

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Лабораторный практикум в облачной среде
схемотехнического проектирования

TINACloud



В. А. Алехин

В. А. Алехин

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

**Лабораторный практикум в облачной среде
схемотехнического проектирования
TINACloud**

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом Московского
технологического университета (МИРЭА) в качестве учебного пособия для
студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям
подготовки 27.03.04 – «Управление в технических системах»,
15.03.06 – «Мехатроника и робототехника», 09.03.01 – «Информатика
и вычислительная техника»*

**Москва
Горячая линия – Телеком
2017**

УДК 621.3.01+621.38

ББК 31.21+32.85

A49

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. Л. Белов; доктор техн. наук, профессор Л. А. Потапов

Алехин В. А.

A49 Электротехника, электроника и схемотехника. Лабораторный практикум в облачной среде схемотехнического проектирования TINACloud. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 216 с.: ил.
ISBN 978-5-9912-0631-0.

Изложены основные разделы дисциплины «Электротехника, электроника и схемотехника». Приведено описание четырнадцати лабораторных работ. Каждая работа сопровождается теоретическим материалом в форме конспективного изложения основных разделов лекций, примерами расчетов и моделирования электрических цепей и электронных схем, расчетными домашними заданиями по обработке экспериментальных результатов. Компьютерный лабораторный практикум построен на базе новой облачной среды схемотехнического проектирования TINACloud компании DesignSoft, подключение пользователя к которой происходит через Интернет в любом месте и в любое время без установки программы на собственном устройстве с использованием как настольного компьютера, так и различных мобильных устройств (ноутбуков, планшетов, смартфонов). Практикум предназначен для формирования навыков, умений и компетенций в расчетах и экспериментальных исследованиях электрических цепей и электронных схем. Пособие может быть использовано как при традиционных, так и дистанционных технологиях обучения студентов.

Для студентов, обучающихся по направлениям 27.03.04.62 – «Управление в технических системах», 15.03.06 – «Мехатроника и робототехника», 09.03.01 – «Информатика и вычислительная техника», изучающих дисциплины «Электротехника», «Электроника», «Электротехника, электроника и схемотехника».

ББК 31.21+32.85

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

Алехин Владимир Александрович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ В ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ TINACLOUD

Учебное пособие для вузов

Редактор Ю. Н. Чернышов

Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова

Обложка художника О. В. Карповой

Подписано в печать 02.12.2016. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 13.5. Тираж 500 экз. Изд. №160631
ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия–Телеком»

ISBN 978-5-9912-0631-0

© В. А. Алехин, 2017

© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2017

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Облачная технология TINACloud в электротехническом образовании

Изучение электротехники и электроники в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами предусматривает практическое освоение студентами экспериментальных методов исследования электрических цепей и электронных схем, формирование компетенций, умений и навыков расчёта электрических цепей и электронных схем.

В Московском технологическом университете (МИРЭА) был создан и в течение нескольких лет успешно используется компьютерный лабораторный практикум в программной среде TINA [1]. Эта программная среда разработана компанией DesignSoft и предоставляет весьма широкие возможности для анализа и проектирования электрических цепей и разнообразных электронных схем. Используя производительный, мощный и доступный инструмент моделирования схем, можно анализировать и проектировать аналоговые, цифровые, микропроцессорные и смешанные электронные схемы, включая схемы импульсных источников питания, радиочастотные, коммуникационные и оптоэлектронные схемы. TINA включает в себя все основные языки описания аналоговых, цифровых и смешанных электронных устройств (VHDL, Verilog, Verilog-A и Verilog AMS). Это позволяет испытывать сложные модели в различных условиях работы.

Большим достоинством этой программной среды стала возможность применять в учебном процессе упрощённую бесплатную версию TINA-TI, которой вполне достаточно для знакомства с программой и исследования электрических цепей и аналоговых электронных схем. С использованием моделирования в программе TINA-TI в МИРЭА издано несколько мультимедийных электронных учебников, в которых теоретический материал наглядно иллюстрирован моделированием схем и устройств [2, 3]. Студенты получают домашнюю электронную лабораторию и могут глубже изучить работу электронных устройств на вполне точных моделях.

В последние годы широкое внедрение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) приводит к появлению новых систем обучения. Развитые ранее преимущественно для открытого и

дистанционного образования (ОДО) мобильные обучающие системы (МОС) в последние годы стали активно использоваться и в очном обучении. МОС использует современные мобильные беспроводные устройства и высокоскоростной интернет.

Обучение становится своевременным, достаточным и персонализированным («just-in-time, just enough, and just-for-me»). На первое место выходят такие дидактические принципы, как мультимедийность, структурированность или модульность, интерактивность, доступность.

