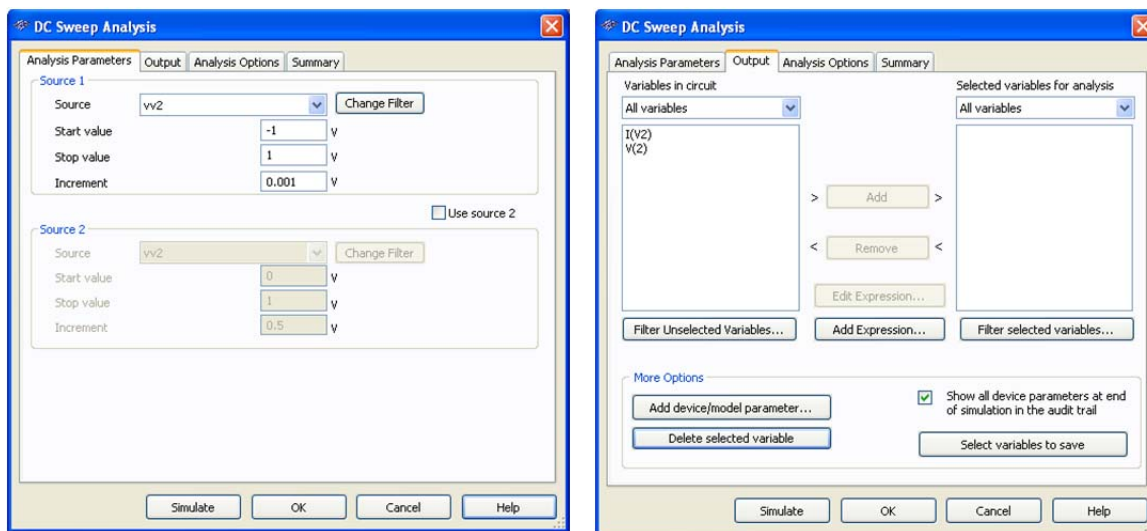


Рис. 4.39. Свойства листа (нумерация проводников)

Следует обратить внимание, что в схеме на рис. 4.38 все проводники пронумерованы, это необходимо для использования функций анализа (Analyses) и постобработки (Postprocessor). Для того чтобы отобразить нумерацию проводников, откройте диалоговое окно настройки свойств листа (Sheet Properties) – Опции/Свойства листа (Options/Sheet

Properties) и отметьте поле «показать все» (Show All) раздела «имена проводников» (Net Names), рис. 4.39.

Для начала анализа ВАХ диода выберем тип анализа DC Sweep из меню Simulate/Analyses/DC Sweep, откроется окно настроек, рис. 4.40, а. На вкладке Analysis Parameters настроим пределы и шаг приращения напряжения источника питания. Начальное значение (Start Value) – 1 В, конечное значение (Stop Value) – 1 В, шаг (Increment) – 1 мВ.



а

б

Рис. 4.40. Настройки параметров анализа DC Sweep

Чтобы просмотреть ток через диод, необходимо добавить в список выходных переменных ток диода. Перейдите на вкладку Output (рис. 4.40, б) и нажмите на кнопку **Add device/model parameter...**, откроется окно добавления параметров компонента, рис. 4.41.

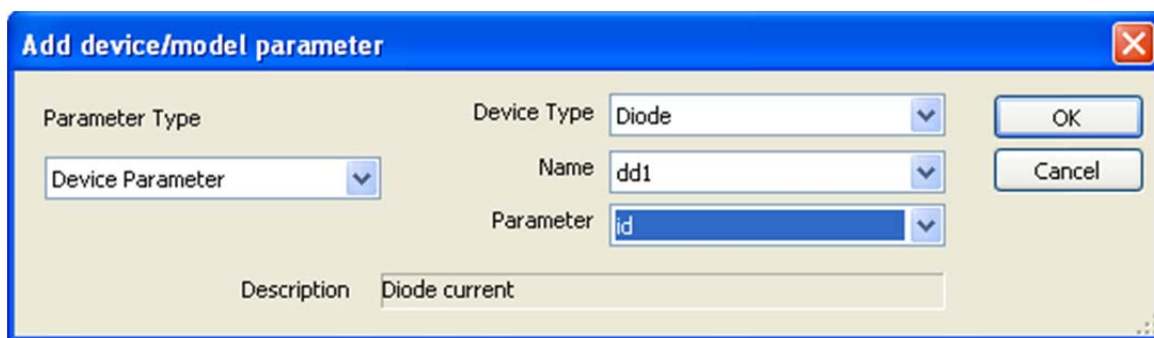


Рис. 4.41. Добавления параметров компонента

В качестве нового параметра выберите ток через диод «id», как показано на рис. 4.41, и нажмите **OK**. Добавленный параметр появит-

ся в списке доступных переменных в схеме (рис. 4.42, а), выделите его и нажмите кнопку **Add**. Параметр появится в списке выбранных для анализа, рис. 4.42, б.

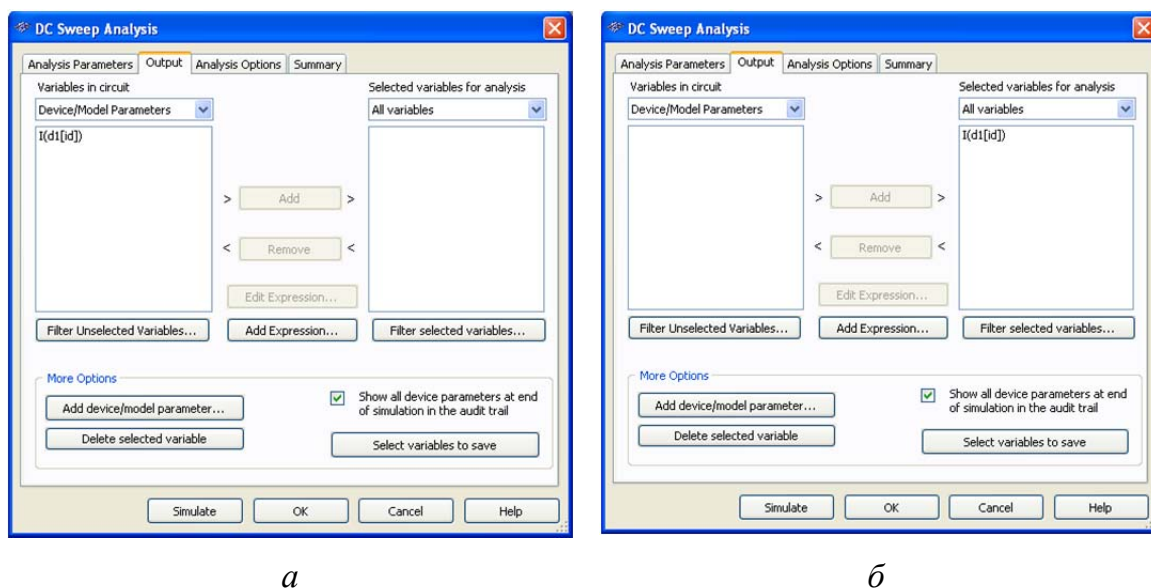


Рис. 4.42. Добавления нового параметра для анализа

Нажмите кнопку **Simulate** для запуска анализа, результаты анализа отображаются на плоттере, как показано на рис. 4.43.

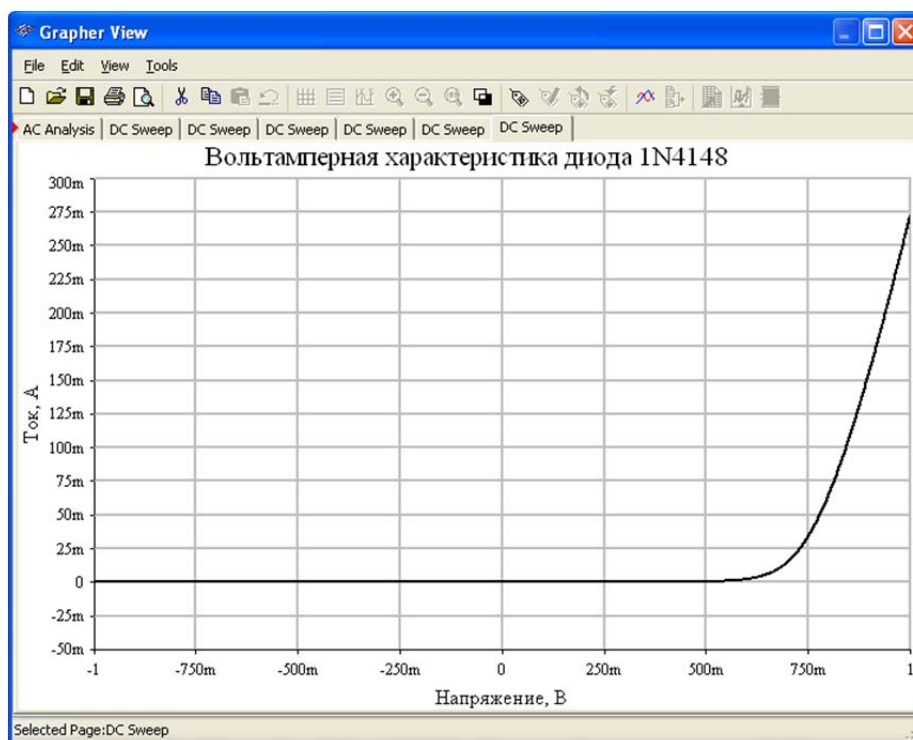


Рис. 4.43. ВАХ диода, прямая ветвь

Аналогично снимаются ВАХ любого двухполюсника.

Соберите схему однополупериодного выпрямителя, работающего на активную нагрузку, рис. 4.44.

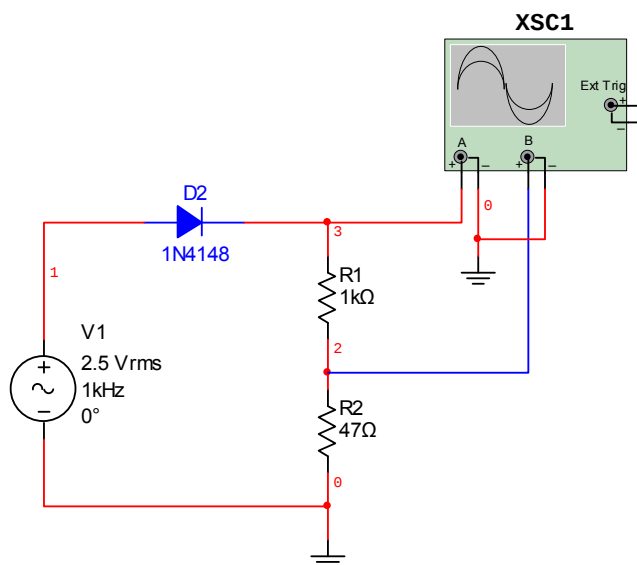


Рис. 4.44. Схема для исследования выпрямителя с активной нагрузкой



Рис. 4.45. Временные диаграммы выходного напряжения и тока диода выпрямителя

В качестве источника переменного напряжения используйте AC_POWER (семейство источников питания POWER_SOURCES). Резисторы находятся в группе Basic, семейство Resistor.

Установите амплитуду источника переменного напряжения 2,5 В и частоту $f = 1$ кГц. Нажмите кнопку запуска симулятора  или F5.

Иницируйте осциллограф, дважды кликнув на его иконке левой кнопкой мыши, и наблюдайте временные диаграммы выходного напряжения (A+) и тока диода (B+) выпрямителя (рис. 4.45). Для того чтобы остановить симуляцию, нажмите кнопку  (Stop).

Измерьте осциллографом амплитуды выходного напряжения и тока. Определите период входного напряжения и временной интервал ненулевого тока диода. Через полученные данные найдите значение угла отсечки тока Θ . Данные зафиксируйте для их дальнейшей обработки.

Последовательно устанавливая амплитуду источника переменного напряжения ($E = 2$ В, $E = 1,5$ В, $E = 1$ В), определяйте амплитуды выходного напряжения и тока, а также значения углов отсечки тока Θ .

Любое изменение схемы или параметров ее компонентов можно производить только после того, как режим симуляции остановлен.

Изменяйте частоту источника переменного напряжения, используйте AC_POWER и наблюдайте на повышенных частотах (десятки и сотни кГц), проявляются ли инерционные свойства диода VD1.

Соберите схему однополупериодного выпрямителя (рис. 4.46), работающего на активно-емкостную нагрузку. Установите амплитуду источника переменного напряжения 2,5 В и частоту $f = 1$ кГц. Нажмите кнопку запуска симулятора  или F5.

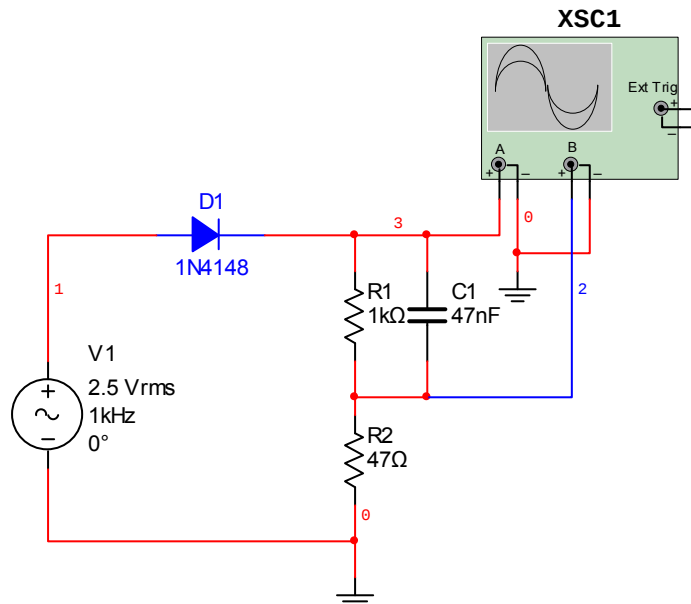


Рис. 4.46. Схема для исследования выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой

Конденсаторы находятся в группе Basic семейства Capacitor.

Пронаблюдайте временные диаграммы выходного напряжения (A+) и тока диода (B+) выпрямителя (рис. 4.47).



Рис. 4.47. Временные диаграммы выходного напряжения и тока диода выпрямителя

Изменяйте частоту источника переменного напряжения и наблюдайте, как с увеличением частоты изменяется амплитуда пульсаций.

Установите частоту источника переменного напряжения $f = 1 \text{ кГц}$, а вместо емкости 47 нФ установите емкость 10 мкФ (рис.4.48), затем емкость 1000 мкФ . Посмотрите, как изменяются пульсации со временем. Почему резко снизились пульсации выходного напряжения?

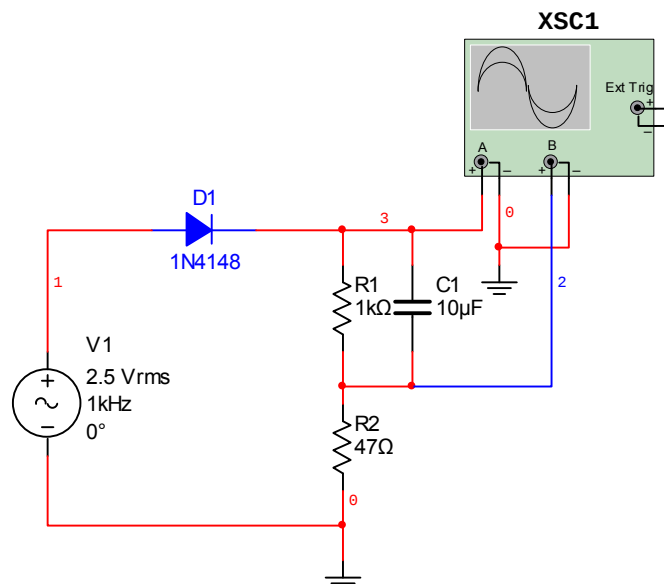


Рис. 4.48. Схема для исследования выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой

1.2. Исследование диодной цепи, работающей в режиме «малого» сигнала

Соберите схему для исследования режима «малого» сигнала работы диодной цепи (рис. 4.49). Напряжение источника V2 (DC_POWER) устанавливает координату рабочей точки на ВАХ диода, а относительно малое переменное напряжение обусловит вариацию токов и напряжений в окрестностях рабочей точки.

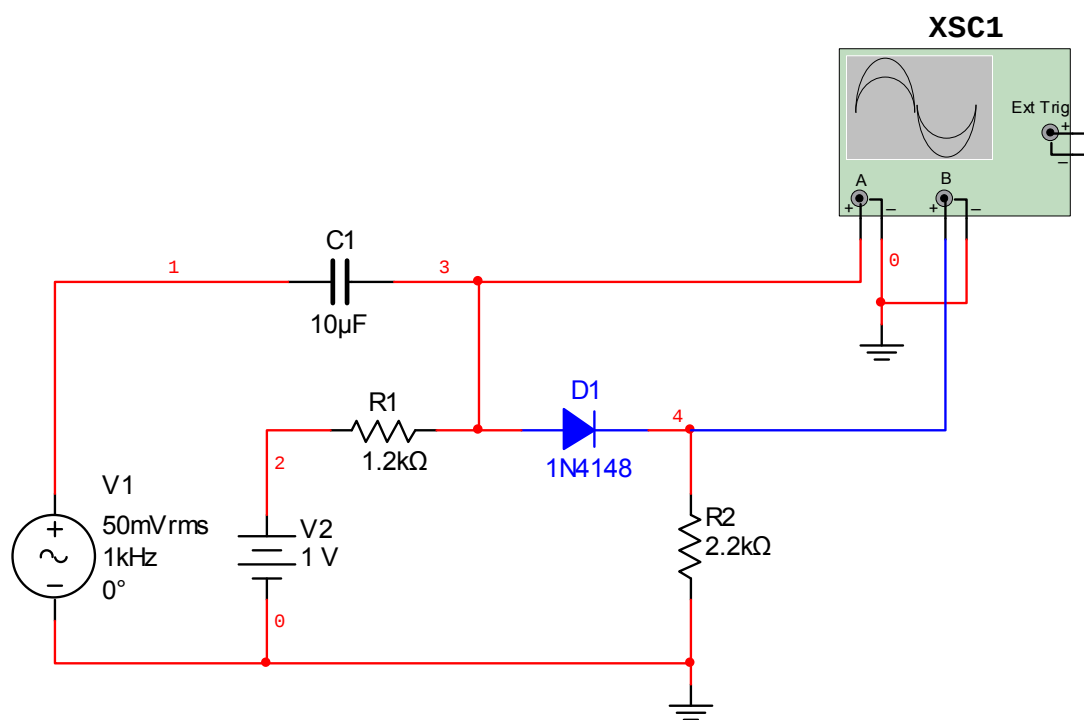


Рис. 4.49. Схема для исследования для режима «малого» сигнала

Обеспечьте выдачу гармонического напряжения с амплитудой в пределах от 20 до 50 мВ на частоте 1 кГц. Установите значение источника V2, равное 1 В, затем – 2 В. Пронаблюдайте, как изменяются временные диаграммы.

1.3. Исследование работы схемы последовательного ограничителя

Соберите схему последовательного ограничителя, изображенную на рис. 4.50.

Установите амплитуду источника переменного напряжения 2,5 В на частоте $f = 1$ кГц и значение напряжения E источника V2, равное 1 В.

Исследуйте работу схемы последовательного ограничителя, изучив временные диаграммы сигналов на входе и выходе при различных значениях и полярности подпирающего напряжения E (два – четыре значения по выбору).

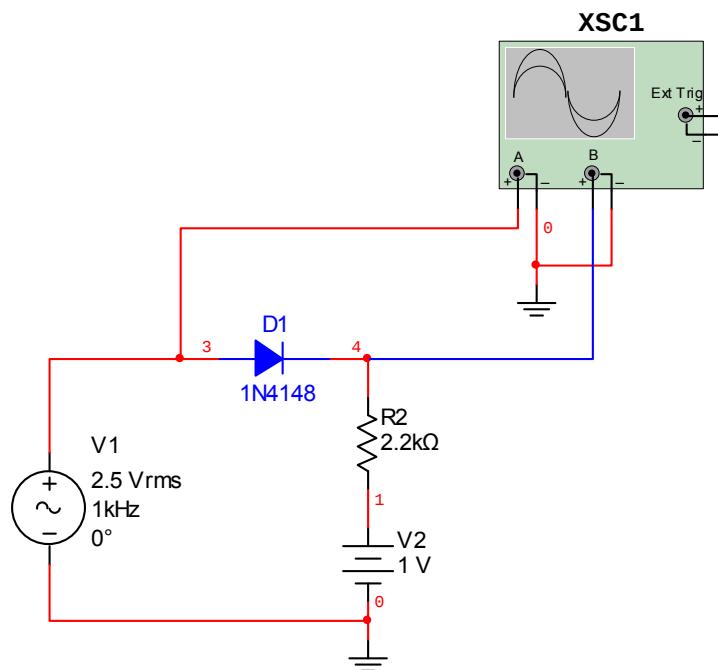


Рис. 4.50. Схема последовательного диодного ограничителя

Используя осциллограф, определите значение напряжения E_0 , а также приращения амплитуд входного и выходного напряжений относительно уровня E_0 (рис. 4.51).

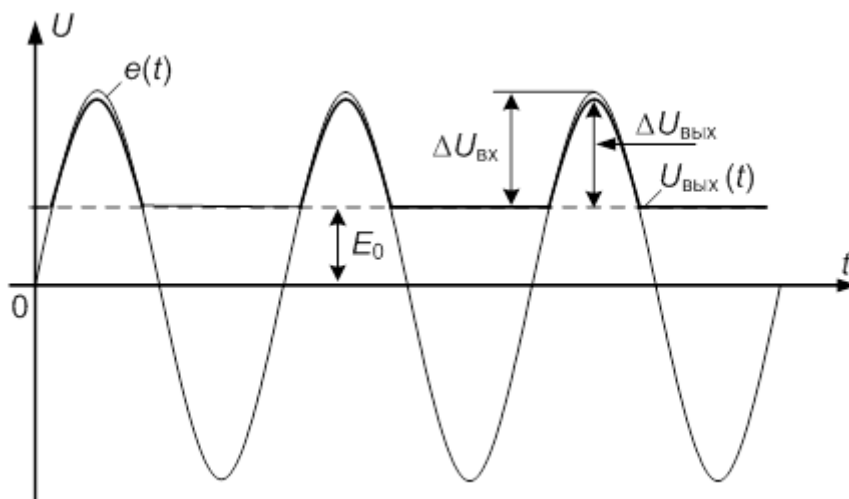


Рис. 4.51. Входной и выходной сигналы в схеме последовательного ограничителя

1.4. Исследование работы схемы параметрического стабилизатора

Соберите схему параметрического стабилизатора в режиме холостого хода, изображенную на рис. 4.52. Стабилитроны находятся в группе Diode, семейство Zener Diode.

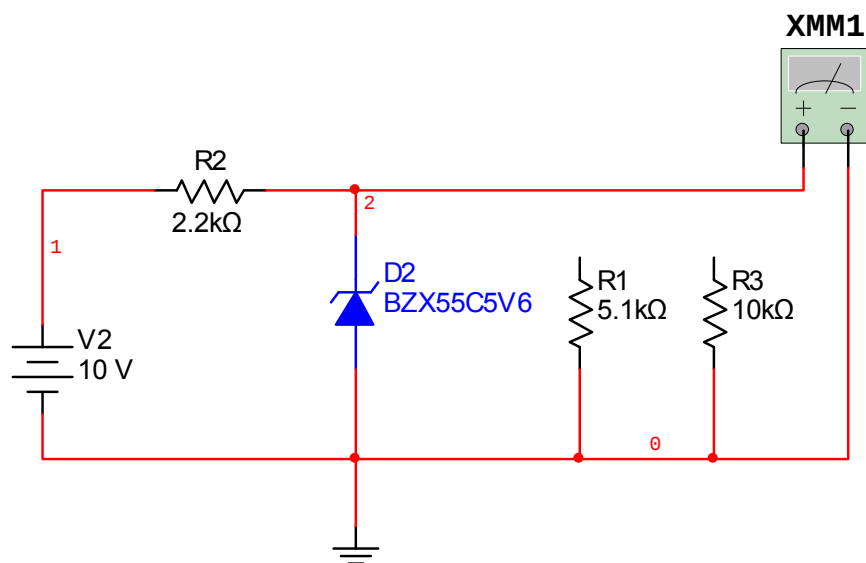


Рис. 4.52. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Иницируйте мультиметр, дважды кликнув на его иконке левой кнопкой мыши, измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения K_L , считая, что номинальное выходное напряжение источника V2 имеет место при $E = 10$ В, а максимальное и минимальное значения фиксируются при $E = 12$ В и $E = 8$ В соответственно.

Подключите к выходу стабилизатора нагрузку $R3 = 10$ кОм и измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения K_L , повторив предыдущий пункт.

Изменяйте схему стабилизатора (рис. 4.52). Полную нагрузку реализуйте подключением резистора $R1 = 5,1$ кОм, а при половинной нагрузке используйте сопротивление $R3 = 10$ кОм. Измерьте коэффициент нестабильности выходного напряжения по нагрузке (Load regulation). Значение $U_{O(rated\ load)}$ получите как номинальное выходное напряжение на холостом ходу при номинальном $U_{in(nom)} = 10$ В.

Сравните нестабильности выходных напряжений от вариаций E источника V2 в режимах холостого хода и под половинной нагрузкой. Установите номинальное входное напряжение источника V2 $E = 10$ В, измерьте выходное напряжение параметрического стабилизатора на холостом ходу (U_1) и под нагрузкой $R3 = 10$ кОм (U_2). На основе проведенного эксперимента рассчитайте $R_{вых}$ стабилизатора.

Лабораторная работа № 2.2

Исследование режимов биполярного транзистора

1.1. Получение ВАХ транзистора VT1

Соберите схему для снятия выходных ВАХ биполярного транзистора VT1 (рис. 4.53). Транзисторы *n-p-n*-типа находятся в группе Transistors семейство BJT_NPN. В качестве транзистора выберите BC337 (аналог отечественного транзистора КТ503).