Для мобильного обучения компания DesignSoft предлагает новый программный продукт TINACloud [4], позволяющий выполнять виртуальные исследования и лабораторные практикумы по электротехнике, электронике и микропроцессорной технике на ноутбуках, планшетах и других мобильных устройствах в любое время и в любом месте. TINACloud использует облачные интернет-технологии и может запускаться через браузер в любом месте мира без установки программы в компьютере. Этот сервис предлагает множество образовательных ресурсов и позволяет TINACloud по своим возможностям практически не уступает последней версии обычной программы TINA-10, но по стоимости лицензии значительно дешевле. Так, цена студенческой лицензии на один год составляет сейчас 12 евро. Оплату можно сделать на сайте TINACloud.

Преподаватели смогут оценить возможности облачной среды в мобильном и дистанционном обучении.

TINACloud работает на большинстве операционных систем в компьютерах, а также на планшетах, на большинстве смартфонов, умных телевизорах и электронных книгах. TINACloud можно использовать в классе, дома, в любой точке мира, где есть Интернет.

Облачная среда TINACloud предоставляет услугу, называемую Software as a Service (SaaS), и предполагает доступ к приложениям как к сервису, т. е. приложения провайдера запускаются в облаке и предоставляются пользователям по требованию как услуги. Другими словами, пользователь может получать доступ к ПО, развёрнутому на удалённых серверах компании DesignSoft, посредством Интернета, причём все вопросы обновления и лицензий на данное ПО регулируются поставщиком данной услуги. Потребитель при этом не управляет базовой инфраструктурой облака, в том числе сетями, серверами, операционными системами. На конечном пользователе лежит ответственность только за сохранность параметров доступа (логинов, паролей и т. д.) и выполнение рекомендаций провайдера по безопасным настройкам приложений.

На сервере DesignSoft работает высокопроизводительный много-ядерный движок. Каждый год электронные схемы становятся быстрее и более сложными и, следовательно, требуют больше вычислительной мощности для анализа их работы. Для выполнения этих требований TINACloud имеет возможность использовать набирающие популярность многопоточные процессоры, так что время исполнения TINACloud будет до 20 раз быстрее по сравнению с TINA-8 и более ранними версиями. Конечно, полностью реализовать возможности TINACloud можно с высокоскоростным Интернетом.

Открыв TINACloud через Интернет, можно создать любую схему или загрузить готовую с сервера, выполнить более 20 режимов моделирования и получить результаты в окне диаграмм или в интерактивном режиме. TINACloud имеет уникальные образовательные инструменты для проверки знаний студентов. Преподаватель может создать тесты с несколькими вариантами ответов, решением проблем или задачами по устранению неисправностей и дистанционно контролировать и оценивать результаты.

В мультимедийном образовательном процессе TINACloud предоставляет преподавателю возможность с любого компьютера, подключённого к Интернету, проводить презентации моделирования процессов в электронных схемах.

Компания DesignSoft предоставила нам возможность бесплатной работы в TINACloud для создания нового лабораторного практикума на основе изданного ранее [1]. В этой работе участвовали студенты МИРЭА Г.В. Волосных, Д.А. Бондарев, А.О. Бебик, К.С. Салов. Результаты выполненной работы докладывались на конференциях [5–7].

Учебное пособие содержит 15 лабораторных работ по электрическим цепям, аналоговой и цифровой электронике и соответствует содержанию дисциплины «Электротехника, электроника и схемотехника» для направлений подготовки бакалавров: «Управление в технических системах» (27.03.04), «Информатика и вычислительная техника» (09.03.01), «Мехатроника и робототехника» (15.03.06), «Радиотехника» (11.03.01), «Конструирование и технология электронных средств» (11.03.03).

В.2. Указания по выполнению и защите лабораторных работ

1. Лабораторные работы проводятся на компьютерах, имеющих доступ к Интернету. Студенты могут пользоваться своими ноутбуками и планшетами.

2. Перед выполнением каждой лабораторной работы студенту следует заранее изучить рекомендованный к данной теме теоретический материал, выполнить предварительные расчётные и контрольные задания, предшествующие лабораторному заданию, ознакомиться с содержанием лабораторного задания, продумать ответы на вопросы для самопроверки, подготовить в компьютере файл протокола (в формате .docx) для регистрации результатов экспериментов и скриншотов схем.

3. Лабораторные работы выполняются отдельными бригадами из двух-трёх человек. Бригада оформляет на занятии один протокол.

4. В начале лабораторной работы преподаватель проводит опрос студентов, проверяет выполнение расчётных и контрольных заданий, наличие протоколов и готовность к работе.