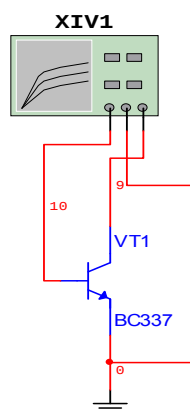


Рис. 4.53. Схема эксперимента для снятия выходных ВАХ транзистора

Для снятия ВАХ транзистора воспользуйтесь виртуальным анализатором вольт-амперных характеристик (IV Analyzer).

Иницилируйте анализатор, дважды кликнув по его иконке левой кнопкой мыши, откроется его лицевая панель (рис. 4.54).

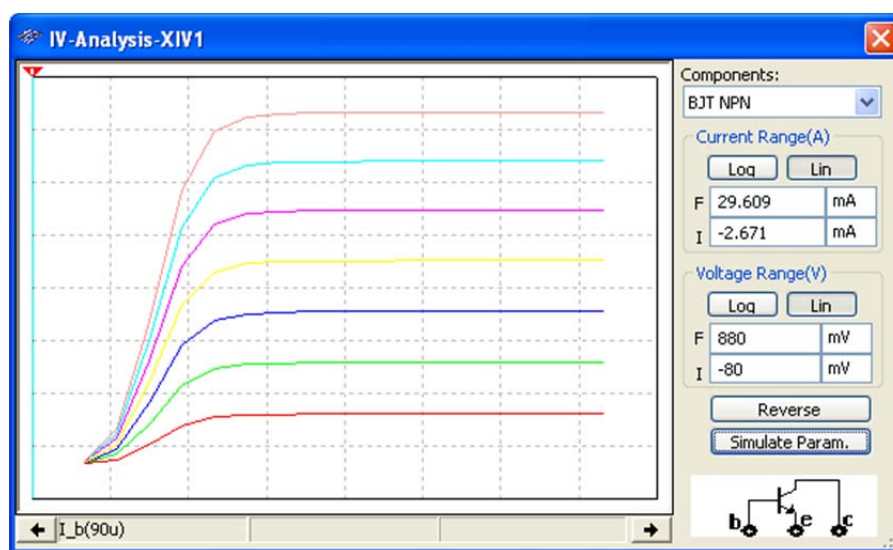


Рис. 4.54. Лицевая панель анализатора вольт-амперных характеристик

Из выпадающего меню Components выберите тип анализируемого транзистора (BJT_NPN). Кликнув по кнопке , установите параметры моделирования: задайте количество кривых в характеристиках (обычно 6–7 при шаге базового тока 15 мкА) и предел изменения выходного напряжения (желательно до 9 В).

Нажмите кнопку запуска симулятора  или F5. Для того чтобы остановить симуляцию, нажмите на кнопку  (Stop).

Для просмотра результатов моделирования воспользуйтесь плоттером (View/Grapher).

Настройте плоттер и сохраните выходные ВАХ транзистора.

Соберите схемы для снятия входных ВАХ биполярного транзистора VT1, рис. 4.55.

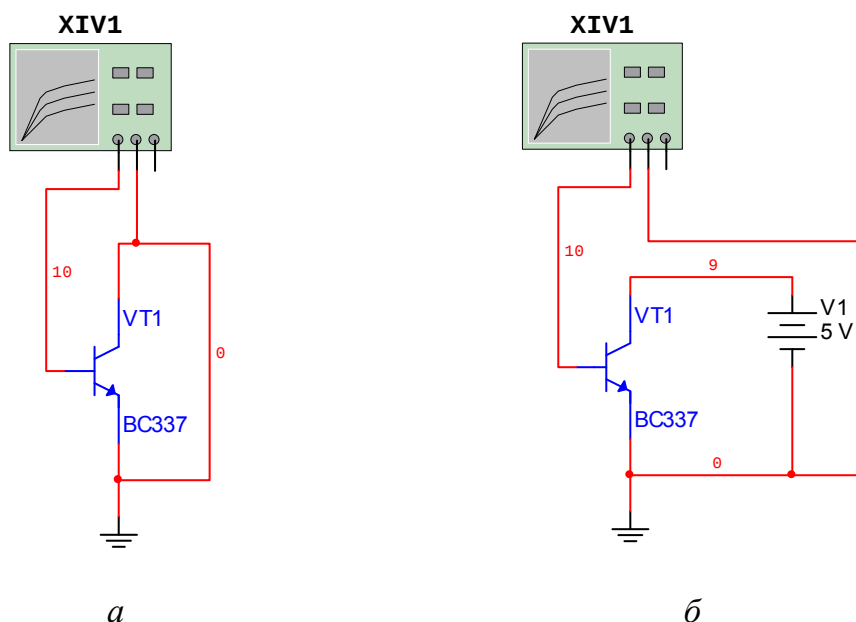
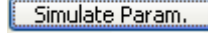


Рис. 4.55. Схемы для снятия входных ВАХ транзистора при $U_{кэ} = 0\text{ В}$ (а) и $U_{кэ} = +5\text{ В}$ (б)

Иницируйте анализатор ВАХ, в выпадающем меню Components выберите Diode. Кликнув по кнопке , грамотно установите параметры моделирования, затем запустите моделирование.

Для просмотра результатов моделирования воспользуйтесь плоттером (View/Grapher).

Настройте плоттер и сохраните входные ВАХ транзистора.

1.2. Исследование усилительного режима транзистора

1.2.1. Регулирование координат рабочей точки покоя

Соберите схему эксперимента, рис. 4.56.

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В (при этом транзистор VT1 закрыт), иницируйте мультиметр в режиме измерения напряжения постоянного тока.

Проверьте напряжение на коллекторе транзистора, которое должно быть близко к напряжению +9 В, выдаваемому с источника постоянного напряжения V1.

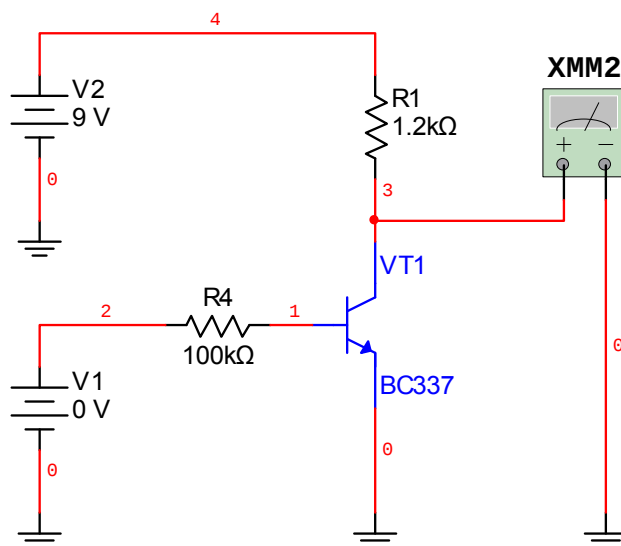


Рис. 4.56. Схема эксперимента для измерения координат рабочих точек транзистора

На выходных ВАХ транзистора, полученных ранее, постройте нагрузочную прямую по постоянному току.

Произведите расчет ориентировочных значений напряжений V1 для трех рабочих точек с координатами $U_{КЭ1} = 2$ В, $U_{КЭ2} = 5$ В, $U_{КЭ3} = 7$ В, используя выражение:

$$\text{Supply} = I_B \cdot R4 + U_{БЭ}.$$

Определите и зафиксируйте значения коллекторного тока в каждой рабочей точке.

Изменяйте значения источника постоянного напряжения V1 до получения требуемых значений $U_{КЭ1}$, $U_{КЭ2}$, $U_{КЭ3}$.

Зафиксируйте полученные данные по координатам рабочих точек.

Необходимо добиться устойчивого понимания, что изменения напряжения источника V1 ведут к изменению координат рабочей точки. При этом изменения их положения происходят по нагрузочной прямой по постоянному току.

Задайтесь координатой рабочей точки транзистора при $U_{КЭ2} = 5$ В и найденного ранее значения коллекторного тока I_K и определите в окрестностях этой точки значения h -параметров транзистора.

1.2.2. Исследование усилительного режима транзисторного каскада

Постройте на выходных ВАХ транзистора три нагрузочные прямые по переменному току, соответствующие включенной дополнительной нагрузке R_L для трех режимов покоя при $U_{КЭ1} = 2$ В, $U_{КЭ2} = 5$ В, $U_{КЭ3} = 7$ В.

Для каждой рабочей точки определите максимальную амплитуду и действующее значение выходного гармонического напряжения при выключенной и включенной нагрузках R_L . Полученные значения занесите в верхнюю строку табл. 4.2.

Таблица 4.2

Сравнение максимальных значений выходного напряжения для разных рабочих точек на ВАХ транзистора

Значение $U_{\text{вых max}}$	Значение $U_{КЭ}$					
	$U_{КЭ1} = 2$ В		$U_{КЭ2} = 5$ В		$U_{КЭ3} = 7$ В	
	$R7$	$R7, R_L$	$R7$	$R7, R_L$	$R7$	$R7, R_L$
Теоретическое						
Практическое						

Соберите схему эксперимента, изображенную на рис. 4.57.

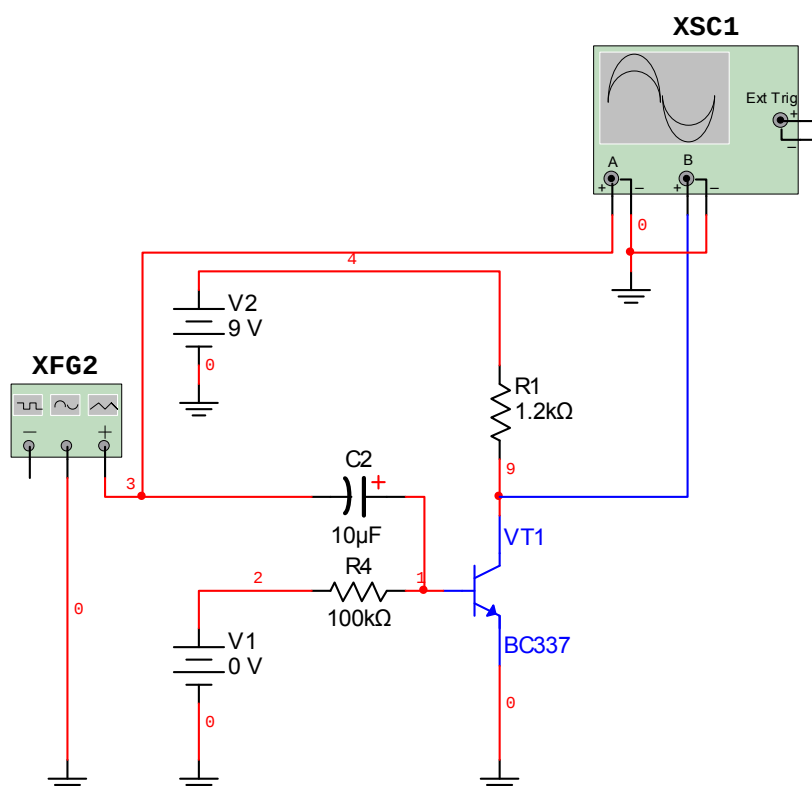


Рис. 4.57. Схема усилительного каскада ОЭ на биполярном транзисторе

Установите рабочую точку, иницируя источник V1, с координатой $U_{КЭ2} = 5$ В. На коллектор транзистора включите осциллограф.

Используя функциональный генератор (Function generator), установите частоту гармонического сигнала 1 кГц и 10 мВ (амплитудное значение). Просмотрите выходной сигнал на экране осциллографа. С помощью курсора определите значение выходного сигнала. Определите коэффициент усиления каскада. Сравните полученное значение с теоретически рассчитанным значением, используя ранее определенные h -параметры для этой рабочей точки.

Подключите дополнительную нагрузку R_L (рис. 4.58) и повторите действия предыдущего пункта. Сравните полученные значения выходных напряжений и коэффициентов усиления. Сделайте выводы.

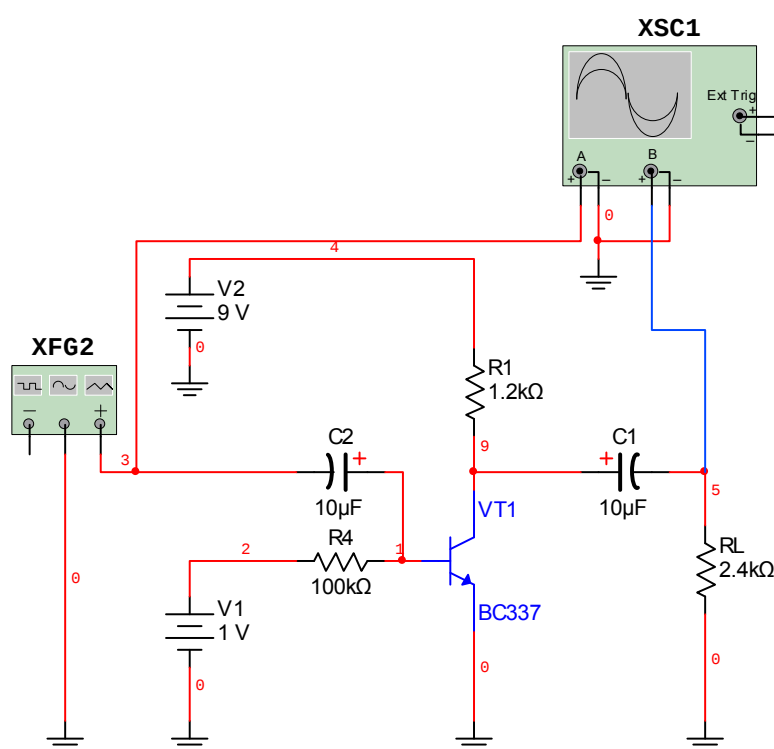


Рис. 4.58. Схема усилительного каскада ОЭ на биполярном транзисторе с нагрузкой

Установите выходное напряжение генератора равным 20 мВ. Сравните полученную осциллограмму с предыдущей, зафиксируйте и объясните появления нелинейных искажений выходного напряжения и его отсечки, если она появилась. Сделайте выводы о причинах появления нелинейных искажений выходного сигнала.

Установите рабочую точку с координатой $U_{КЭ3} = 7$ В. Повторите действия, аналогичные ранее проделанным действиям с рабочей точкой $U_{КЭ2} = 5$ В. Заполните правые столбцы табл. 2.

Установите рабочую точку с координатой $U_{КЭ3} = 7$ В. Повторите действия, аналогичные ранее проделанным действиям с рабочей точкой $U_{КЭ2} = 5$ В. Заполните правые столбцы табл. 2.

Установите рабочую точку с координатой $U_{КЭ1} = 2$ В. Повторите действия, аналогичные ранее проделанным действиям с рабочей точкой $U_{КЭ2} = 5$ В. Заполните левые столбцы табл. 2.

Выберите на основании проделанного анализа координату рабочей точки, с которой можно получить максимальную амплитуду выходного гармонического напряжения без отсечки. Зафиксируйте это значение с помощью осциллографа и сравните со значением, полученным при графических построениях на ВАХ транзистора с нагрузочными прямыми, определяемыми R_7 и R_L . Сделайте выводы.

Какую рабочую точку в режиме покоя целесообразно выбрать, если будут усиливаться однополярные входные сигналы в виде прямоугольных импульсов: а) положительной полярности; б) отрицательной полярности? Установите эти рабочие точки, меняя напряжение источника V1, переведите генератор на требуемую форму сигнала, посмотрите и измерьте выходной сигнал. Сделайте выводы.

1.2.3. Исследование ключевого режима транзистора

1.2.3.1. Исследование режима отсечки транзистора

Соберите схему, изображенную на рис. 4.59.

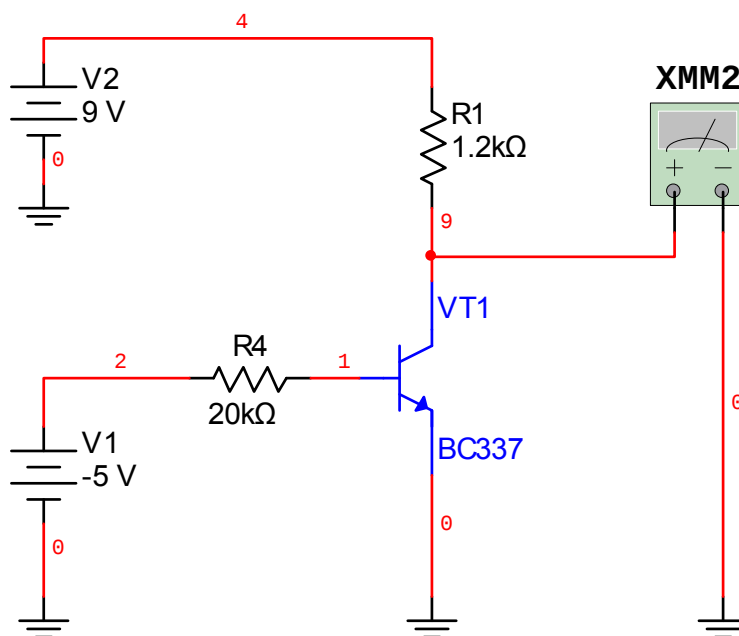


Рис. 4.59. Схема транзисторного ключа ОЭ для реализации режима глубокой отсечки

Установите значение управляющего напряжения источника V1 равным -5 В , обеспечив режим глубокой отсечки. С помощью мультиметра измерьте напряжение на коллекторе транзистора. Убедитесь, перебросив мультиметр на выход источника V2, что эти напряжения очень мало отличаются друг от друга, так как через R1 протекает малый ток I_{K0} закрытого транзистора. Если значения напряжений различаются, то рассчитайте значение тока I_{K0} .

Постепенно уменьшая (по модулю) управляющее напряжение до нуля с помощью источника V1 и измеряя коллекторное напряжение, подтвердите, что оно сохраняет высокий уровень порядка напряжения источника питания V2. Другими словами, подтвердите, что в режиме отсечки транзистор потерял свои усилительные свойства, а на его выходе формируется логическая единица, когда на входе действует логический ноль.

1.2.3.2. Исследование режима насыщения

Соберите схему, изображенную на рис. 4.60.

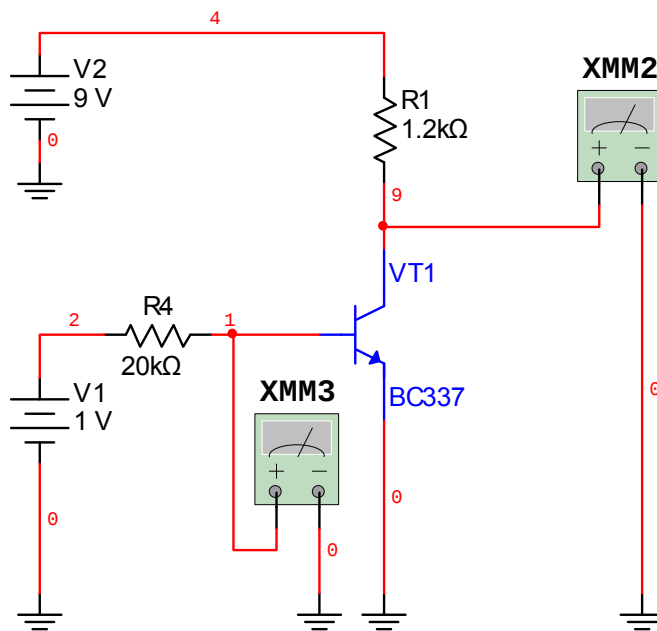


Рис. 4.60. Схема для исследования режима насыщения

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В .

Постепенно увеличивая управляющее напряжение с помощью источника V1 и измеряя коллекторное напряжение, удостоверьтесь, что транзистор работает в усилительном режиме, когда увеличение напряжения $U_{БЭ}$ ведет к уменьшению выходного напряжения $U_{КЭ}$. В табл. 4.3 занесите данные ($U_{БЭ}$, $U_{КЭ}$, I_K) для различных рабочих точек усилительного режима транзистора.

Установите значение источника постоянного напряжения $V1$ равным 0 В.

Постепенно увеличивая управляющее напряжение с помощью источника $V1$ и измеряя коллекторное напряжение, удостоверьтесь, что транзистор работает в усилительном режиме, когда увеличение напряжения $U_{БЭ}$ ведет к уменьшению выходного напряжения $U_{КЭ}$. В табл. 4.3 занесите данные ($U_{БЭ}$, $U_{КЭ}$, I_K) для различных рабочих точек усилительного режима транзистора.

Последние данные должны соответствовать рабочей точке 3 (рис. 3.36), когда выполняется условие границы ($U_{БЭ} = U_{КЭ}$) между усилительным режимом и режимом насыщения, а рассчитанные токи коллектора и базы в этой точке являются токами насыщения $I_{КН}$ и $I_{БН}$ транзистора.

Таблица 4.3

Значения токов и напряжений на транзисторе

Значение напряжения $V1$	0					
Напряжение $U_{БЭ}$, В						
Токи базы: I_B и $I_{БН}$, мкА						
Напряжение $U_{КЭ}$, В						
Токи коллектора: I_K и $I_{КН}$, мА						

Удостоверьтесь, что в режиме насыщения транзистор практически потерял свои усилительные свойства. С этой целью рассчитайте значения базового тока, соответствующие степеням насыщения S , равными 1, 2, 3, 4 и 5.

Затем определите по второму закону Кирхгофа значения напряжений $V1$, используя входную характеристику транзистора и значение сопротивления $R4$.

Последовательно изменяя напряжение $V1$, фиксируем значения напряжения насыщения транзистора $U_{КЭН}$. Данные приведите в отчете. При анализе табличных данных подтвердите, что и в режиме насыщения транзистор практически потерял усилительные свойства, а на выходе схемы формируются низкие уровни напряжения, которые соответствуют зоне логического нуля.

1.2.3.3. Исследование ключа ОЭ

Соберите схему, изображенную на рис. 4.61.

Используя упрощенную схему замещения (рис. 3.38), рассчитайте значения токов насыщения $I_{КН}$ и $I_{БН}$, считая, что транзистор имеет коэффициент усиления по току $\beta = 50$. Рассчитайте также значения амплитуд напряжения генератора для обеспечения степеней насыщения транзистора S равными 2, 4 и 7 при резисторе $R4 = 20$ кОм.

Установите выходные параметры генератора: прямоугольную форму, частоту 1 kHz, нулевое значение смещения (Offset). Амплитуду импульсов (Amplitude) последовательно изменяйте в соответствии с рассчитанными значениями, начиная с минимального значения при $S = 2$ и заканчивая амплитудой, равной 2,5 В.

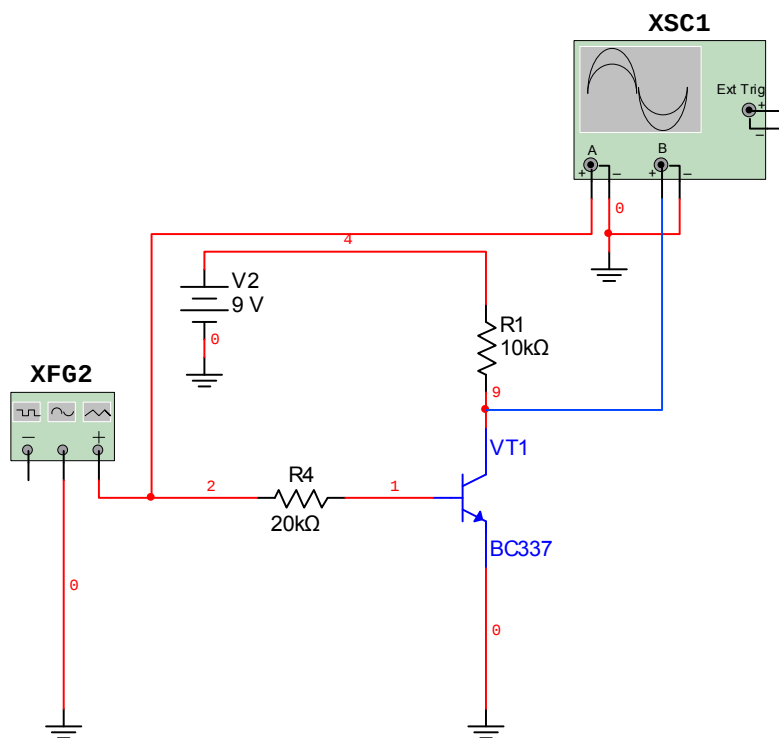


Рис. 4.61. Схема для исследования ключа ОЭ

Подключите осциллограф каналом А+ к входу схемы, а каналом В+ к выходу ключа ОЭ.

Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы при разных значениях степеней насыщения транзистора. Попробуйте по мере увеличения скорости развертки осциллографа просматривать участок выходного напряжения при переходе транзистора от режима насыщения в режим отсечки, зафиксировать увеличение времени рассасывания. Сделайте выводы.

Лабораторная работа № 3.1

Исследование усилительного каскада ОЭ

3.1. Анализ режима покоя

Соберите схему усилительного каскада, обеспечивающую режим работы транзистора по постоянному току (рис. 4.62).

Измерьте с помощью мультиметров напряжения на коллекторе, базе и эмиттере транзистора.

Рассчитайте падение напряжения на коллекторном сопротивлении и определите ток покоя в рабочей точке транзистора.

Определите значение напряжения между коллектором и эмиттером транзистора $U_{кэ}$.

Используйте выходную ВАХ транзистора, полученную при выполнении первой лабораторной работы, и на ней проставьте рабочую точку по координатам, полученным в предыдущих двух пунктах.

Проведите на выходной ВАХ нагрузочную прямую по постоянному току. Проверьте, прошла ли она через рабочую точку.