5. При компьютерном моделировании экспериментальные данные следует вносить в файл протокола. Можно делать скриншоты схем и графиков.

6. Работа считается выполненной после утверждения преподавателем протокола бригады.

7. Для защиты лабораторной работы каждый студент по каждой работе составляет в электронной и печатной форме индивидуальный отчёт, который должен содержать:

- предварительные расчётные и контрольные задания;
- схемы исследованных электрических цепей;
- результаты исследований (в виде таблиц, графиков);
- итоговое расчётное задание;
- выводы по работе.

8. Работа считается защищённой после собеседования, утверждения индивидуального отчёта преподавателем и решения контрольного задания по работе.

В.3. Основные сведения о программе TINACloud

В.3.1. Общая характеристика среды

TINA Design Suite является мощным доступным пакетом программного обеспечения для анализа, проектирования и тестирования в режиме реального времени схем с аналоговыми, цифровыми компонентами, микроконтроллерами и компонентами, определёнными в описаниях HDL (Hardware Description Languages), а также для проектирования печатных плат макетов схем. Можно также проанализировать радиочастотные схемы, коммуникации связи, оптоэ-

лектронные схемы и механические приложения с 3D-интерфейсом. TINA представляет собой приложение для Windows, которую вы должны установить на вашем компьютере или на сервере локальной сети.

В этом учебном пособии использована онлайн-версия TINA, которая называется TINACloud и является прекрасным инструментом для дистанционного образования. В учебном процессе программа имеет уникальные инструменты для дистанционного моделирования электронных устройств, тестирования знаний студентов, мониторинга прогресса обучения и внедрения в учебный процесс методов поиска и устранения неисправностей. С помощью дополнительных аппаратных средств TINACloud может использоваться для тестирования реальных схем и сравнения с результатами, полученными при моделировании. Большое значение для преподавателей имеют также инструменты, необходимые для подготовки образовательных материалов.

Рассмотрим подробнее наиболее важные особенности TINACloud.

В.3.2. Требования к аппаратным и программным средствам для работы с TINACloud

Полезной особенностью TINACloud является то, что среда работает на всех широко известных платформах, включая аппаратные средства и операционные системы. Общие требования в том, чтобы все платформы имели доступ в Интернет и совместимый браузер.

На настольных компьютерах и ноутбуках можно работать с Microsoft Windows XP / Vista / Windows 7/8 и браузерами IE 9, Chrome 34.0, Firefox 29.0 или более поздними версиями.

Для Mac-компьютеров и ноутбуков подходят OS X, Safari, Chrome.

Для Linux-компьютеров и ноутбуков требуется Chrome или Firefox.

Для планшетов и айфонов iOS Apple iPad требуется ОС IOS 5.x, 6.x, 7.x, а также Safari, Chrome.

Для Android-планшетов, ридеров, смартфонов и смарт-телевизоров требуются ОС Android 2.x, 3.x, 4.x, а также Chrome, Firefox.

Для Windows Phone нужна ОС Windows Phone 8, IE 11 или более поздней версии.

Вторая полезная особенность TINACloud состоит в том, что она не требует установки. После того как Вы получите ваши учётные данные (имя пользователя и пароль) и установите хорошее соеди-

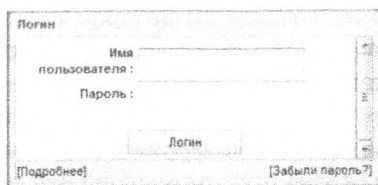


Рис. В.1. Окно аутентификации

нение с Интернетом, Вам просто необходимо авторизоваться на сайте и можно сразу начать работать.

Введите Ваше имя и пароль в окне аутентификации (рис. В.1), и TINACloud откроет приветственную страницу (рис. В.2).

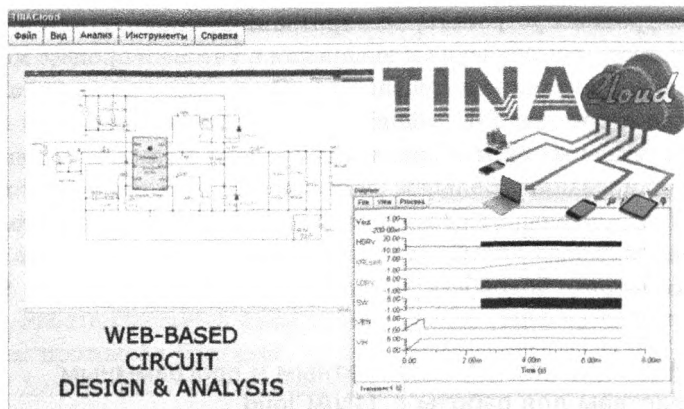


Рис. В.2. Приветственная страница


В.3.3. Интерфейс программы

Большим достоинством программы TINACloud является многоязычный интерфейс с хорошим переводом. Мы используем русскоязычную версию.