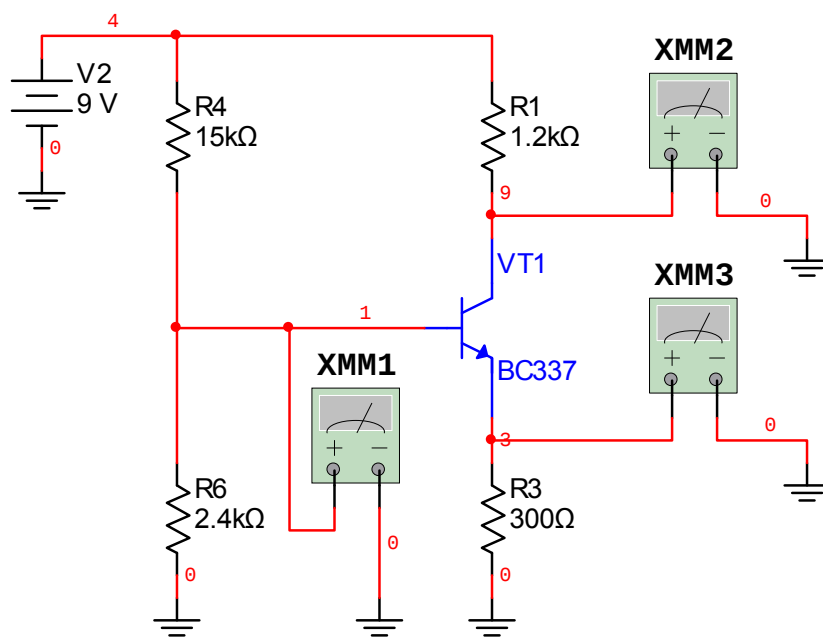


Рис. 4.62. Схема для исследования режима покоя транзистора

3.2. Определение максимальных значений выходного гармонического напряжения

Соберите схему усилительного каскада ОЭ, изображенную на рис. 4.63, установив режим холостого хода.

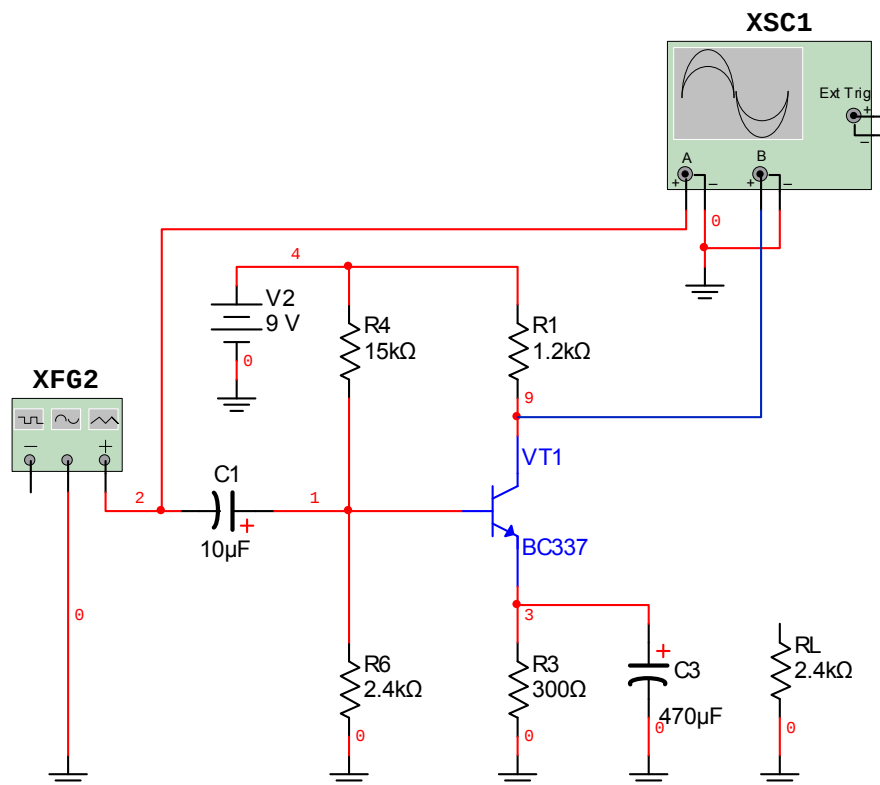


Рис. 4.63. Схема усилительного каскада ОЭ

Восстановите данные по значениям $h_{11Э}$ и $h_{21Э}$, полученные при выполнении лабораторной работы «Исследование режимов биполярного транзистора» или определите указанные параметры по приведенной в ней методике.

Рассчитайте коэффициенты усиления по напряжению на холостом ходу и с нагрузкой RL . Определите ориентировочные значения амплитуд входного напряжения, учитывая ранее полученные оценки амплитуд выходного напряжения, чтобы гарантировать линейный режим работы схемы.

Активизируйте функциональный генератор. Установите частоту гармонического сигнала $f = 1$ кГц и рассчитанное ранее значение входного сигнала. С помощью осциллографа проверьте отсутствие отсечки в выходном напряжении.

Активизируйте осциллограф в режиме открытого входа и просмотрите выходной сигнал на экране осциллографа. Увеличивайте амплитуду выходного напряжения генератора до появления отсечки выходного напряжения или явно выраженных нелинейных искажений. Определите экспериментальное значение выходного переменного напряжения. Сравните полученное значение с ранее рассчитанным теоретическим значением.

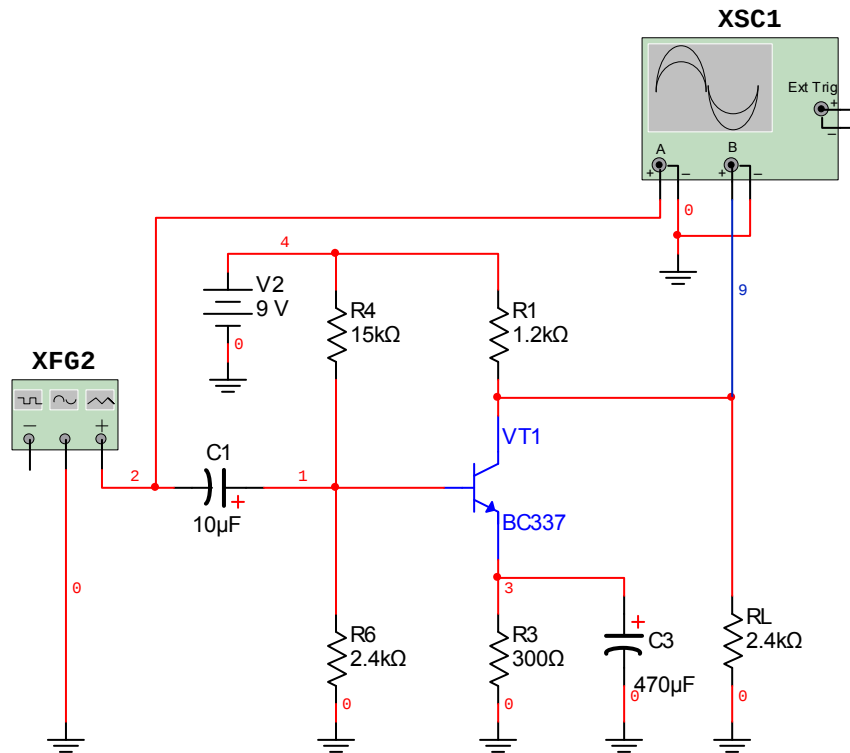


Рис. 4.64. Схема усилительного каскада ОЭ с нагрузкой

Подключите сопротивление нагрузки RL , как показано на рис. 4.64. Проведите аналогичные действия. Сделайте выводы из проведенных экспериментов.

Постепенно, используя возможности генератора по дискретности изменения его гармонического напряжения, увеличивайте входное напряжение каскада. Наблюдайте появление отсечки в выходном сигнале. Зафиксируйте, где сначала появляется отсечка: сверху или снизу? Или отсечка симметричная? Поясните результаты эксперимента, используя графические построения на выходных характеристиках транзистора.

3.3. Исследование АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ

3.3.1. Получение характеристик базового варианта

Будем считать базовым вариантом схему, приведенную на рис. 4.65, в которой подключена нагрузка RL через конденсатор $C2$.

Получить АЧХ и ФЧХ схемы можно двумя способами: с помощью плоттера Боде (Bode Plotter) или частотного анализа (AC analysis).

Важное замечание: при использовании частотного анализа (AC analysis) амплитуда входного сигнала задается в окне AC Analysis Magnitude свойств источника переменного напряжения AC_POWER; при частотном анализе не учитывается напряжение

питания усилительного каскада, таким образом, в отличие от реальной схемы, при частотном анализе усилительный каскад всегда будет находиться в линейном режиме.

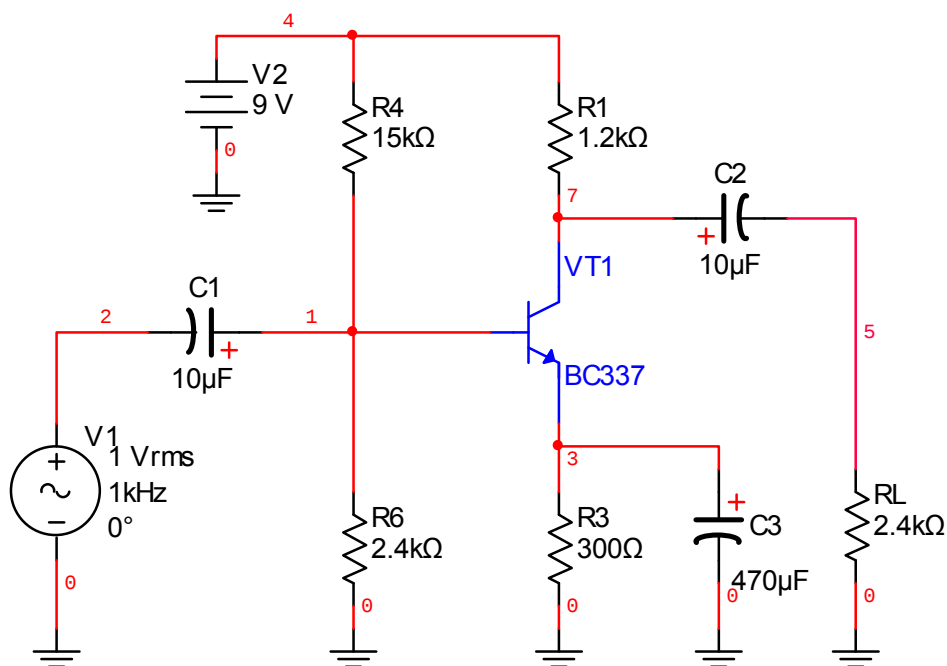
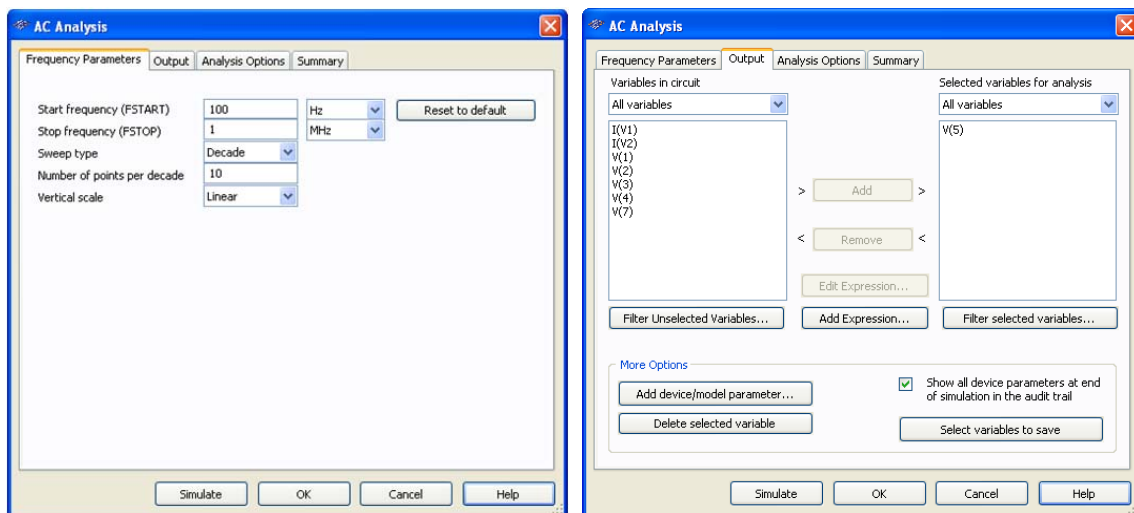


Рис. 4.65. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ

Амплитуду входного сигнала (AC Analysis Magnitude), получаемую с выхода источника переменного напряжения V1 и обеспечивающую линейный режим работы усилительного каскада во всей полосе рабочих частот, выберите на основании ранее проведенного эксперимента.

Для исследования АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ с помощью частотного анализа следует выбрать тип анализа «AC analysis» из меню Simulate/Analyses/AC analysis, откроется окно настроек (рис. 4.66, а). На вкладке Frequency Parameters установите начальное значение частоты – 1 Hz, конечное значение частоты – 100 kHz, число шагов за декаду изменения частоты – 10. Чтобы просмотреть АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ, необходимо добавить в список выходных переменных напряжение на нагрузке. Перейдите на вкладку Output (рис. 4.66, б), выберите переменную, соответствующую напряжению на нагрузке – V(5) (V – напряжение, 5 – номер проводника, рис. 4.65), и нажмите на кнопку . Переменная должна появиться в списке выбранных для анализа, как на рис. 4.66, б.

Нажмите кнопку для запуска анализа, результаты анализа отображаются на плоттере.



а

б

Рис. 4.66. Настройки параметров анализа AC analysis

При необходимости получения значений коэффициентов усиления или фазового сдвига каскада на разных частотах используйте Cursors.

3.3.2. Исследование изменений характеристик каскада из-за влияния выходного разделительного конденсатора

В схеме усилительного каскада, изображенной на рис. 4.65, установите номинал конденсатора $C2 = 1$ мкФ, вместо 10 мкФ.

Получите характеристики каскада, используя методику частотного анализа предыдущего подраздела. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта. Сформируйте выводы относительно влияния разделительного конденсатора на характеристики каскада, если емкость изменилась в 10 раз.

3.3.3. Исследование изменений характеристик каскада из-за подключения к выходу каскада дополнительной емкости нагрузки

В схеме усилительного каскада, изображенной на рис. 4.65, вновь установите номинал конденсатора $C2 = 10$ мкФ, а параллельно нагрузке RL – дополнительную емкость $C4 = 47$ нФ (рис. 4.67).

Рассчитайте, как изменится модуль сопротивления нагрузки в исследуемой схеме на частоте 100 кГц, если к параллельно включенным сопротивлениям RL и $R1$ в исходном состоянии дополнительно присоединить $C4$.

Получите АЧХ и ФЧХ каскада, используя вышеприведенную методику частотного анализа. Сравните полученные характеристики с характеристиками базового варианта.

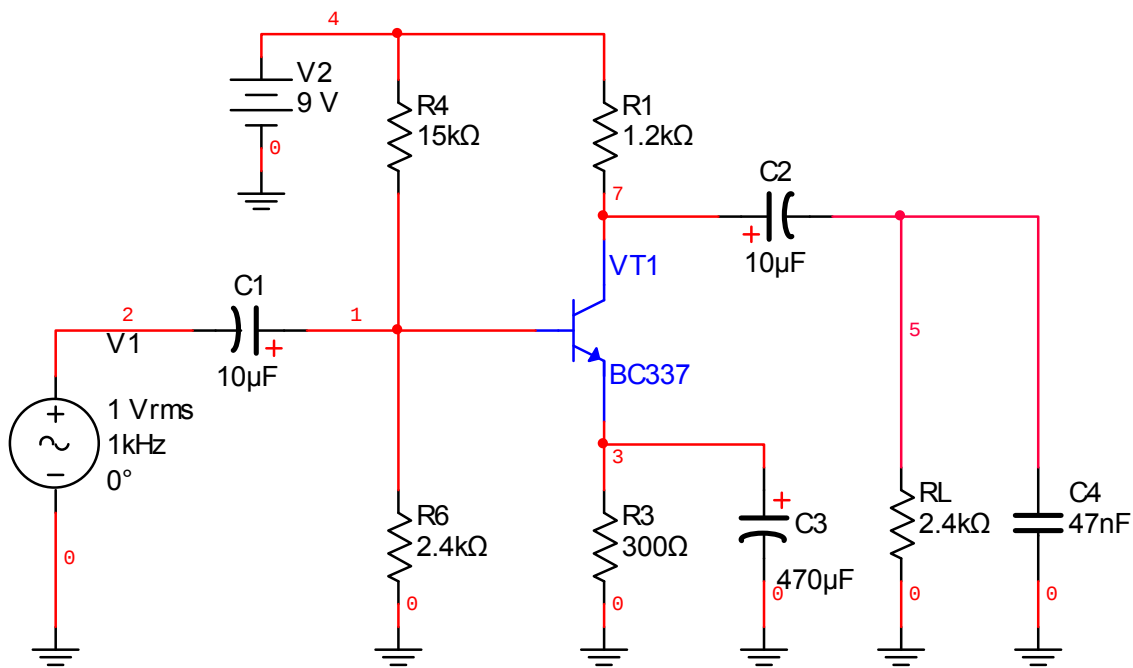


Рис. 4.67. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ усилительного каскада ОЭ с дополнительной емкостью нагрузки

3.3.4. Исследование изменений характеристик каскада из-за введения отрицательной обратной связи

Используя методику частотного анализа, выясните, что произойдет с характеристиками каскада при введении последовательной отрицательной обратной связи по току за счет отключения блокировочного конденсатора $C3$ в схеме на рис. 4.65.

Получите характеристики каскада, используя вышеприведенную программу исследований. Сформируйте выводы относительно влияния обратной связи на характеристики исследуемого каскада.

Лабораторная работа № 3.2

Передача импульсных сигналов в резистивном усилительном каскаде

1.1. Просмотр импульсных сигналов

Соберите схему резистивного усилительного каскада с нагрузкой в цепи коллектора, охваченного последовательной ООС по току, используя рис. 4.68.

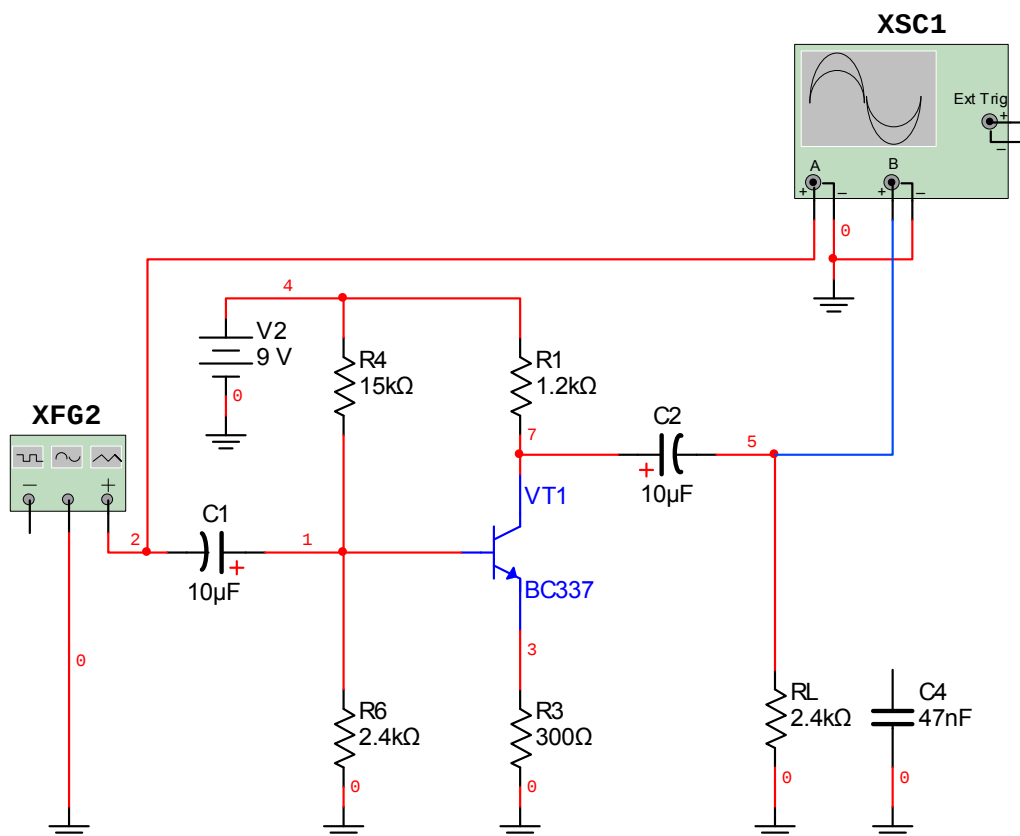


Рис. 4.68. Схема резистивных каскадов для исследования переходных искажений

Активизируйте функциональный генератор. Установите частоту прямоугольных импульсов 1 кГц, амплитуду импульсов 1 В и нулевое смещение.

Просмотр выходных сигналов осуществляйте или с коллектора транзистора, или с сопротивления нагрузки RL .

В первом случае вход осциллографа по каналу В должен быть открытым, так как в режиме покоя там присутствует постоянная составляющая напряжения порядка 5 В. Во втором случае вход может быть закрыт, и можно в несколько раз поднять чувствительность осциллографа.

Изменяйте частоту следования последовательности прямоугольных импульсов с генератора, не забывая грамотно управлять разверткой и синхронизацией осциллографа, и просмотрите, как проявляются искажения при передаче фронтов и вершин импульсов.

По результатам проведенного эксперимента зафиксируйте:

- частоту, на которой лучше всего исследовать искажения фронта импульсов;
- декаду частот, на которых лучше всего исследовать искажения при передаче вершины импульсов.

1.2. Исследование линейных искажений в ОМВ при передаче фронта импульса

1.2.1. Резистивный каскад с последовательной обратной связью по току

Используйте прежнюю схему эксперимента, приведенную на рис. 4.68.

Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора.

Получите на канале В осциллографа изображение переднего (заднего) фронта импульса, выделяемого на нагрузке RL , используя максимальную скорость развертки сигнала, регулируемую в окне TIMEBASE.

Проведите измерения времени установления импульса, пользуясь масштабной сеткой, без емкости нагрузки $C4$ и с ней. Сделайте выводы о качестве передачи фронтов импульсного сигнала через усилитель в исследованных условиях работы.

1.2.2. Резистивный каскад с последовательной 100 % обратной связью по напряжению (эмиттерный повторитель)

Измените схему эксперимента (рис. 4.69):

- а) правый вывод емкости $C2$ заземлите, тем самым заземляя коллектор транзистора по переменному току;
- б) нагрузку RL подключите через емкость $C5$ к эмиттеру транзистора.

Повторите пункты методики для наблюдения и измерения фронтов импульсных сигналов нового резистивного каскада, увеличив их амплитуду до 2,5 В. Выполните сравнение полученных данных.

1.3. Исследование линейных искажений в ОБВ при передаче вершины импульса

1.3.1. Резистивный каскад с последовательной обратной связью по току

Соберите схему резистивного усилительного каскада с нагрузкой в цепи коллектора, охваченного последовательной ООС по току, используя рис. 4.70.

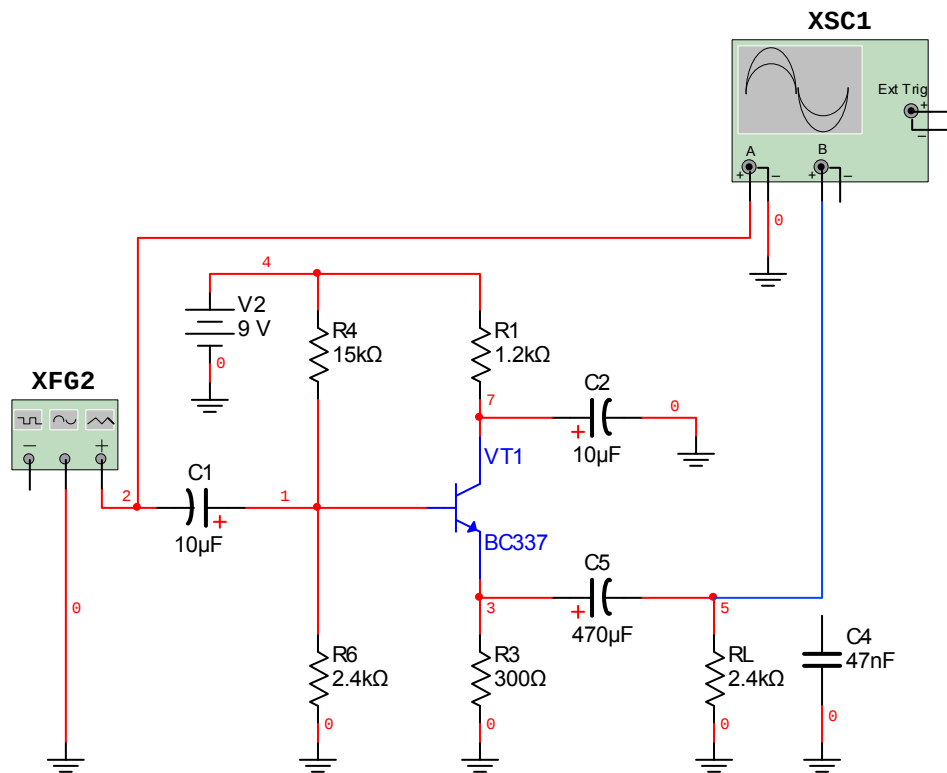


Рис. 4.69. Схема для исследования эмиттерного повторителя

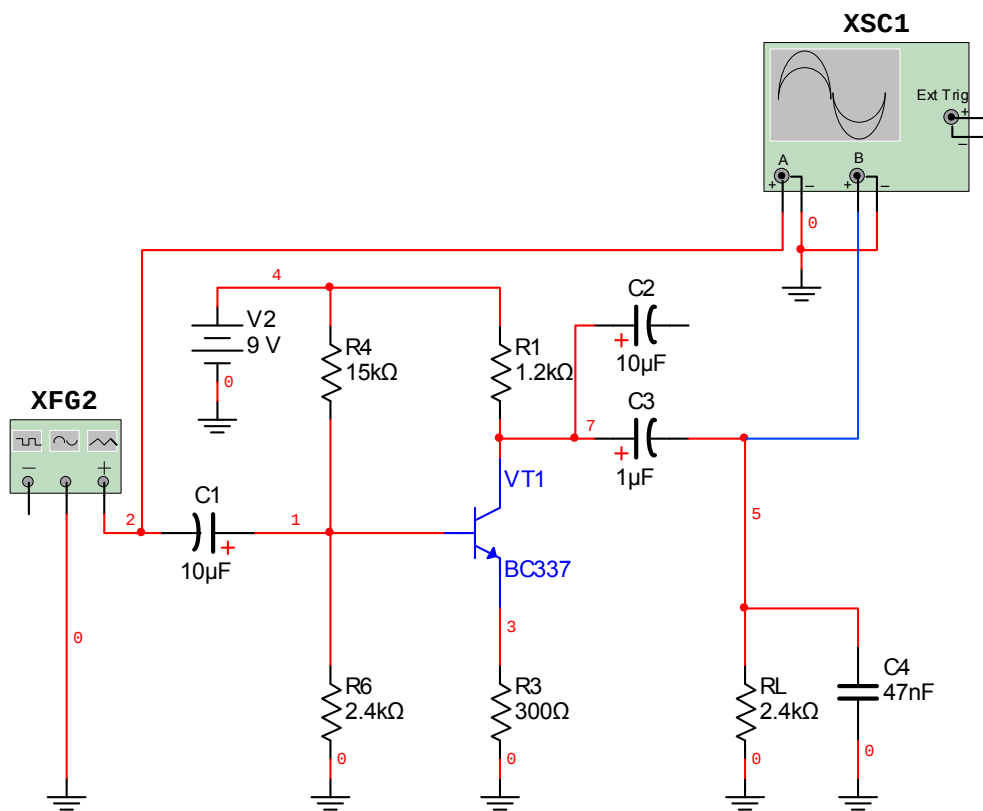


Рис. 3.70. Схема каскада ОЭ с последовательной ООС по току

Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора из определенной ранее декады частот. Установите амплитуду входного импульса 1 В.

Определите составляющую спада вершины импульса из-за влияния цепи с разделительным конденсатором $C1$, подав на вход осциллографа сигнал с коллектора транзистора, используя при этом открытый вход осциллографа (режим DC).

Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор $C3$. Определите спад вершины импульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

Найдите, соответствует ли суммарный спад экспериментально полученным спадам из-за $C1$ и $C2$. По какому закону определяется общий спад через отдельные его составляющие?

Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор $C2 = 10 \cdot C3$. Определите спад вершины импульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

Используя определение постоянных времени цепей и соответствующих спадов вершин, найдите: соответствует ли суммарный спад экспериментально полученным спадам из-за $C1$ и $C2$?

Переберите схему каскада и подайте на вход осциллографа сигнал с коллектора транзистора, используя открытый вход осциллографа.

Изменяйте частоту последовательности входных импульсов (5–10 точек в декаде частот) и определяйте значение спада на каждой частоте. Подчиняются ли полученные экспериментальные данные теории? Сведите данные в таблицу и постройте график.

Попробуйте, просматривая фронты выходного напряжения, определить время установления t_y и сравнить полученное значение с ожидаемым результатом.

1.3.2. Резистивный каскад с последовательной 100 % обратной связью по напряжению (эмиттерный повторитель)

Переберите схему эксперимента. Правый вывод емкости $C2$ заземлите, тем самым заземляя коллектор транзистора по переменному току.

Нагрузку RL подключите через емкость $C5$ к эмиттеру транзистора, рис. 4.71.

Установите выбранную Вами частоту следования сигналов функционального генератора из определенной ранее декады частот. Установите амплитуду входного импульса 2,5 В.

Определите составляющую спада вершины импульса из-за влияния цепи с разделительным конденсатором $C1$, подав на вход осциллографа сигнал с эмиттера транзистора и используя открытый вход. Объясните,

почему один и тот же конденсатор дает разные значения спадов вершин в разных схемах?

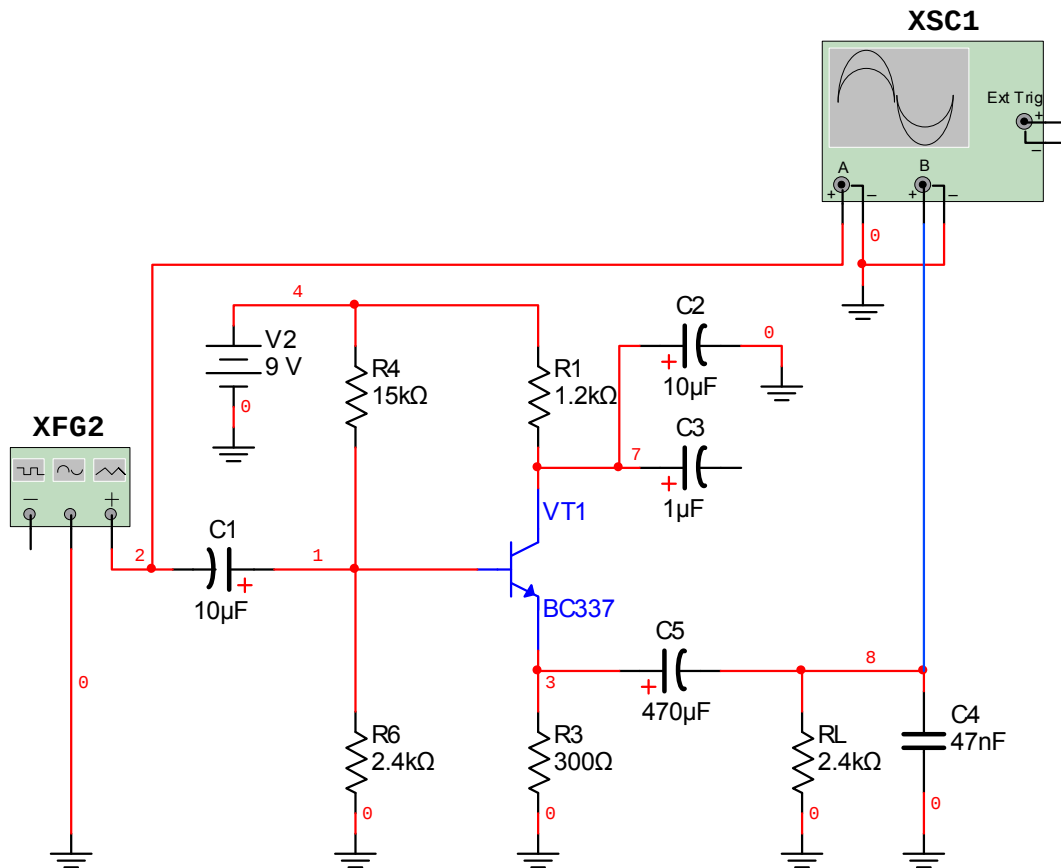


Рис. 4.71. Схема для исследования эмиттерного повторителя

Перебросьте вход осциллографа на нагрузку, включенную через разделительный конденсатор $C5$. Определите спад вершины импульсного сигнала из-за цепей с двумя разделительными конденсаторами.

Зная закон суммирования спадов, найдите спад вершины импульсов из-за разделительного конденсатора $C5$. Сравните полученное значение с тем, что Вы получили дома. Сделайте выводы.

Попробуйте, просматривая фронты выходного напряжения, определить время установления t_y и сравнить полученное значение с ожидаемым результатом.

Лабораторная работа № 4.1

Типовые схемы включения операционных усилителей

1.1. Снятие амплитудных характеристик для схем инвертирующего включения ОУ

Соберите схему, изображенную на рис. 4.72 и реализующую функцию инвертора. Операционные усилители находятся в группе Analog, семейство Орамп. В качестве ОУ выберите ОР07АН или любой другой ОР07. Обратите внимание, что к выводу 4 подключен источник питания V3 отрицательной полярности 9 В, а к выводу 7 – источник питания V2 положительной полярности 9 В.

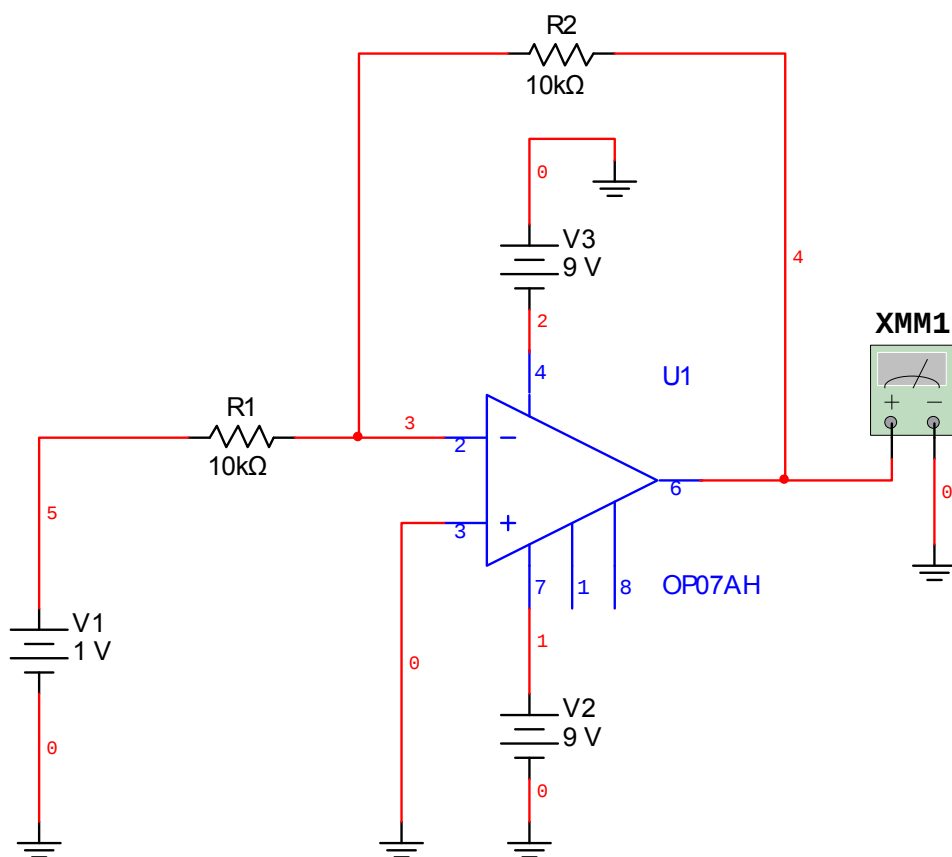


Рис. 4.72. Инверсное включение ОУ с двухполярными 9 В источниками питания

Изменяйте входное напряжение от -9 до 9 В через 1 В и получите массив данных части амплитудной характеристики.

Соберите схему (рис. 4.72), реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 (какой номинал резистора $R2$ нужно использовать, если $R1 = 10$ кОм?).

Получите данные по вышеизложенной методике, предварительно скорректировав значения верхнего предела входного напряжения и его шаг изменения. Постройте амплитудную характеристику. Определите уровень входного напряжения, при котором начинается переход работы с линейного режима на нелинейный режим. Зафиксируйте полученные данные.

Соберите схему (рис. 4.72), реализующую схему операционного делителя напряжения с коэффициентом передачи $-0,1$ (какой номинал резистора $R2$ нужно использовать, если $R1 = 10 \text{ кОм}$?).

Получите данные по вышеизложенной методике, предварительно скорректировав значения верхнего предела входного напряжения и его шаг изменения. Постройте амплитудную характеристику.

Сформируйте выводы относительно поведения амплитудных характеристик схем с различными значениями коэффициента усиления.

1.2. Экспериментальное подтверждение правила 1 о том, что входы ОУ эквипотенциальны

Переставьте вход мультиметра в точку суммирования схемы – на инверсный вход ОУ. Измерьте напряжение. Сформулируйте вывод: на каком резисторе схемы выделяется входное напряжение, на каком выделяется выходное?

1.3. Определение максимального значения амплитуды выходного гармонического напряжения в усилителе с различными цепями питания

1.3.1. Усилитель с двух полярным питанием

Соберите схему, изображенную на рис. 4.73 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 .

Установите амплитуду источника переменного напряжения 1 В и частоту 1 кГц . Изменяйте амплитуду входного напряжения (V_{rms}) и, используя осциллограф, добейтесь получения максимальной амплитуды выходного сигнала, когда на нем не просматривается ограничение. Установите и зафиксируйте значения входного и выходного напряжений. При измерении выходного напряжения мультиметром не забудьте переключить режим измерения с постоянного тока на переменный.

Измените напряжение питания ОУ $V2$ с 9 до 5 В и проделайте два предыдущих пункта.

Восстановите напряжение питания $V2 = 9 \text{ В}$ и измените напряжение питания ОУ ($V3$) с 9 до 5 В . Повторите вышеизложенную методику эксперимента. Составьте общую таблицу, сформируйте выводы по зависимости максимальной амплитуды выходного напряжения от значений напряжений источников двухполярного питания.

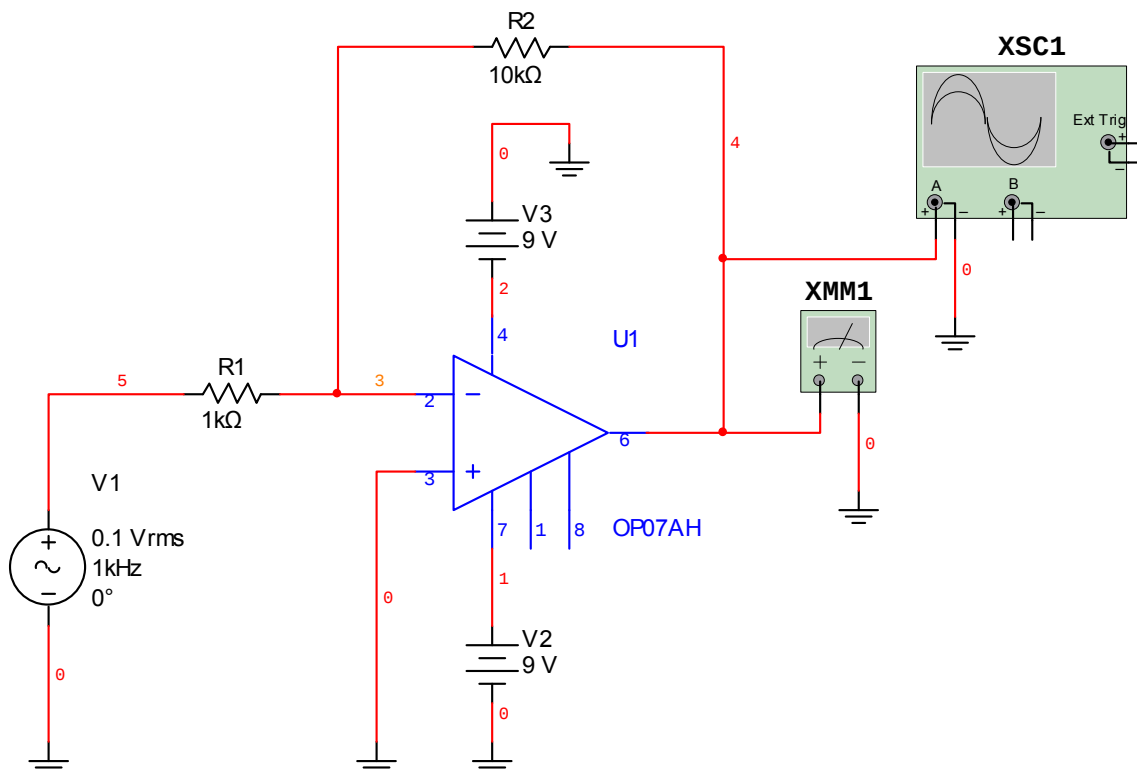


Рис. 4.73. Инвертирующее включение ОУ с двухполярными источниками питания

1.3.2. Усилитель с однополярным питанием

Соберите схему, изображенную на рис. 4.74 и реализующую схему инвертора по входному сигналу, поступающему с выхода источника переменного напряжения AC_POWER. Установите частоту источника переменного напряжения 1 кГц.

Рассчитайте коэффициент передачи напряжения смещения, поступающего с выхода источника питания V3 на неинвертирующий вход ОУ при линейном режиме его работы. Установите на выходе источника питания V3 напряжение смещения, обеспечивающее на выходе ОУ напряжение, равное половине напряжения источника питания, при нулевом сигнале источника V1.

Иницируйте осциллограф, просмотрите и измерьте значение напряжения на выходе ОУ. Соответствует ли оно ожидаемому значению?

Изменяйте амплитуду входного напряжения (V_{rms}) и добейтесь получения максимальной амплитуды выходного сигнала, когда на нем не просматривается ограничение. Измерьте значения входного и выходного напряжений. Соответствуют ли они ожидаемым значениям?

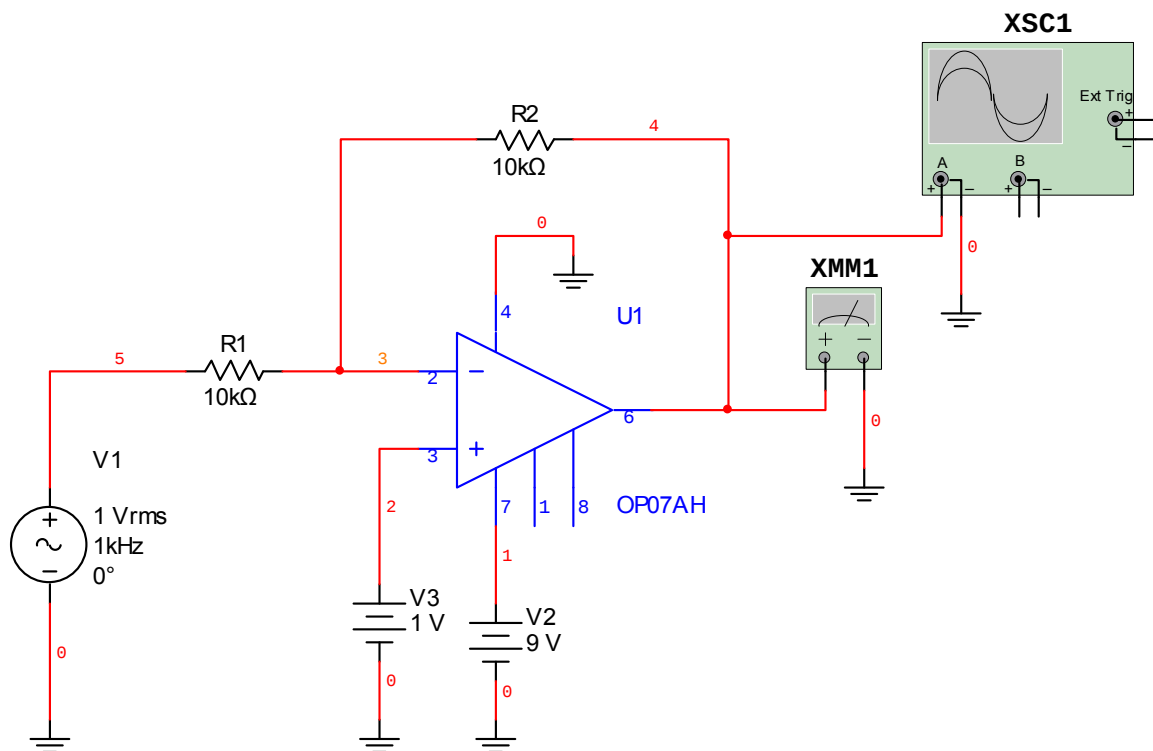


Рис. 4.74. Инвертирующее включение ОУ с однополярным питанием

Начните изменять напряжение смещения, используя источник питания V3. Зафиксируйте изменения постоянной составляющей выходного сигнала ОУ и появление возможных ограничений гармонического сигнала на его выходе. Разберитесь в исследуемых процессах.

1.4. Исследование АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ

1.4.1. Усилитель

Соберите схему, изображенную на рис. 4.75 и реализующую усилитель с коэффициентом усиления -10 .

Получить АЧХ и ФЧХ схемы можно двумя способами: с помощью плоттера Боде (Bode Plotter) или частотного анализа (AC analysis).

Для исследования АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ с помощью частотного анализа следует выбрать тип анализа AC analysis из меню Simulate/Analyses/AC analysis, откроется окно настроек, рис. 4.76, а.

На вкладке Frequency Parameters (см. рис. 4.76, а) установите начальное значение частоты 100 Hz, конечное значение частоты 1 MHz и число шагов за декаду изменения частоты, равное 10. Чтобы просмотреть АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ, необходимо добавить в список выходных переменных напряжение на выходе ОУ. Перейдите на вкладку Output (рис. 4.76, б), выберите переменную, соответствующую выходному напряжению ОУ – V(4) (V – напряжение, 4 – номер проводни-

ка, см. рис. 4.75), и нажмите на кнопку **Add**. Переменная должна появиться в списке выбранных для анализа (рис. 4.76, б).

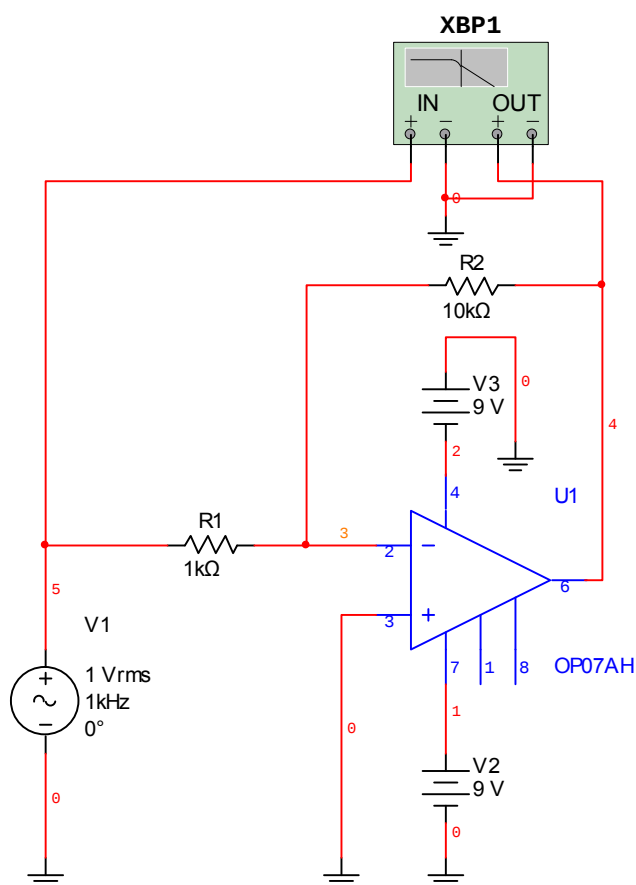
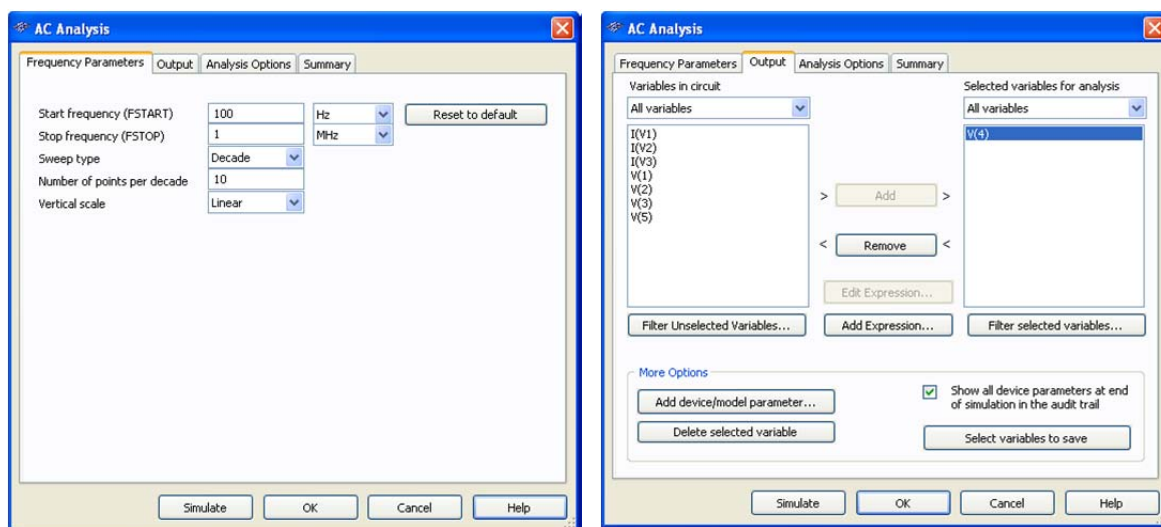


Рис. 4.75. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ



а

б

Рис. 4.76. Настройки параметров анализа AC analysis

Нажмите кнопку  для запуска анализа, результаты анализа отображаются на плоттере, рис. 4.77.