Следующим шагом Вы можете в меню *Файл* открыть проводник и загрузить свою готовую схему или схему из многочисленных примеров. Если выбрать *Новый*, откроется схемный редактор (рис. В.3), в котором можно собрать новую схему.

Схемный редактор имеет большой набор разнообразных электронных компонентов (рис. В.4). Группы компонентов открываются кнопками меню. Каждый компонент (например, транзистор) содержит библиотеку моделей, выпускаемых разными фирмами.

Рассмотрим панель инструментов схемного редактора. Слева установлены привычные для редактирования кнопки: *новый*, *отменить*, *повторить*, *вырезать*, *копировать*, *вставить*, *удалить*, *повернуть влево*, *повернуть вправо*, *отразить* (рис. В.5).

Следующая кнопка  *редактор свойств* открывает для выделенного компонента окно редактирования параметров (рис. В.6).

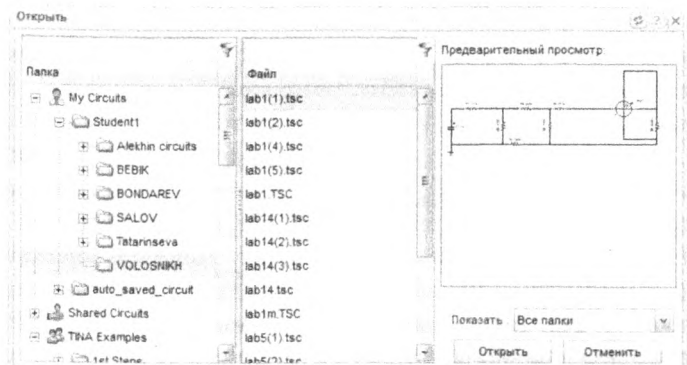


Рис. В.3. Окно проводника

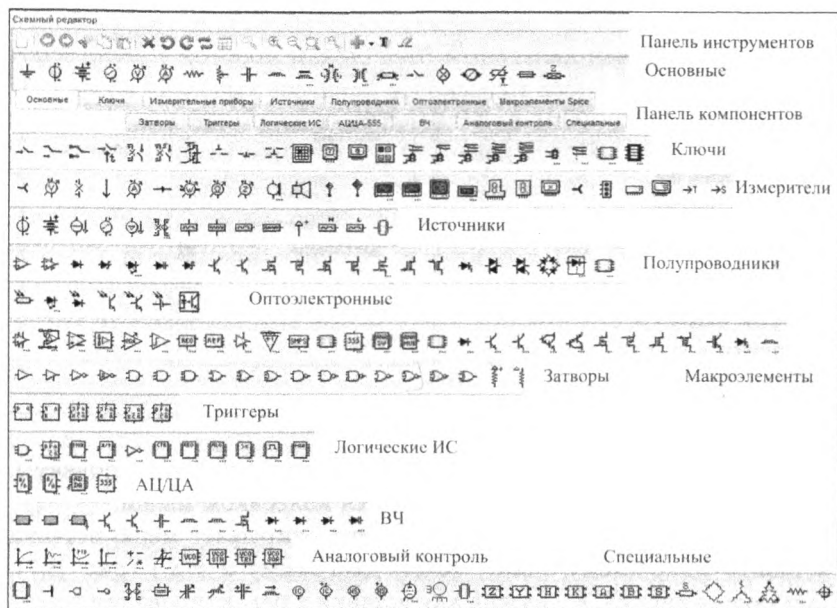


Рис. В.4. Наборы компонентов схемного редактора

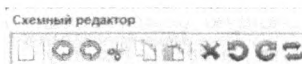



Рис. В.5. Кнопки редактирования

Кнопка  *множественный выбор* позволяет выделить и совместно перемещать по рабочему полю несколько компонентов.

Кнопки  увеличивают или уменьшают масштаб,

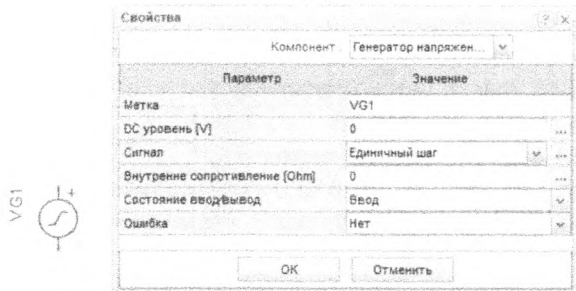


Рис. В.6. Открытие окна редактора свойств