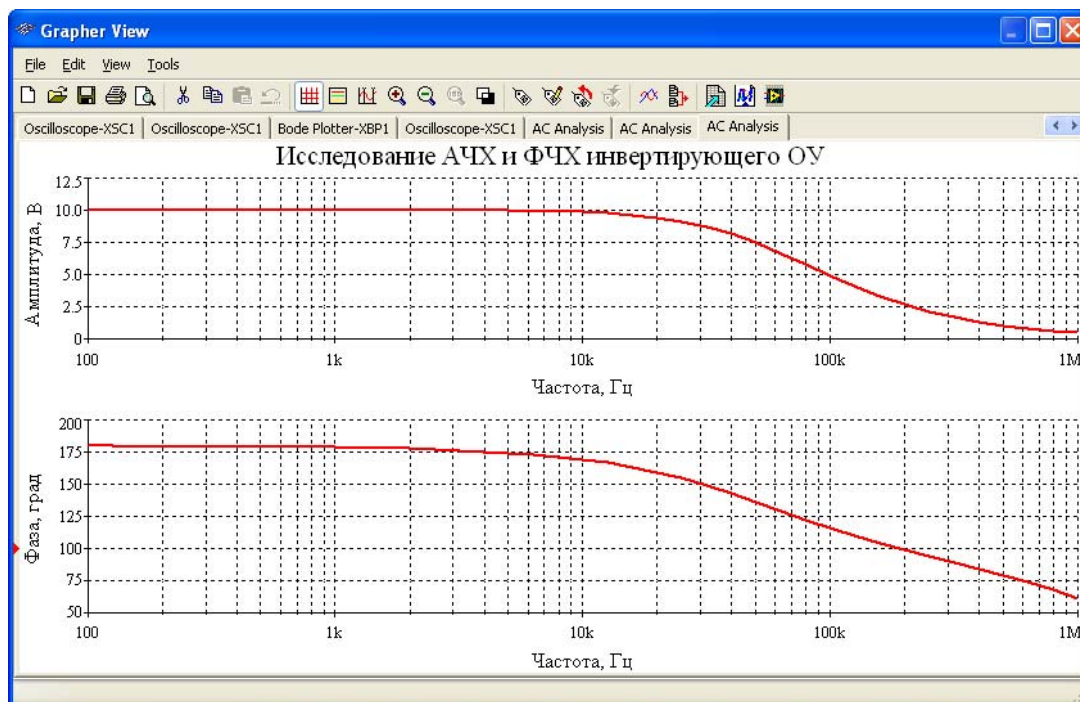


Рис. 4.77. АЧХ и ФЧХ инвертирующего ОУ

При необходимости получения значений коэффициентов усиления или фазового сдвига каскада на разных частотах используйте Cursors.

Примечание: при использовании частотного анализа (AC analysis) амплитуда входного сигнала задается в окне AC Analysis Magnitude свойств источника переменного напряжения AC_POWER. При частотном анализе не учитывается напряжение питания ОУ, таким образом, в отличие от реальной схемы, при частотном анализе ОУ всегда будет находиться в линейном режиме.

1.4.2. Инвертор

Переберите схему, изображенную на рис. 4.75, чтобы она реализовывала схему инвертора. Повторите вышеизложенную методику эксперимента и получите АЧХ и ФЧХ инвертора.

1.4.3. Делитель

Соберите схему, изображенную на рис. 4.75, чтобы она реализовывала схему операционного делителя напряжения с коэффициентом передачи $-0,1$. Получите АЧХ и ФЧХ делителя.

1.5. Исследование АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

Соберите схему, изображенную на рис. 4.78 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи $+11$.

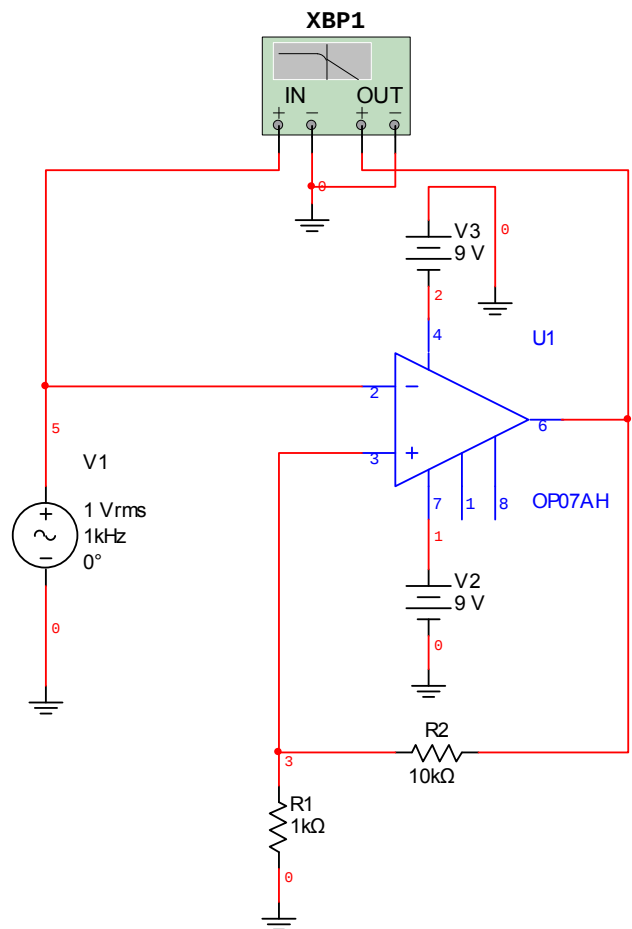


Рис. 4.78. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

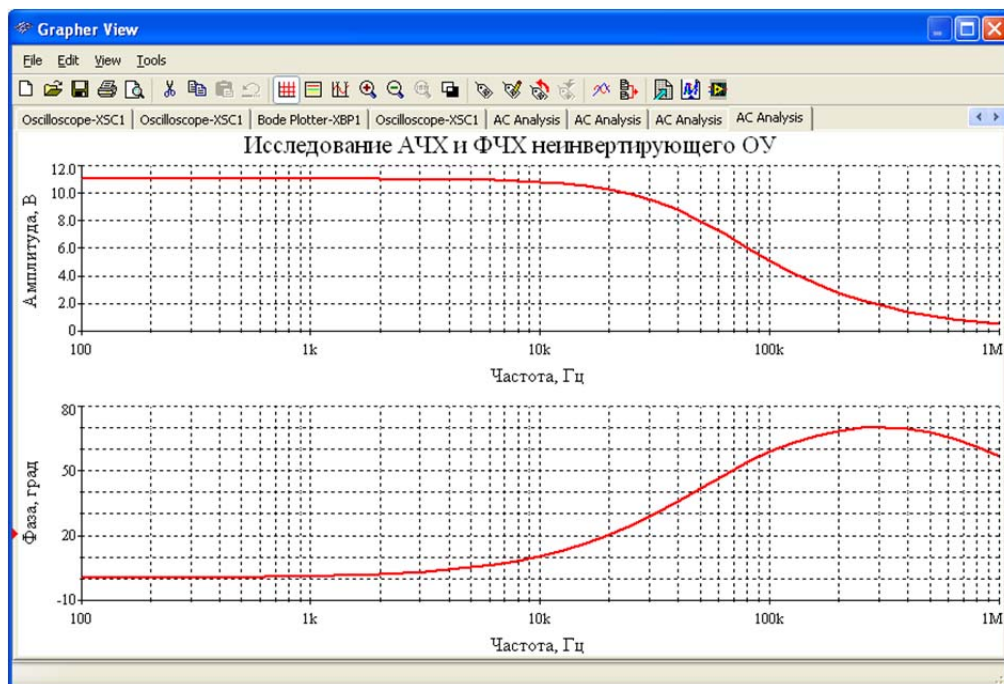


Рис. 4.79. АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ

С помощью AC analysis получите АЧХ и ФЧХ неинвертирующего ОУ, рис. 4.79.

Переберите схему, изображенную на рис. 4.78 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи $+2$. Получите новые АЧХ и ФЧХ.

Переберите схему, изображенную на рис. 4.78 и реализующую усилитель напряжения с коэффициентом передачи $+1,1$. Получите АЧХ и ФЧХ данной схемы.

Лабораторная работа № 4.2

Функциональное применение операционных усилителей (линейные преобразования сигналов)

1.1. Исследование схемы сумматора

Соберите схему сумматора, изображенную на рис. 4.80, изменив в ней сопротивления так, чтобы реализовать уравнение:

$$U_{\text{вых}} = (-5 \cdot U_1) - (10 \cdot U_{2\text{м}} \cdot \sin(\omega t)).$$

Предварительно определите предельные значения амплитуды гармонического сигнала $U_{2\text{м}}$, которые при разных значениях U_1 еще гарантируют линейный режим работы сумматора. Расчеты провести для следующих значений U_1 : +1,0 В; +0,5 В; +0,0 В; -1,0 В; -0,5 В.

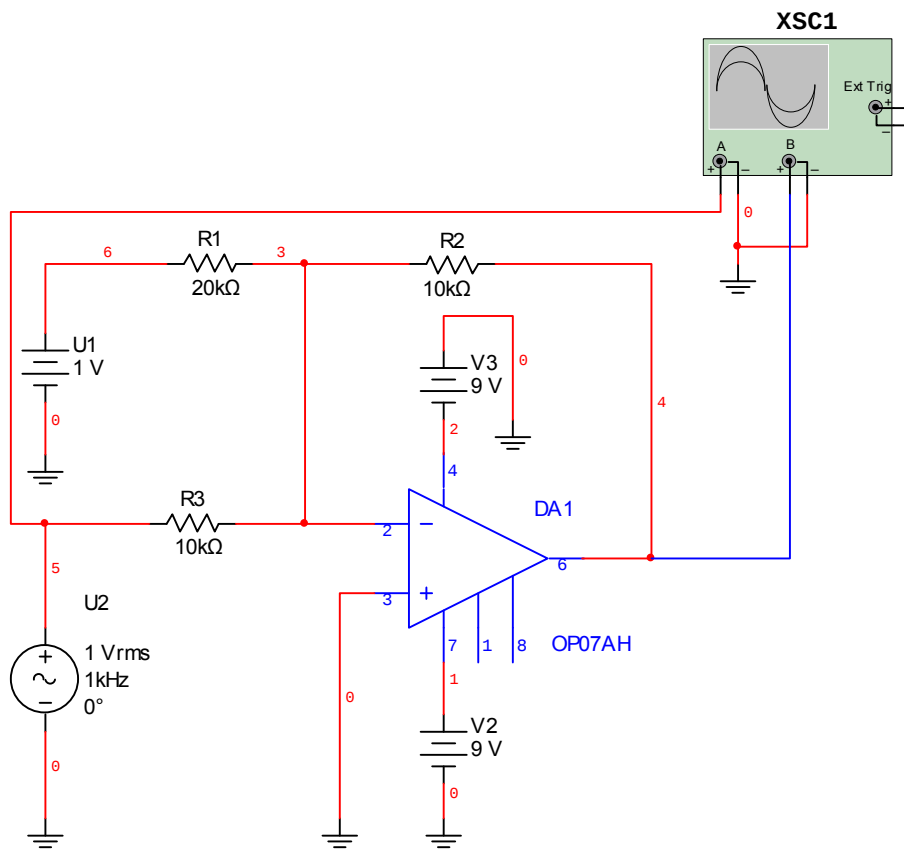


Рис. 4.80. Сумматор на операционном усилителе

Установите частоту источника переменного напряжения 1 кГц, а напряжение $U_1 = +1$ В. Последовательно с выбранным шагом увеличивая амплитуду переменного напряжения до рассчитанного предельного значения, просматривайте, как работает сумматор, и с помощью курсора измеряйте на выходном напряжении его максимальное отрицательное значение. Исследование заканчивайте при появлении отсечки на выход-

ном напряжении. Сравните измеренное значение с ранее полученным результатом при предварительных расчетах.

Повторите предыдущий пункт для других значений напряжения U_1 .

Соберите сумматор, на выходе которого получается напряжение: $U_{\text{ВЫХ}} = 2 - 3 \cdot \sin(\omega t)$. Подтвердите работу схемы экспериментально.

Используя возможности источника переменного напряжения, исследуйте схему сумматора, у которого при $U_1 = +3$ В и $U_{2m} = 2$ В любое мгновенное значение выходного напряжения положительно. Какое уравнение выходного напряжения у Вас получилось?

1.2. Исследование интегратора на инвертирующем ОУ

Соберите схему интегратора, изображенную на рис. 4.81.

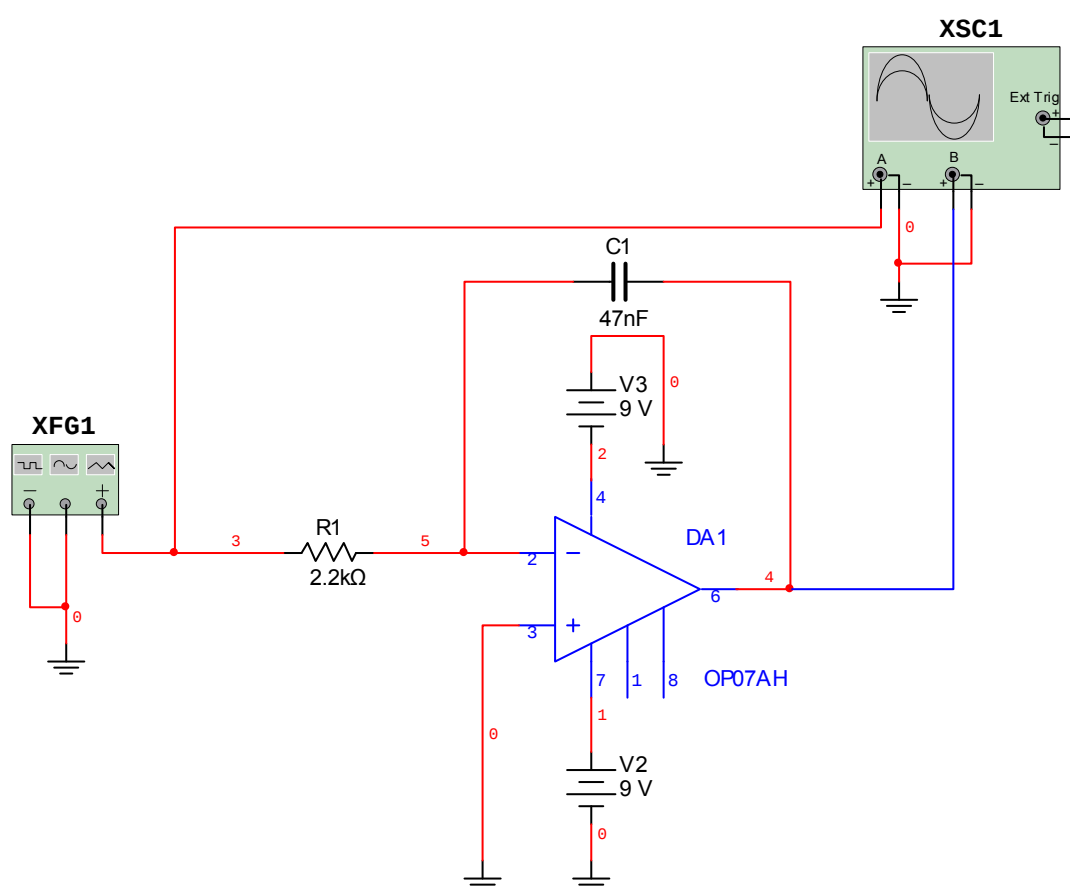


Рис. 4.81. Интегратор на инвертирующем ОУ

Определите частоту квазирезонанса, определяемую значениями сопротивления $R1$ и емкости $C1$.

Установите частоту, близкую к рассчитанному значению. Переключите генератор на генерацию последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой 2,5 В с нулевым напряжением DC Offset. Просмотрите на осциллографе входное и выходное напряжения схемы.

Измерьте с помощью курсора наименьшее и наибольшее значения выходного напряжения на его нарастающем участке, а также временной интервал его нарастания. Определите скорость нарастания напряжения. Установите, чем она определяется, исходя из аналитической зависимости для выходного напряжения интегратора.

Проведите дополнительные исследования, чтобы доказать правильность Ваших выводов относительно скорости нарастания, изменяя амплитуду входных импульсов с генератора (3 значения) или изменяя значение сопротивления интегратора (3 значения), оставаясь в линейном режиме работы ОУ. Экспериментальные данные по скорости нарастания сведите в таблицу. Сличите теоретические и экспериментальные данные. Сделайте выводы.

С помощью методики частотного анализа (AC analysis) исследуйте АЧХ и ФЧХ интегратора. Совпадают ли полученные Вами данные с прогнозируемыми? Сделайте выводы по результатам эксперимента.

1.3. Исследование схемы ФНЧ первого порядка

Соберите схему фильтра, изображенную на рис. 4.82, изменив ее путем включения вместо $R3$ другого резистора в цепи обратной связи так, чтобы $K(0) = -10$.

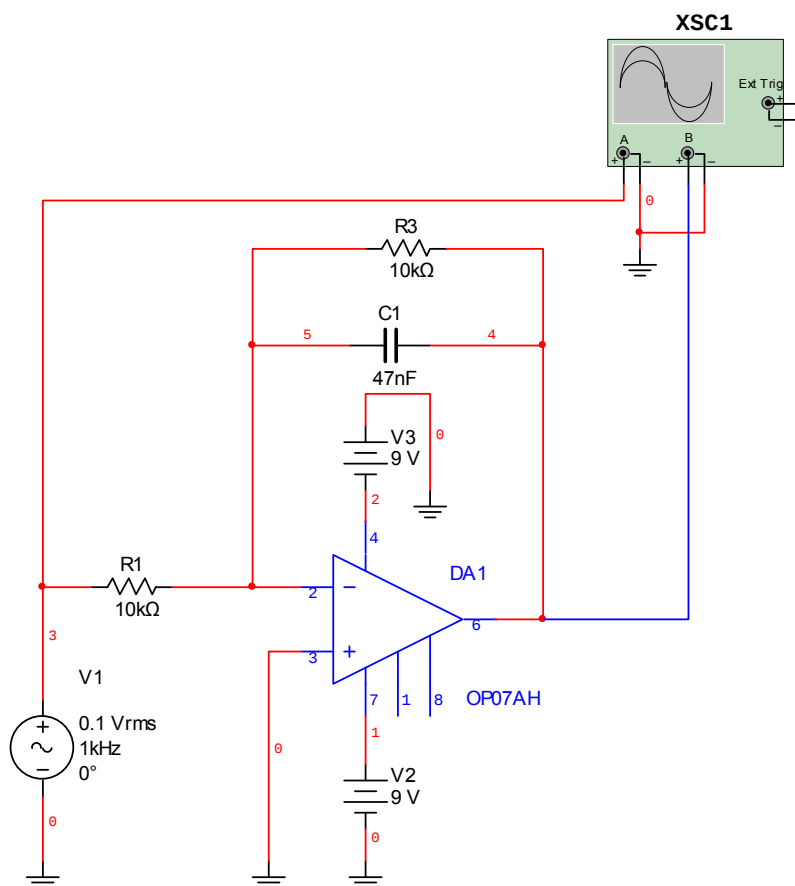


Рис. 4.82. Фильтр нижних частот первого порядка

Определите частоту среза собранного ФНЧ. Данные о частоте среза и усилении на постоянном токе используйте для грамотной установки параметров (амплитуды и частоты), определяющих работу источника переменного напряжения при сохранении линейного режима операционного усилителя. Для этого ориентируйтесь на ранее полученные данные по его амплитудной характеристике.

Установите амплитуду гармонического напряжения, близкую к максимально возможной, которая гарантирует линейный режим работы ОУ даже на самой низкой частоте сигнала с источника переменного напряжения.

Изменяя частоту источника переменного напряжения от $0,1 \cdot f_{\text{ср}}$ до $10 \cdot f_{\text{ср}}$, убедитесь в правильности работы схемы фильтра.

С помощью методики частотного анализа (AC analysis) исследуйте АЧХ и ФЧХ фильтра, начальное значение частоты установите равным 100 mHz.

1.4. Исследование схемы ФВЧ первого порядка

Соберите схему фильтра, изображенную на рис. 4.83.

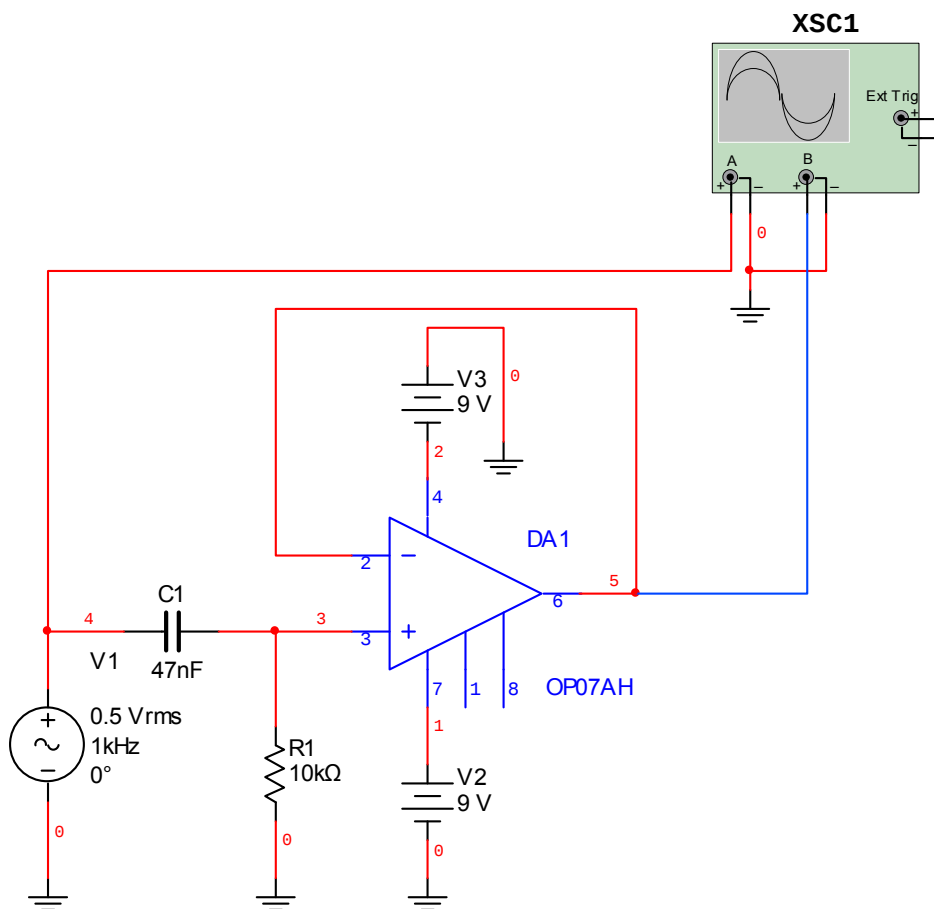


Рис. 4.83. Фильтр верхних частот первого порядка

Установите амплитуду источника переменного напряжения, равную 2,5 В.

Определите частоту среза собранной схемы ФВЧ.

С помощью методики частотного анализа (AC analysis) исследуйте АЧХ и ФЧХ фильтра, начальное значение частоты установите равным $0,01 \cdot f_{\text{ср}}$.

1.5. Исследование избирательного усилителя с цепью Вина

Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 4.84.

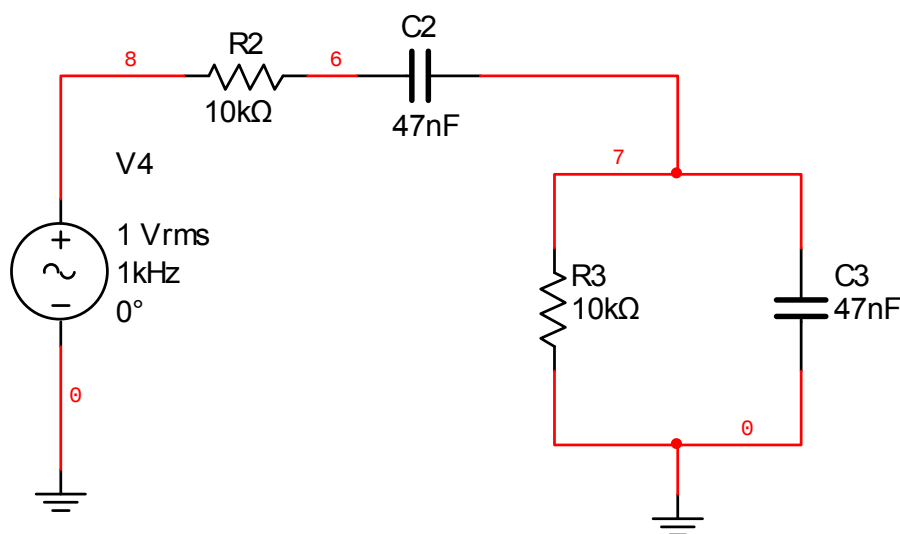


Рис. 4.84. Схема исследования АЧХ и ФЧХ цепи Вина

Проведите предварительно анализ цепи Вина. Определите частоту «квазирезонанса» RC -цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте «квазирезонанса». Теоретически определите добротность цепи по ожидаемому виду АЧХ и ФЧХ.

Используя методику частотного анализа (AC analysis), проведите анализ цепи Вина, начальное значение частоты установите равным 100 мГц, конечное значение частоты – 1 МГц и число шагов за декаду изменения частоты, равное 10. Результаты анализа отображаются на плоттере (рис. 4.85).

Сравните полученные характеристики с ожидаемыми результатами. По экспериментальным данным уточните частоту квазирезонанса цепи и определите ее добротность. Уточнение значения частоты лучше всего провести по ФЧХ. Добротность определите следующим образом: по нулевому фазовому сдвигу уточните частоту квазирезонанса и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте. Затем от полученного

значения отнимите 3дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания, а потом и саму полосу. Добротность получим как отношение частоты квазирезонанса цепи к полосе ее пропускания. Определите, совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные. Сделайте выводы по проделанному исследованию.

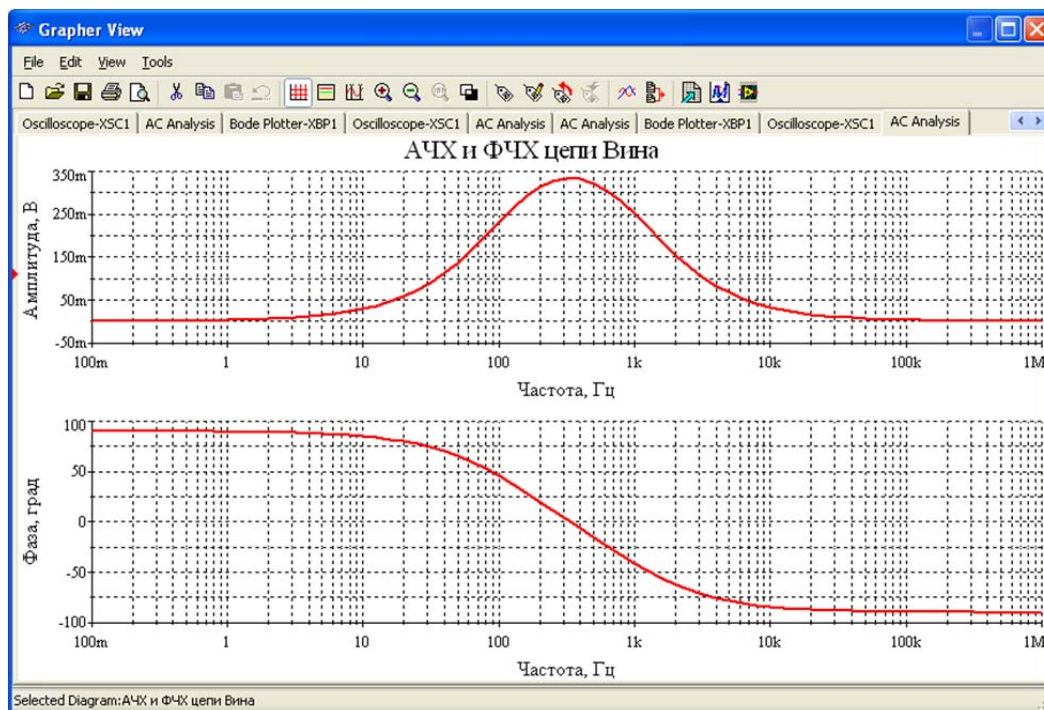


Рис. 4.85. АЧХ и ФЧХ цепи Вина

Соберите схему избирательного усилителя (рис. 4.86). Потенциометры находятся в группе Basic, семейство Potentiometer.

Установите нулевую амплитуду источника переменного напряжения.

Переведите движок потенциометра R_4 в крайнее правое положение, в котором его сопротивление минимально и коэффициент отрицательной обратной связи схемы гарантированно меньше $1/3$, а усилитель переходит в режим генератора, выдавая на выходе периодическое напряжение.

Перемещайте движок потенциометра медленно влево и добейтесь срыва колебаний.

Установите амплитуду источника переменного напряжения, равную 40 мВ. В дальнейшем это значение придется уточнить, так как оно зависит от выбранного Вами положения движка потенциометра, определяющего и усиление, и эквивалентную добротность схемы избирательного усилителя.

Изменяя частоту источника переменного напряжения от 100 до 1000 Гц с шагом 100 Гц по осциллографу, проследите за работой схемы.

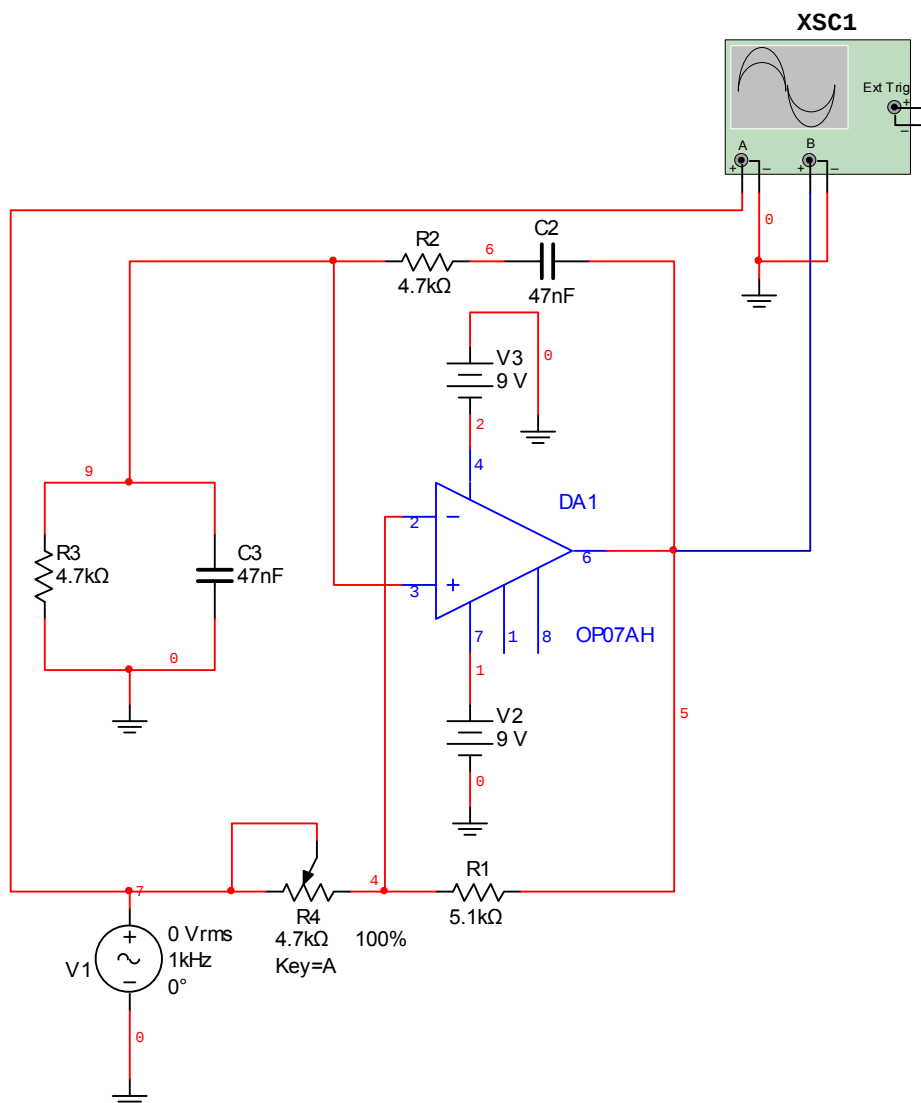


Рис. 4.86. Избирательный усилитель с Г-образной RC цепью

Схема настроена правильно, если на всех частотах сохраняется линейный режим работы ОУ. Если при работе схемы в режиме избирательного усилителя наблюдается отсечка гармонического сигнала, то уменьшите амплитуду с источника переменного напряжения. Целесообразно так отстроить схему, чтобы при входном напряжении несколько десятков милливольт на ее выходе на частоте, близкой к частоте «квазирезонанса», было бы напряжение несколько вольт.

С помощью методики частотного анализа (AC analysis) исследуйте АЧХ и ФЧХ схемы, начальное значение частоты установите равным 100 Hz, конечное значение частоты 10 kHz.

По экспериментальным данным уточните частоту «квазирезонанса» избирательного усилителя и определите его максимальное усиление и эквивалентную добротность.

Измерьте значение сопротивления потенциометра, рассчитайте коэффициент отрицательной обратной связи и оцените значение эквивалентной добротности. Насколько оно близко к полученному ранее значению по проведенному эксперименту? Во сколько раз эквивалентная добротность избирательного усилителя больше добротности используемой цепи Вина?

Передвиньте еще движок потенциометра влево, чтобы получить другое значение эквивалентной добротности. Повторите вышеприведенный эксперимент и обработку его данных. Сделайте выводы по результатам проведенных исследований.

1.6. Исследование схемы преобразователя напряжения в ток

Соберите схему преобразователя напряжения в ток, изображенную на рис. 4.87. В качестве нагрузки сначала используйте сопротивление $R5$. Определение тока нагрузки в дальнейшем осуществляйте путем измерения напряжения с помощью мультиметра на контрольном сопротивлении $R2$.

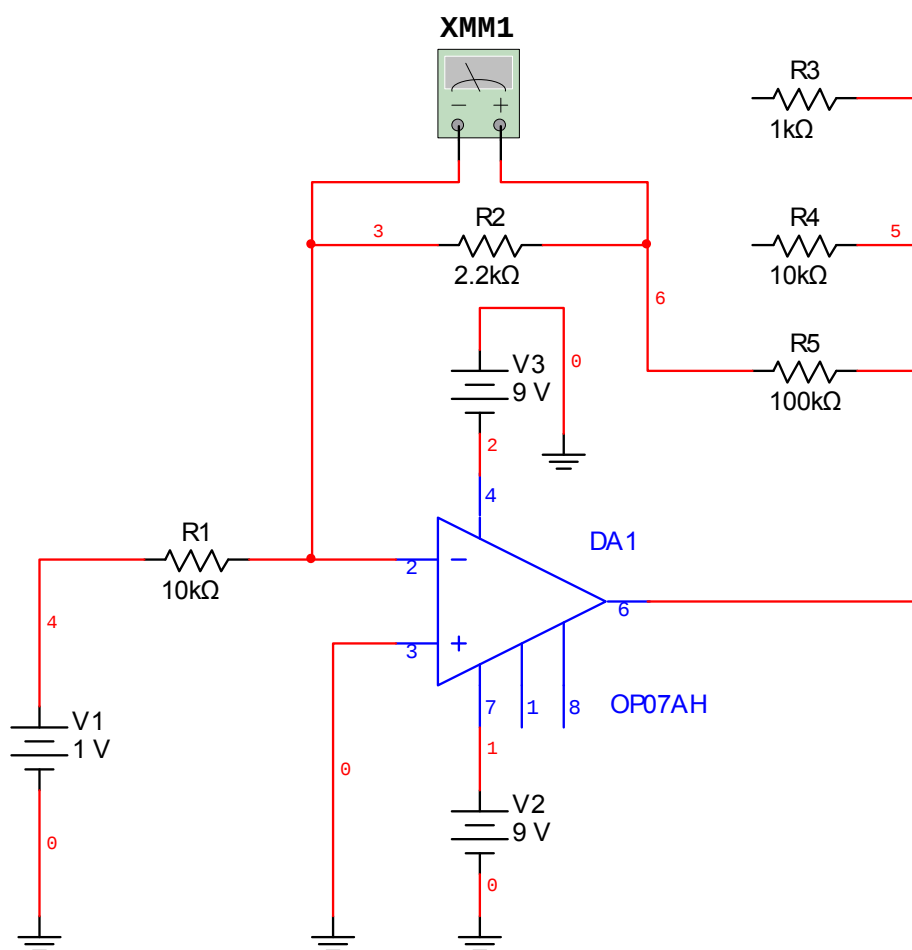


Рис. 4.87. Преобразователь напряжения в ток

Установите значение источника постоянного напряжения $V1$ вблизи максимально возможного, используя предварительно проведенные расчеты по обеспечению линейного режима работы ОУ для наибольшей нагрузки $102,4 \text{ кОм}$. Определите ожидаемое значение тока генератора тока, учитывая значение $R1$, и зафиксируйте его.

Измерьте напряжения на контрольном резисторе $R2$ при разных значениях сопротивлений нагрузки, пересчитывайте их в значения тока в нагрузке, постройте график $I_H = f(R_H)$, рассчитайте погрешности между ожидаемыми и реальными значениями тока в нагрузке.

Проведите оценочные расчеты значения выходного сопротивления преобразователя на основе полученных данных. Сделайте выводы.

Лабораторная работа № 4.3

Функциональное применение операционных усилителей (нелинейные преобразования сигналов)

1.1. Исследование схем компараторов напряжения

1.1.1. Исследование нуля-компаратора

Соберите схему нуля-компаратора, аналогичную схеме, приведенной на рис. 4.88.

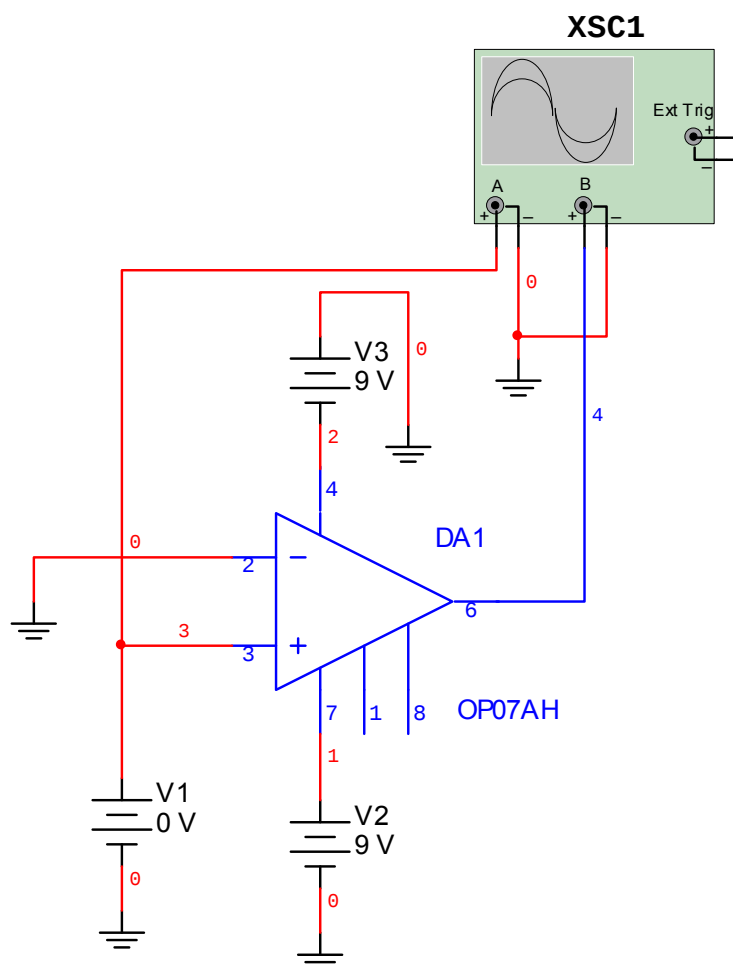


Рис. 4.88. Схема компаратора

Соберите схему нуля-компаратора для изучения временных диаграмм, поясняющих его работу (рис. 4.89).

Установите на генераторе частоту 1 кГц, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы требуемый вид амплитудной характе-

ристики и полученное ранее напряжение срабатывания. Если результаты существенно не совпадают, то объясните причины их расхождений.

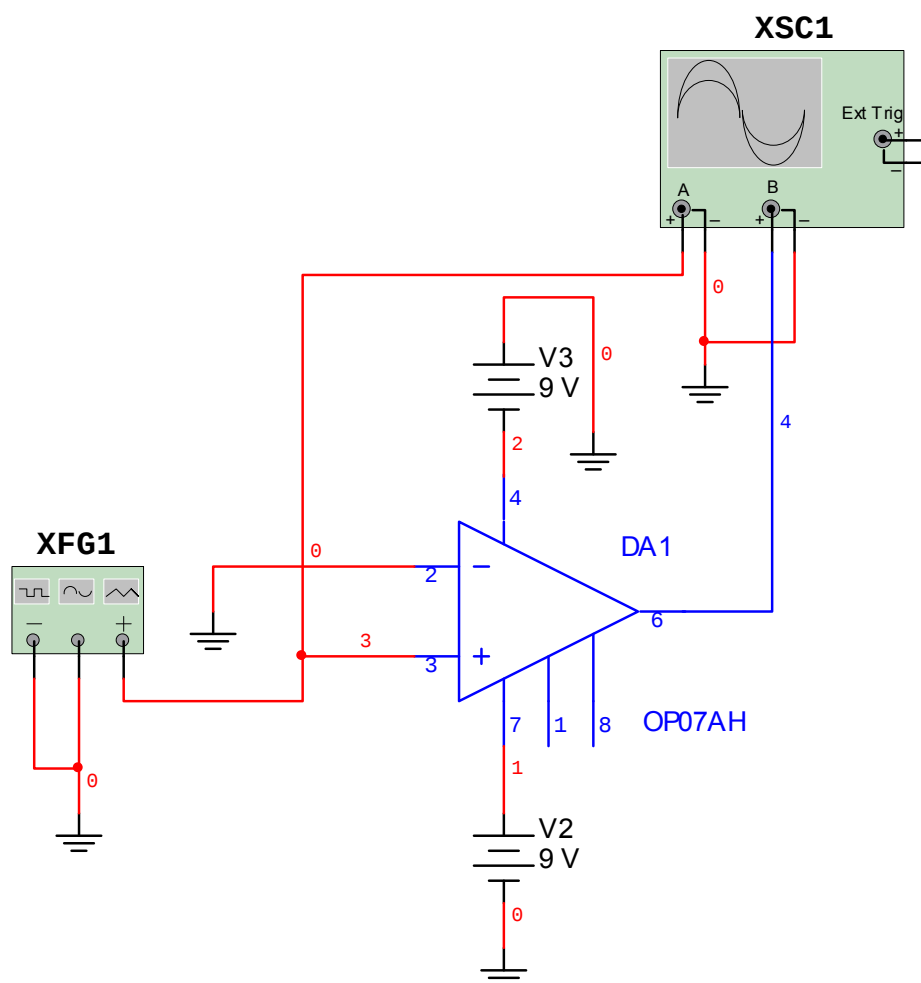


Рис. 4.89. Исследование временных диаграмм компаратора

1.1.2. Исследование компаратора с опорным напряжением

Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 4.90.

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В.

Установите значение опорного напряжения на инвертирующем входе ОУ, равное +1 В, изменяя сопротивление потенциометра R3 и используя канал A+ осциллографа.

Определите значение выходного напряжения компаратора и зафиксируйте его. Поясните, почему оно такое в проведенном эксперименте.

Установите значение напряжения источника постоянного напряжения V1 несколько ниже, чем 1 В, учитывая результаты исследований, только что проведенных по определению напряжения срабатывания компаратора. Следите, чтобы при этом компаратор не сработал.

Повышайте напряжение источника V1 до момента срабатывания компаратора и зафиксируйте напряжение срабатывания. Как соотносится это напряжение с выставленным ранее опорным напряжением?

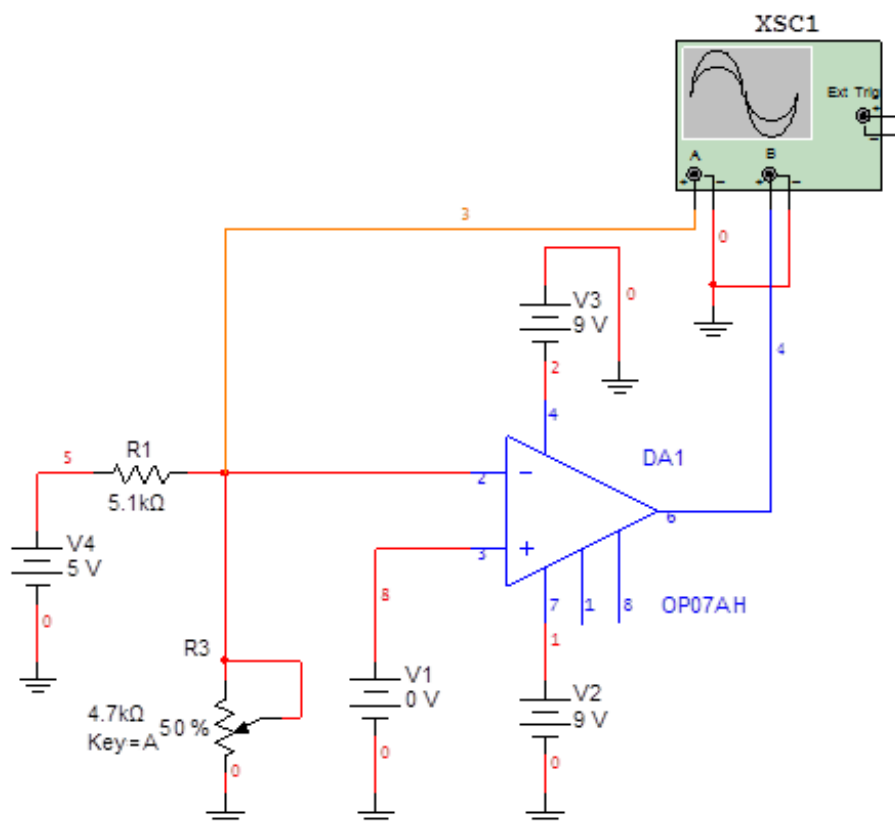


Рис. 4.90. Схема компаратора с опорным напряжением

Подключите на вход компаратора генератор вместо источника V1, аналогично схеме на рис. 4.89. Установите частоту 1 кГц, амплитуду 2,5 В. Просмотрите и зафиксируйте временные диаграммы компаратора при двух режимах: генерации синусоидального и треугольного напряжений. Подтверждают ли временные диаграммы вид амплитудной характеристики компаратора и полученное ранее напряжение срабатывания. Если имеет место существенное несовпадение результатов, то объясните причины их расхождений.

1.1.3. Исследование схемы компаратора с гистерезисом

Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 4.91.

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора. Временно подключите канал В+ осциллографа к инвертирующему входу операционного усилителя и с помощью потенциометра R3 установите напряжение +1 или -1 В в зависимости от значения выходного напряжения.

Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. При этом воспользуйтесь методикой мысленного эксперимента, изложенной в теоретическом разделе. В ходе эксперимента меняйте напряжения источника V1. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

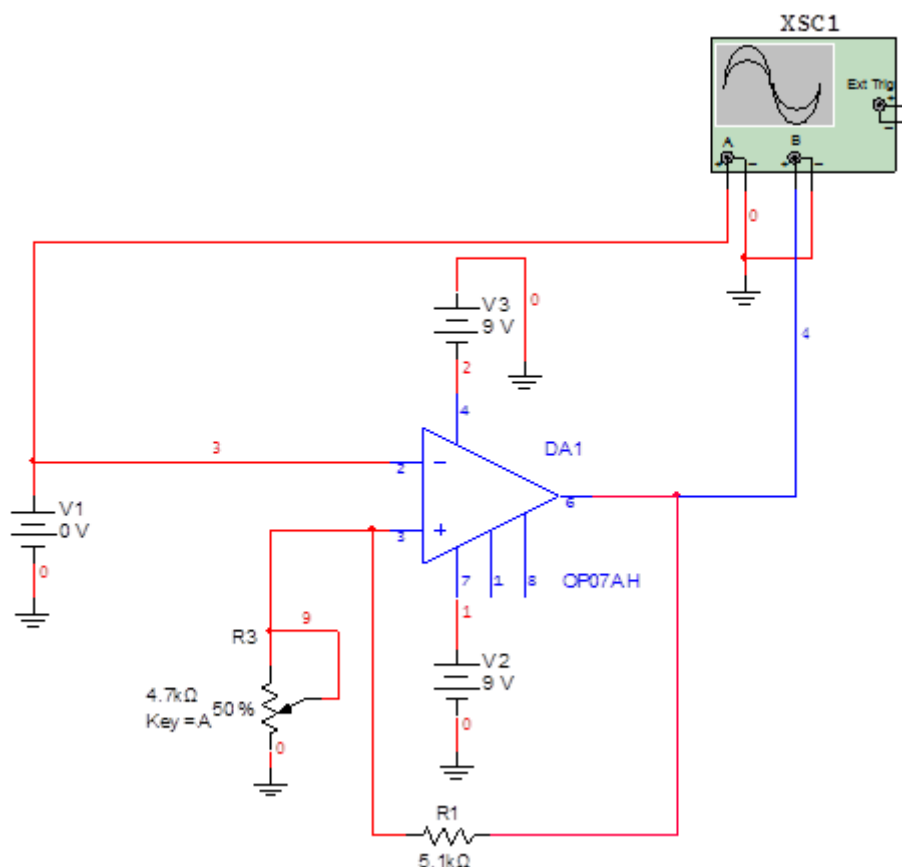


Рис. 4.91. Компаратор с гистерезисом

Измените с помощью потенциометра R3 напряжение на инвертирующем входе ОУ (значение напряжения выберите сами). Проведите эксперимент, используя методику предыдущего пункта. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса. Чем определяются напряжения срабатывания компаратора и ширина зоны гистерезиса?

1.2. Исследование схемы операционного выпрямителя

Соберите схему операционного выпрямителя, изображенную на рис. 4.92.

Установите частоту гармонического сигнала с генератора 1 кГц и амплитуду 2,5 В. Какова ожидаемая амплитуда сигналов, которые бу-

дут наблюдаться на выходах выпрямителя? Определите и зафиксируйте эти значения.

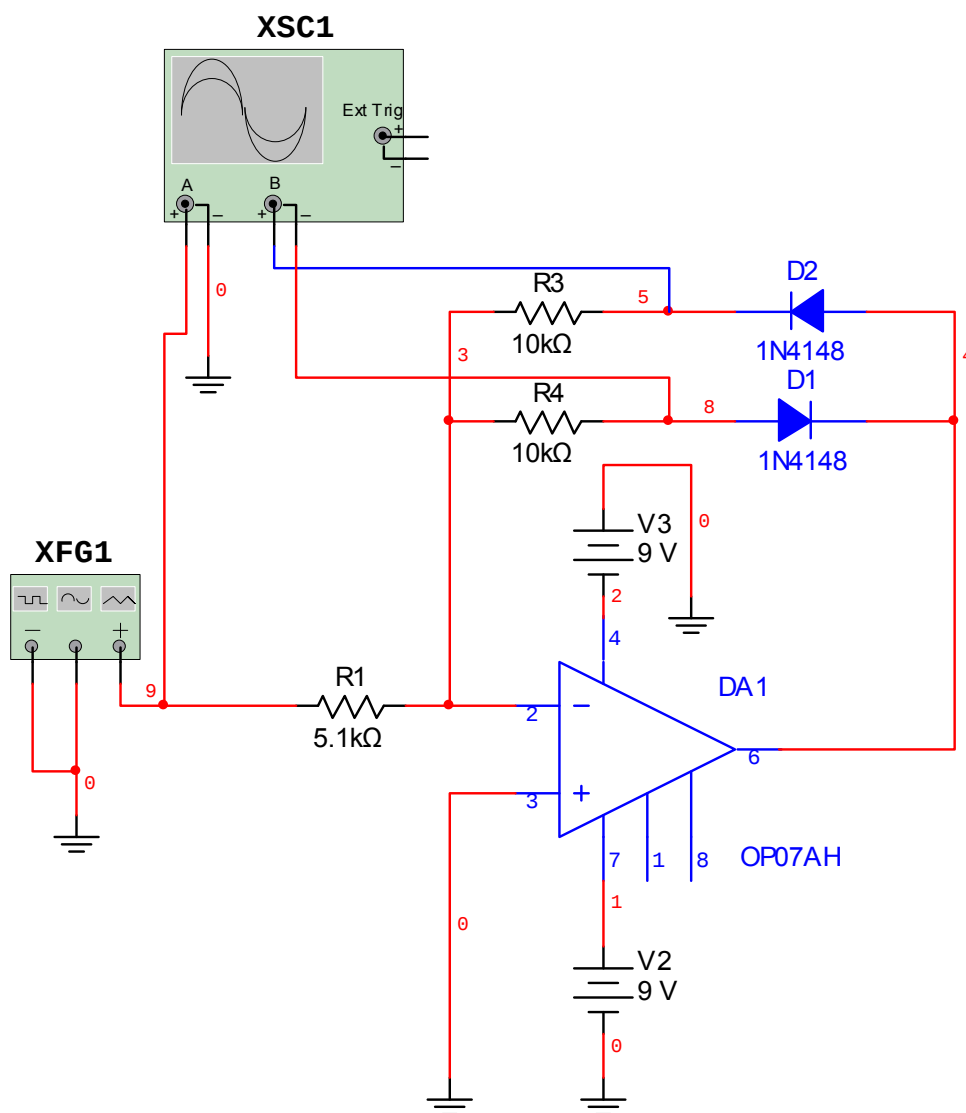


Рис. 4.92. Схема выпрямителя на ОУ

Получите временные диаграммы сигналов, действующие на входе и выходах выпрямителя, используя осциллограф. Получите данные по преобразовательной характеристике двухполупериодного выпрямителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх} \sim})$, изменяя амплитуду входного гармонического напряжения от 2,5 до 1 В с интервалом 0,1 В и измеряя постоянную составляющую выходного напряжения с помощью осциллографа. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о линейности характеристики.

1.3. Исследование ограничителя на ОУ

Соберите схему ограничителя, изображенную на рис. 4.93.

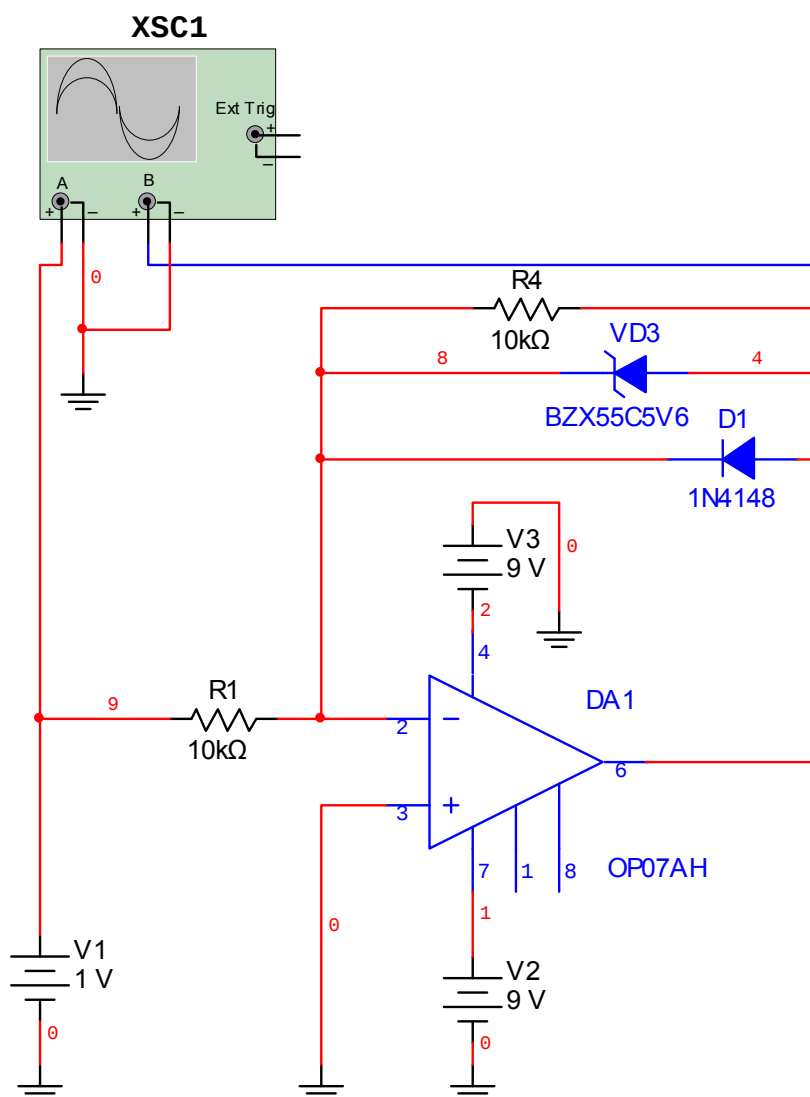


Рис. 4.93. Усилитель-ограничитель с постоянными уровнями ограничения

Получите данные по амплитудной характеристике ограничителя, изменяя входное напряжение источника V1 от -7 до $+7$ В с интервалом в 1 В и измеряя выходное напряжение с помощью осциллографа. Полученные данные сведите в таблицу, постройте график и сделайте выводы о соответствии эксперимента и теории.

Подключите на вход компаратора генератор вместо источника V1, установите частоту 1 кГц и амплитуду 2,5 В.

Определите по осциллограмме выходного напряжения, почему не работает стабилитрон VD2, так как на ней отсутствует ограничение на соответствующем уровне его стабилизации.

Переберите схему ограничителя так, чтобы стабилитрон $VD3$ пробивался ($U_{СТ} \approx 5,6$ В) и участвовал при ограничении выходного сигнала. Установите нужный резистор R в схему.

1.4. Исследование логарифмического усилителя на ОУ

Соберите схему логарифмического усилителя, изображенную на рис. 4.94.

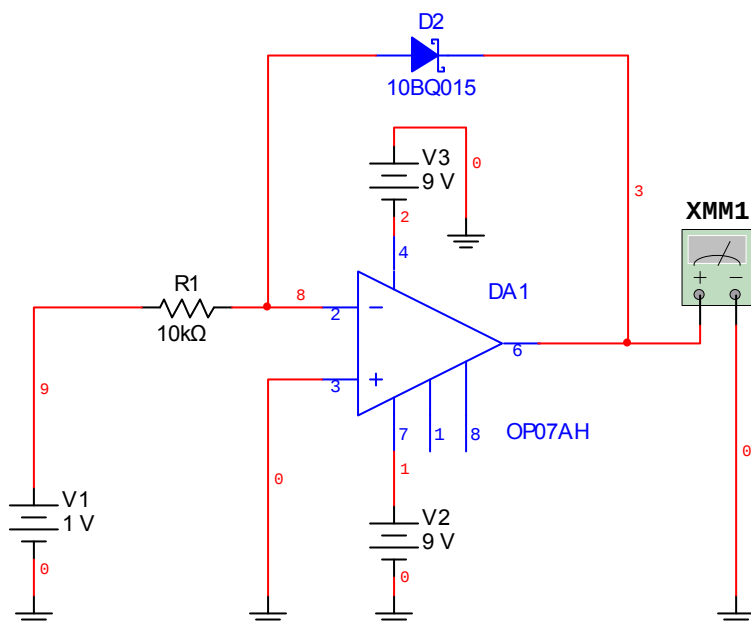


Рис. 4.94. Логарифмический усилитель

Регулируя входное напряжение с помощью источника $V1$, заполните табл. 4.4.

Таблица 4.4

$U_{ВХ}$, В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$U_{ВЫХ}$, В							
$U_{ВЫХ. \text{ расч.}}$, В							

Для расчета значений $U_{ВЫХ. \text{ расч.}}$ воспользуйтесь следующим соотношением:

$$U_{ВЫХ} = -m \cdot \varphi_T \cdot \ln \left(\frac{U_{ВХ}}{I_0 \cdot R1} \right),$$

где $m = 1,1$ – коэффициент, зависящий от материала; $\varphi_T = (25\text{--}30)$ мВ – температурный потенциал; $I_0 = 2$ мкА – тепловой ток.

Лабораторная работа № 5.1

Автогенераторы синусоидальных колебаний на операционных усилителях

1.1. Исследование характеристик цепи Вина

Проводится, если не выполнялся п. 4.5 лабораторной работы № 4.2. «Функциональное применение операционных усилителей (линейные преобразования сигналов)».

Соберите схему для исследования характеристик цепи Вина с помощью анализатора Боде, изображенную на рис. 4.95.

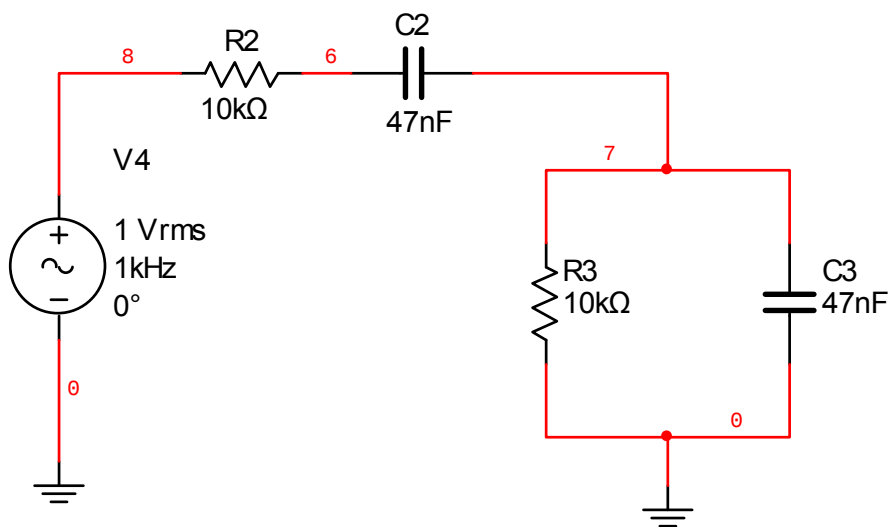


Рис. 4.95. Схема исследования АЧХ и ФЧХ цепи Вина

Проведите предварительно анализ цепи Вина. Определите частоту «квазирезонанса» RC -цепи по параметрам ее сопротивлений и емкостей. Найдите значения модуля и фазового сдвига передачи цепи на частоте «квазирезонанса». Теоретически определите добротность цепи по ожидаемому виду АЧХ и ФЧХ.

Используя методику частотного анализа (AC analysis), проведите анализ цепи Вина, начальное значение частоты установите равным 100 mHz, конечное значение частоты 1 MHz и число шагов за декаду изменения частоты, равное 10. Результаты анализа отображаются на плоттере, рис. 4.96.

По экспериментальным данным уточните частоту «квазирезонанса» избирательной цепи и определите ее добротность. Добротность определите следующим образом: по нулевому фазовому сдвигу на ФЧХ уточните частоту «квазирезонанса» и значение передачи цепи в децибелах на этой частоте.

Затем от полученного значения отнимите 3 дБ и определите нижнюю и верхнюю частоты полосы пропускания цепи, а потом и саму полосу, как разность полученных значений. Добротность приблизительно определяется как отношение частоты «квазирезонанса» цепи к полосе ее пропускания. Совпали ли у Вас теоретические и экспериментальные данные? Сделайте выводы по проделанному исследованию.

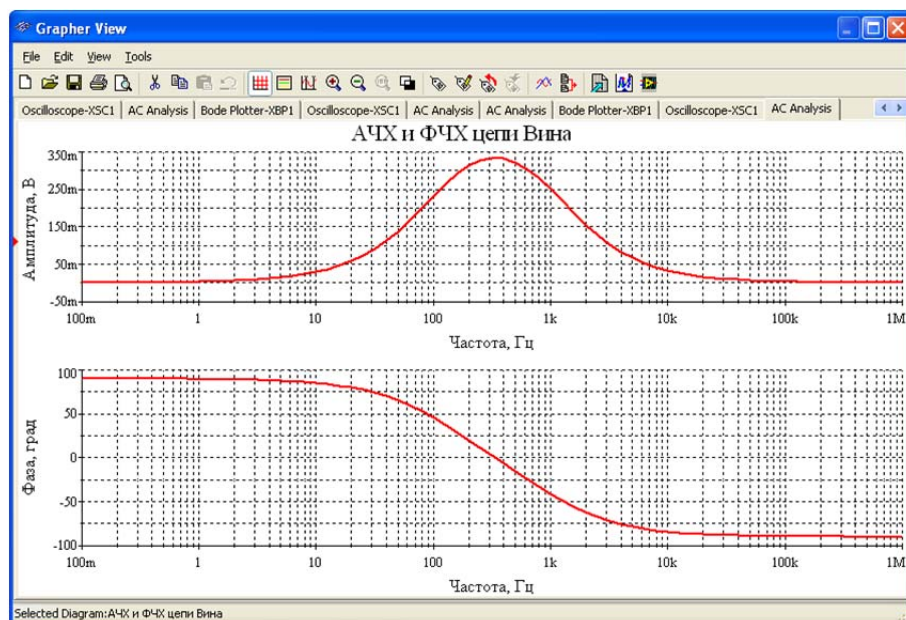


Рис. 4.96. АЧХ и ФЧХ цепи Вина

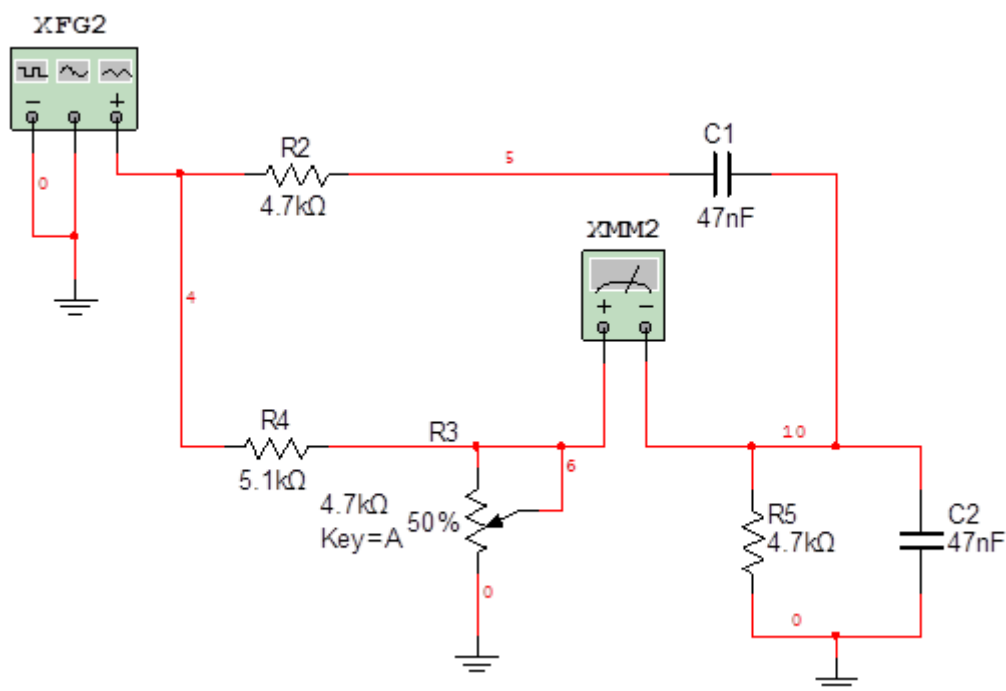


Рис. 4.97. Мостовая схема в RC-автогенераторе

1.2. Исследование автогенератора гармонических колебаний

1.2.1. Исследование условий возникновения колебаний

Соберите схему для исследования моста Вина, изображенную на рис. 4.97.

Проведите сопротивление потенциометра R_3 , найдите и запомните положение движка потенциометра R_3 , когда его сопротивление составляет половину сопротивления R_4 и усиление неинвертирующего усилителя будет равно 3. Найдите также и запомните положение движка потенциометра, когда сопротивление R_4 в четыре раза больше сопротивления R_3 и коэффициент усиления неинвертирующего усилителя станет равным 5. Установите также направление вращения движка потенциометра, при котором, например, его сопротивление увеличивается.

Установите у мультиметра режим измерения напряжения переменного тока.

Установите на генераторе значение рассчитанной ранее частоты «квазирезонанса» для цепи Вина и амплитуду 2,5 В гармонического напряжения.

Установите движок потенциометра R_3 в положение, когда его сопротивление примерно составляет половину сопротивления R_4 , а затем, вращая движок, сбалансируйте мост. Зафиксируйте значение минимального напряжения. Почему оно не равно нулю? Совпало ли положение движка с исходным положением (в начале пункта). Отметьте, что разбалансировка моста приводит к увеличению выходного напряжения моста и к изменению его фазы на инверсное значение.

Проверьте, что при балансе моста напряжение на выходе цепи Вина и резистивного делителя составляет определенную долю (какую?) от входного напряжения, получаемого с генератора. Чтобы выполнить этот пункт, измените схему: вывод «–» мультиметра заземлите, а вывод «+» подсоединяйте поочередно к входу и к одному или другому выходу моста. Чтобы произвести одновременные измерения, добавьте второй мультиметр в схему. Полученные данные зафиксируйте и сравните их с теоретическими значениями.

3.2.1. Исследование разомкнутой системы автогенератора, получение условий возникновения колебаний в автогенераторе

Для исследования условий возникновения колебаний по поведению АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы соберите схему, изображенную на рис. 4.98.

Установите движок потенциометра R_7 в положение, когда его сопротивление больше половины сопротивления R_{10} , т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя меньше 3.

С помощью методики частотного анализа (AC analysis) проведите анализ цепи Вина, начальное значение частоты установите равным 1 Hz, конечное значение частоты 100 kHz и число шагов за декаду изменения частоты, равное 10.

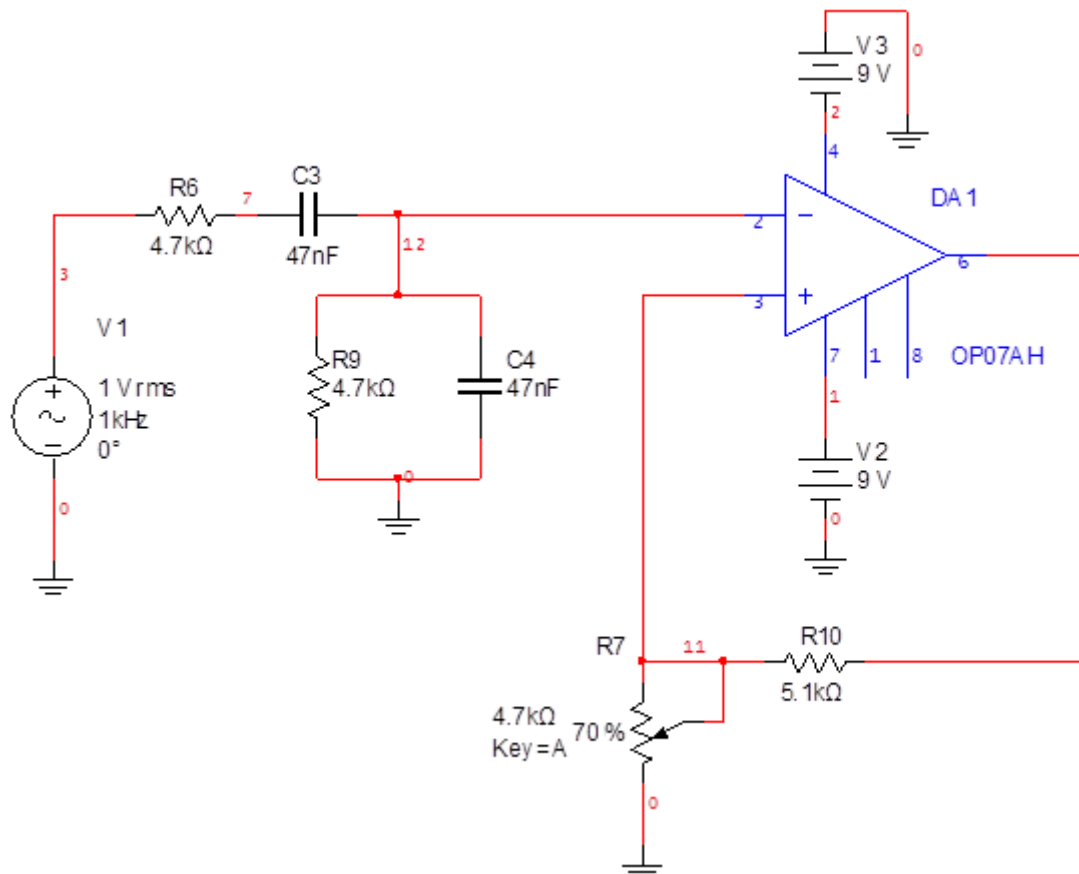


Рис. 4.98. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ петлевого усиления разомкнутой системы автогенератора

На полученной ФЧХ по нулевому фазовому сдвигу определите частоту «квазирезонанса», а затем на этой частоте переместитесь на АЧХ петлевого усиления и определите его значение. Если это значение меньше единицы, то, несмотря на выполнение условия баланса фаз, при замыкании петли обратной связи генерация колебаний будет отсутствовать, так как не выполняются необходимые амплитудные соотношения.

Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т. е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 4.99. Запустите симуляцию и убедитесь в отсутствии колебаний.

Вернитесь снова к схеме рисунка 4.98, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R7$ было чуть-чуть меньше половины сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

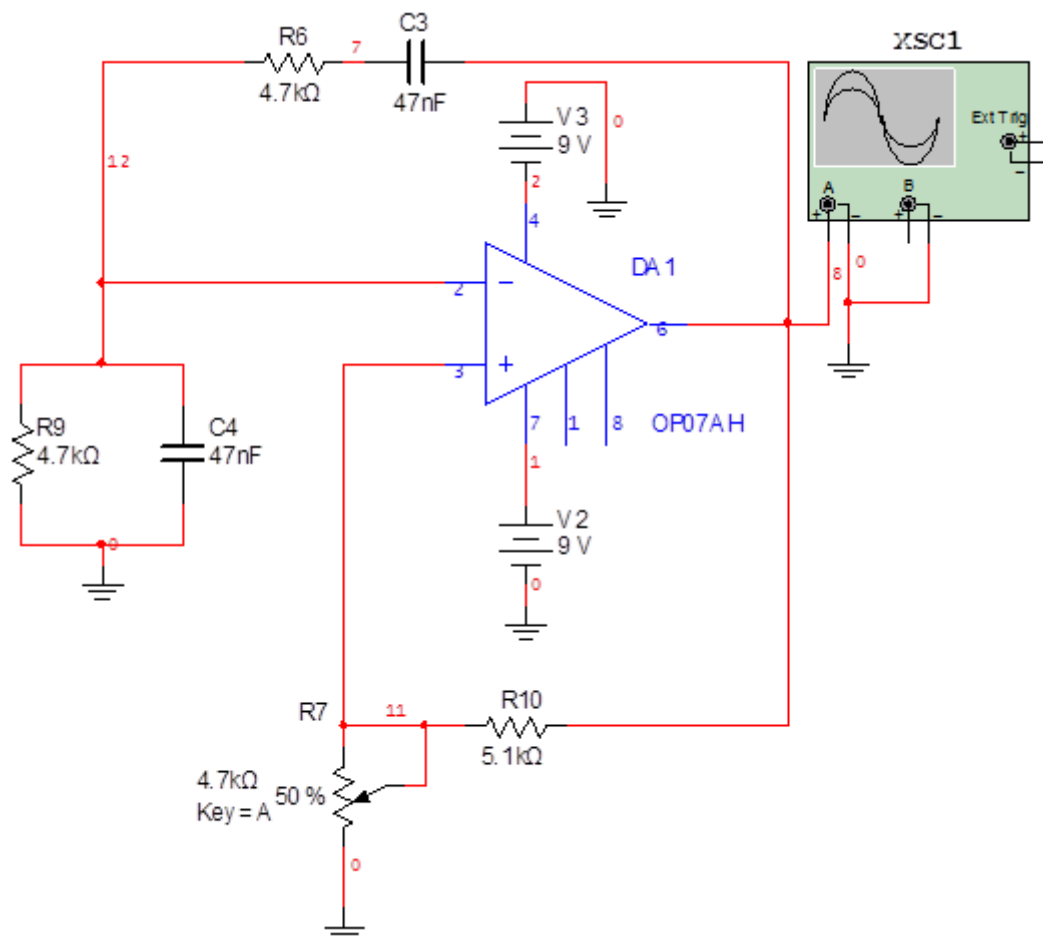


Рис. 4.99. Автогенератор синусоидальных колебаний с цепью Вина

Далее проделайте аналогичные действия с частотным анализом, а затем соберите схему автогенератора (рис. 4.99) и включите осциллограф. Почему генератор заработал? Попробуйте уменьшить искажения в выходном сигнале. Что при этом получается?

Снова вернитесь к схеме на рис. 4.98, но положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R7$ было равно чуть меньше одной четверти сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 5.

Прodelайте аналогичные действия, как в предыдущих пунктах. Сформулируйте выводы по выполненному разделу.

3.2.2. Определение стационарной амплитуды колебаний автогенератора

Соберите схему, изображенную на рис. 4.100. Положение движка потенциометра поставьте так, чтобы его сопротивление $R7$ было чуть-чуть меньше половины сопротивления $R10$, т. е. коэффициент усиления неинвертирующего усилителя был бы немного больше 3.

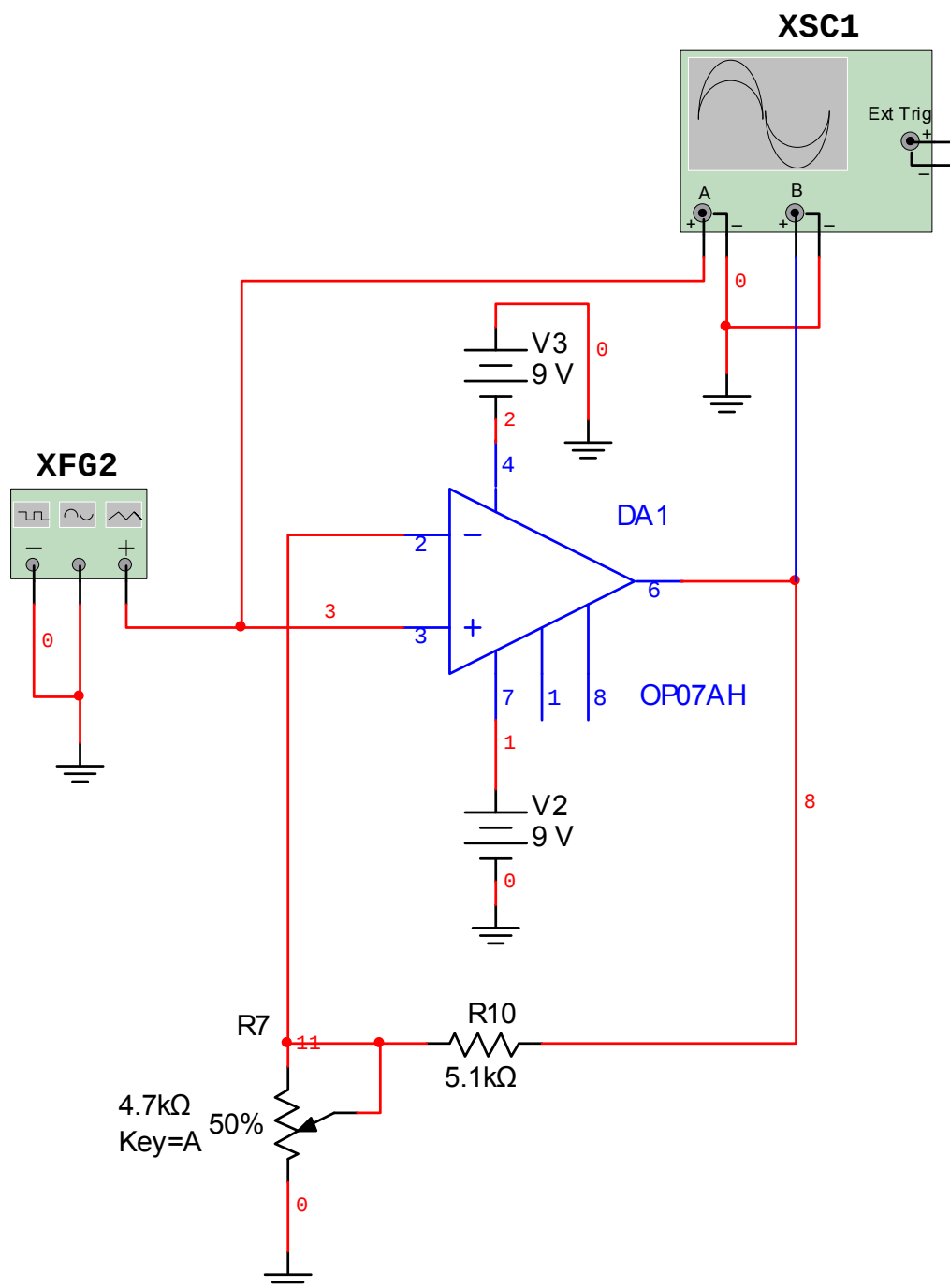


Рис. 4.100. Схема для снятия колебательной характеристики неинвертирующего усилителя автогенератора

Установите на генераторе частоту гармонического сигнала, равную (близкую к) частоте «квазирезонанса» цепи Вина. Входы обоих каналов осциллографа закройте, т. е. переведите в режим АС.

Получите данные исследуемой характеристики, изменяя амплитуду входного напряжения генератора от 0,2 до 2,4 В через 0,2 В.

Для каждого уровня входного напряжения регистрируйте действующее значение входного и выходного напряжений, используя измерители осциллографа, а затем рассчитывайте коэффициент усиления как отношение полученных значений. Разработайте вид таблицы, внесите в нее данные, а потом по ним постройте график.

Определите по колебательной характеристике действующее значение выходного напряжения, используя линию положительной обратной связи, которая определяется коэффициентом передачи цепи Вина на частоте «квазирезонанса».

Переберите схему, замкнув цепь положительной обратной связи, т. е. соберите схему автогенератора, изображенную на рис. 4.99. Для наблюдения и измерения действующего значения выходного напряжения используйте осциллограф в режиме АС. Сравните значения выходного напряжения, полученные в этом и предыдущем пунктах. Сделайте выводы.

Лабораторная работа № 5.2

Автогенераторы прямоугольных колебаний на операционных усилителях

4.3. Импульсный автогенератор

4.3.1. Исследование работы схемы компаратора с гистерезисом

Соберите схему компаратора, изображенную на рис. 4.101.

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора.

Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Полученные данные занесите в разработанную Вами таблицу. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

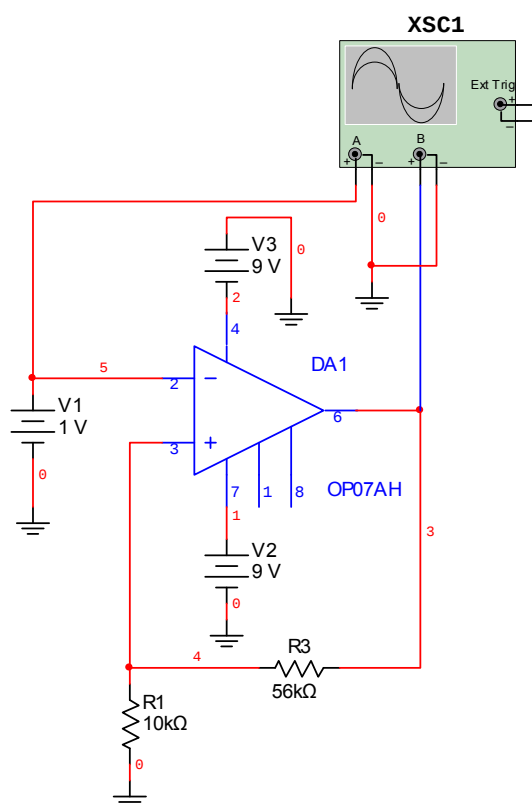


Рис. 4.101. Компаратор напряжений и схема исследования его гистерезисной амплитудной характеристики

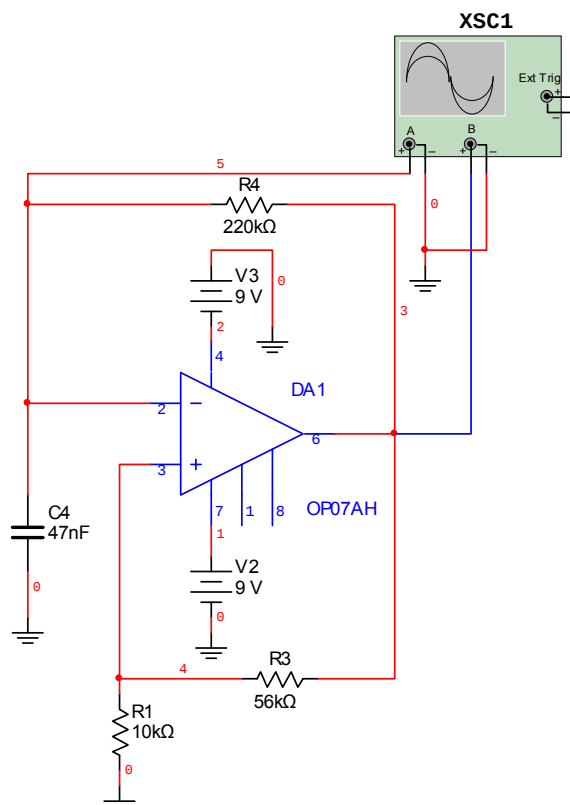


Рис. 4.102. Схема импульсного автогенератора

Установите значение источника постоянного напряжения V1 равным 0 В и зафиксируйте значение выходного напряжения компаратора.

Проведите эксперимент, чтобы снять амплитудную характеристику усилителя. Измерение значений входного и выходного напряжений осуществляйте, используя курсоры осциллографа. Полученные данные занесите в разработанную Вами таблицу. Определите напряжения срабатывания компаратора и рассчитайте ширину зоны гистерезиса.

4.3.2. Исследование процессов в автогенераторе

Соберите схему генератора, изображенную на рис. 4.102.

Получите временные диаграммы и поясните их ход. Определите по диаграммам значения опорных напряжений компаратора и параметры выходного напряжения.

4.3.3. Исследование схем с изменением параметров импульсов

Для схемы автогенератора (рис. 4.103, а) рассчитайте длительность импульса и период импульсов при подключении цепи с диодом VD5.

Соберите схему такого импульсного генератора и с помощью осциллографа исследуйте временные диаграммы сигналов. Сравните полученные параметры импульсов с расчетными данными.

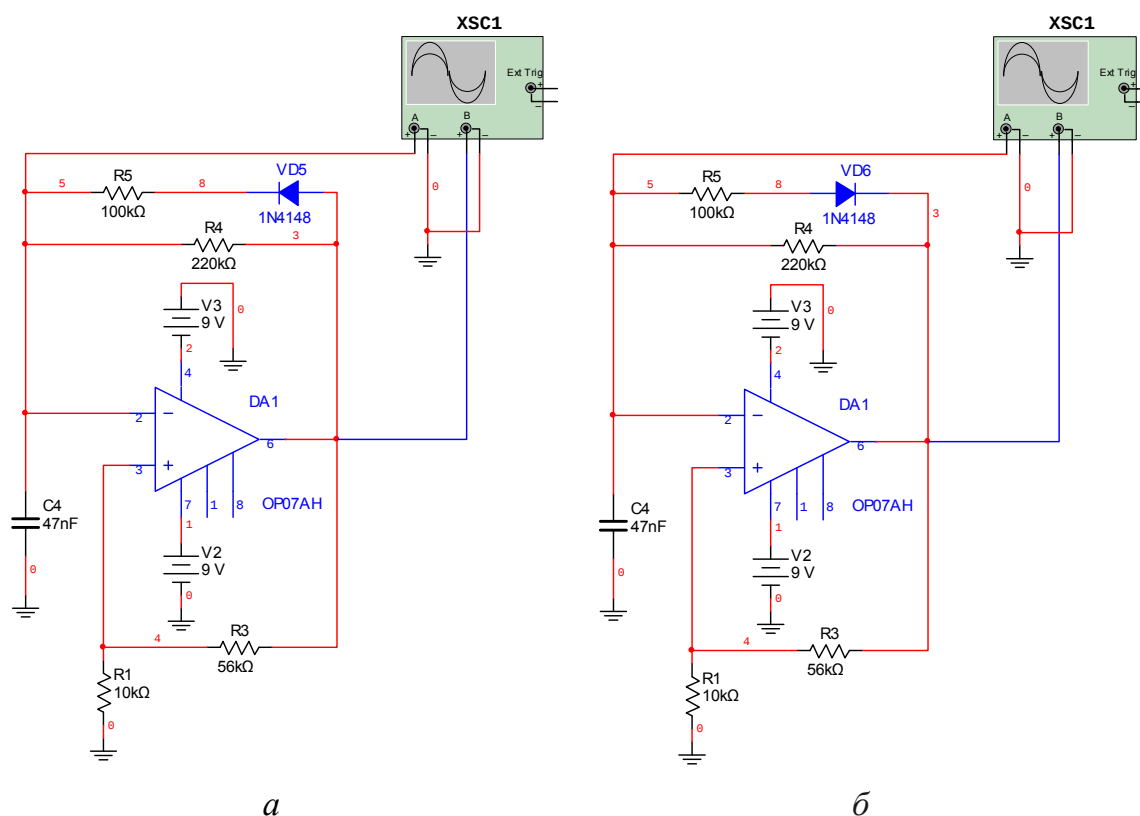


Рис. 4.103. Импульсный автогенератор с возможной регулировкой постоянной времени RC-цепи

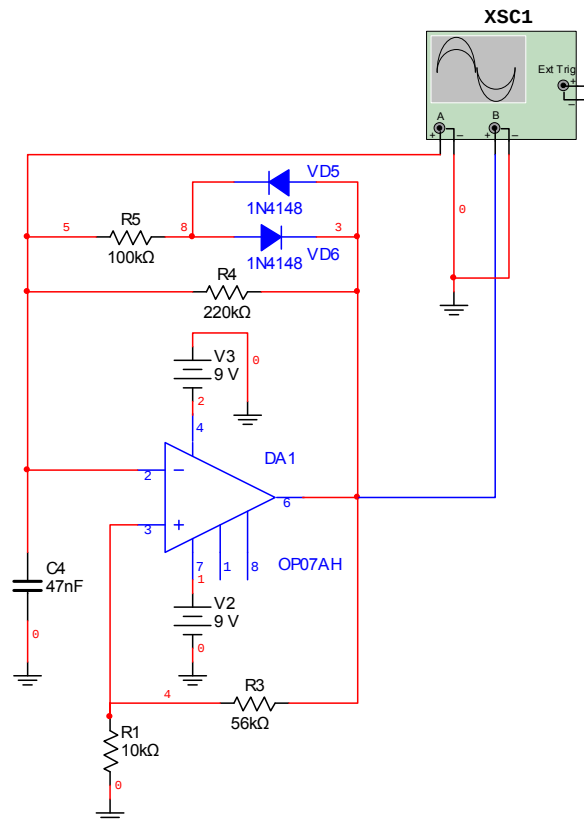


Рис. 4.104. Импульсный автогенератор с возможной регулировкой постоянной времени RC цепи

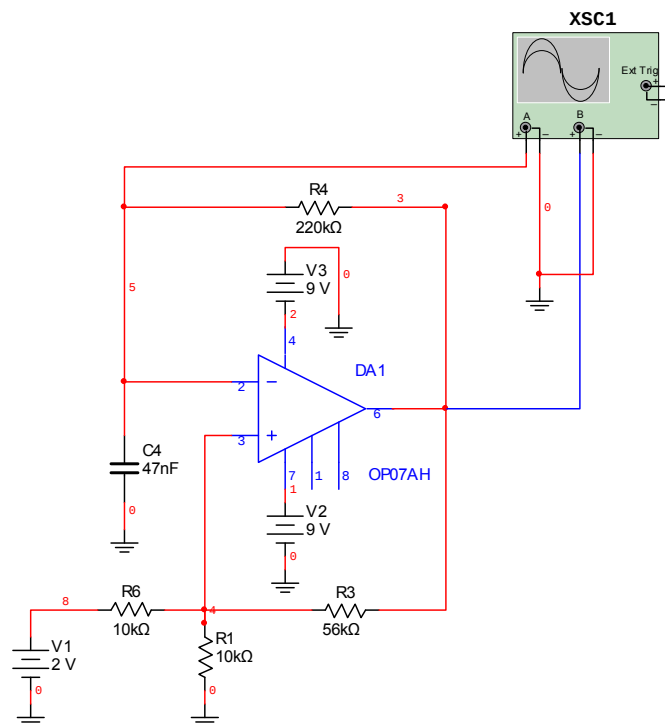


Рис. 4.105. Импульсный автогенератор с регулировкой опорного напряжения компаратора

Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 4.103, б, рассчитайте длительность паузы и период импульсов при подключении цепи с диодом $VD6$.

Соберите схему такого импульсного генератора и с помощью осциллографа исследуйте временные диаграммы сигналов. Сравните полученные параметры импульсов с расчетными данными.

Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 4.104, рассчитайте частоту следования импульсов, если одновременно включены обе цепи с диодами $VD5$ и $VD6$. Соберите схему такого импульсного генератора и, используя временные диаграммы, рассчитайте частоту следования импульсов и сравните их с теоретическим значением.

Для схемы автогенератора, изображенной на рис. 4.105, рассчитайте параметры импульсов при выбранном Вами значении источника постоянного напряжения $V1$.

Соберите схему такого импульсного генератора и, используя временные диаграммы, рассчитайте параметры импульсов и сравните их с теоретическим значением.

Пронаблюдайте, как изменяются временные диаграммы сигналов и параметры импульсов при изменении напряжения источника $V1$.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ. РАБОТА В EXCEL

При желании результаты измерений, полученные в ходе выполнения лабораторной работы, можно визуализировать в виде графических зависимостей, например, в Microsoft Office Excel.

Для работы в Excel:

1. Вызовите Excel – Пуск→Все программы→Microsoft Office→Microsoft Office Excel.
2. Откройте сохраненные данные, при необходимости преобразуйте их в таблицу – Файл→Открыть (вызываем необходимый файл).
3. Создайте диаграмму/график – Вставка→Диаграмма. В Мастере диаграмм (рис. 5.1) выбираем график. Вид графика выбираем наиболее подходящий под конкретный случай.

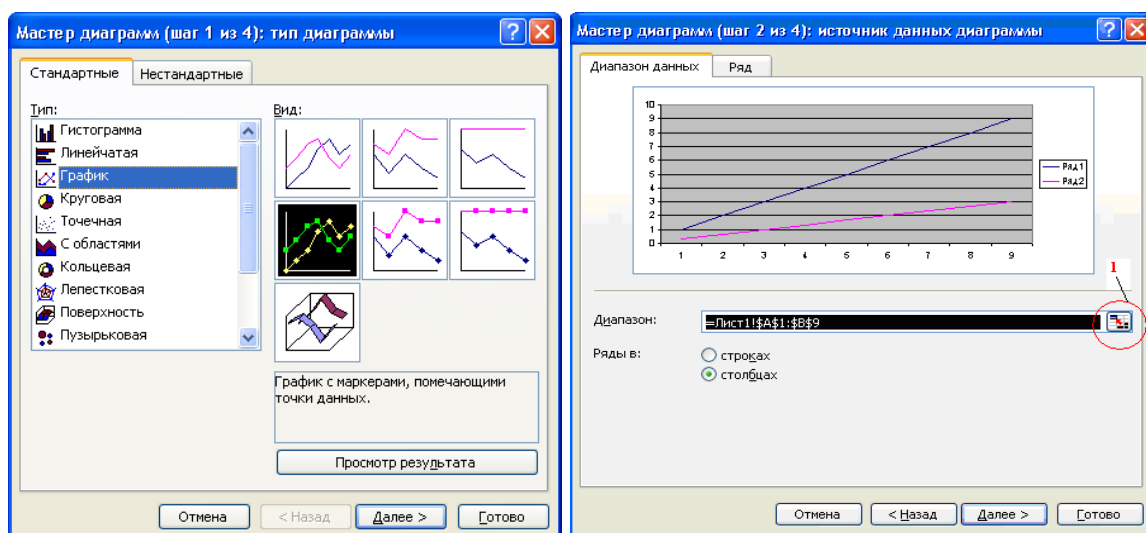


Рис. 5.1. Мастер диаграмм – шаг 1

4. Нажмите кнопку «далее» и задайте диапазон данных, которые необходимо вывести в виде графика. Для этого нажмите кнопку 1. После выделите мышкой данные в таблице – диапазон данных будет отображен в окне на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Исходные данные

Закройте это окно обычным нажатием на крестик.

5. Задайте необходимые надписи и другие функции (при необходимости), рис. 5.3.

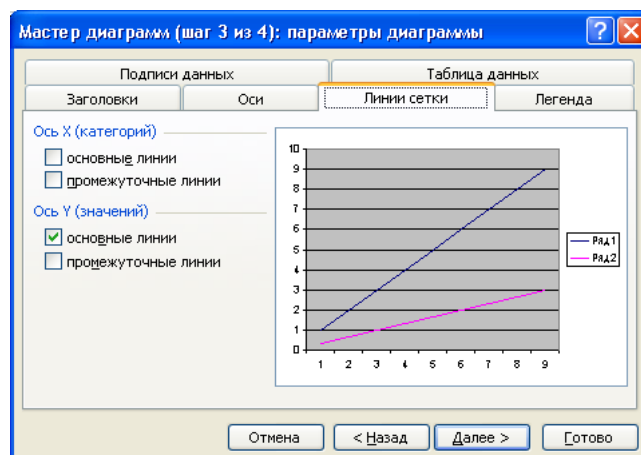


Рис. 5.3. Мастер диаграмм – шаг 3

6. Если требуется разместить диаграмму и присвоить ей название – выполните шаг 4 (рис. 5.4). После этого нажмите кнопку «Готово». Результатом будет график, изображенный на рис. 5.5.

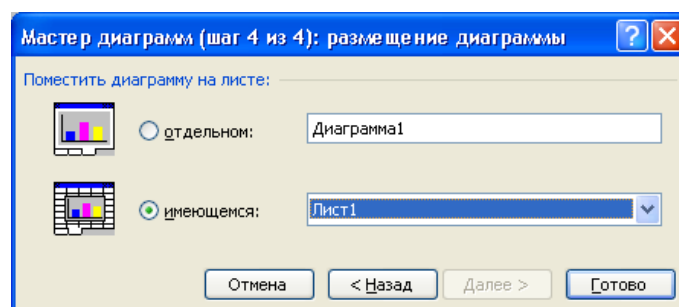


Рис. 5.4. Мастер диаграмм – шаг 4

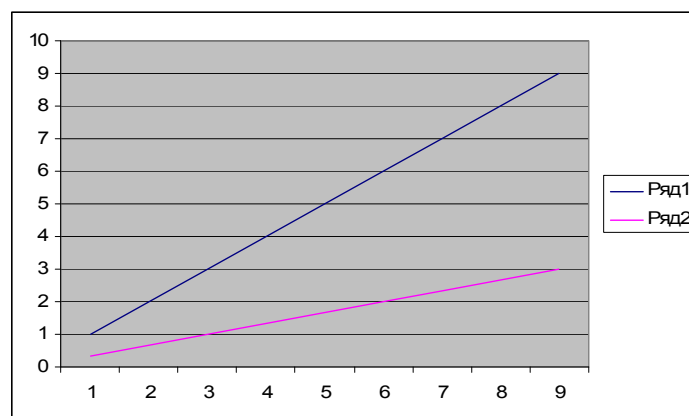
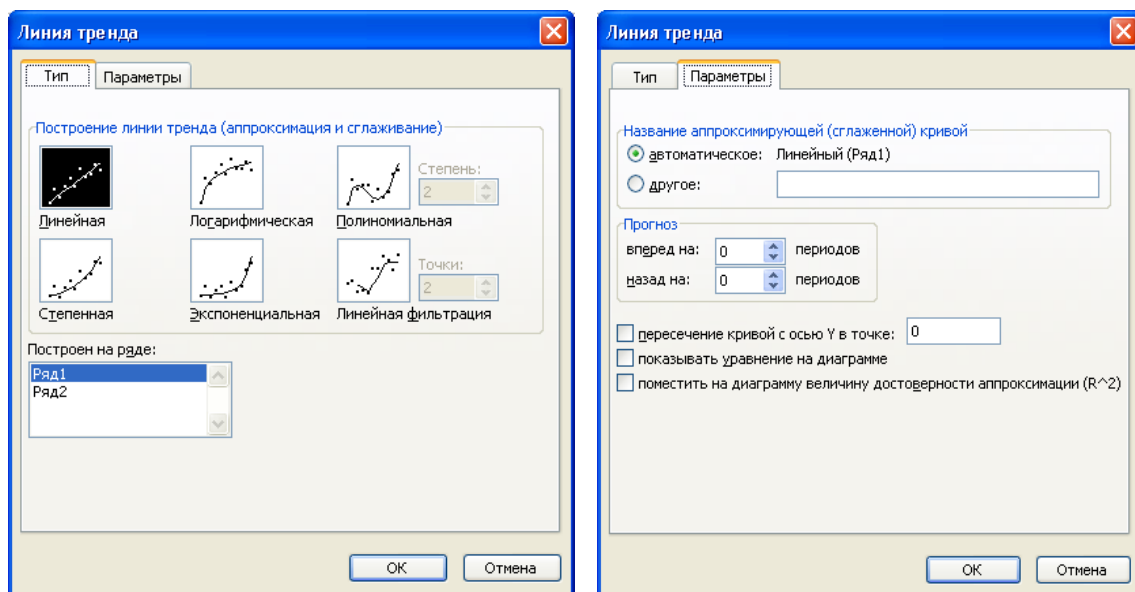


Рис. 5.5. График, созданный в Excel

7. При необходимости аппроксимировать данные на графике, в Excel вызовите линию тренда (рис. 5.6, а). Для этого на линии, которую требуется обработать, кликните правой кнопкой мыши и в появившемся окне выберите «Добавить линию тренда».



а)

б)

Рис. 5.6. Линия тренда: а) аппроксимация и сглаживание графика; б) параметры

Можно задать параметры для линии тренда, рис. 5.6, б.

После нажимайте кнопку «ОК» и проверяйте, подходит ли выбранная аппроксимирующая линия или следует выбрать другую; для этого повторите действия пункта 7.

Список литературы

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1991. – 652 с.
2. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Прянишников В.А. Электроника. – СПб.: Корона принт, 1998.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 521 с.
5. Хоровиц Г., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х т. / Пер. с англ. – М., 1993.
6. Рыбин Ю.К. Электронные устройства. – Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2003. – 264 с.
7. Фомичев Ю.М. Электроника. Элементная база, аналоговые и цифровые функциональные устройства: учеб. пособие / Ю.М. Фомичев, В.М. Сергеев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 288 с.
8. Бакалов В.П. Теория электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1998.
9. Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS II. Технические средства. – Руководство пользователя.
10. Сайт компании National Instruments [Электронный ресурс]. – URL: www.ni.com (дата обращения: 2.08.2013).

Учебное издание

ЦИМБАЛИСТ Эдвард Ильич
БАРАНОВ Павел Фёдорович
СИЛУШКИН Станислав Владимирович
ФОМИЧЕВ Юрий Михайлович

ЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АНАЛОГОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СРЕДЕ NI ELVIS II

Учебное пособие

Научный редактор *доктор технических наук,
профессор В.Н. Борилов*

Выпускающий редактор *Д.В. Заремба*

Редактор *В.Ю. Пановица*

Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*

Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 22.11.2013. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 17,56. Уч.-изд. л. 15,89.

Заказ 1311-13. Тираж 100 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru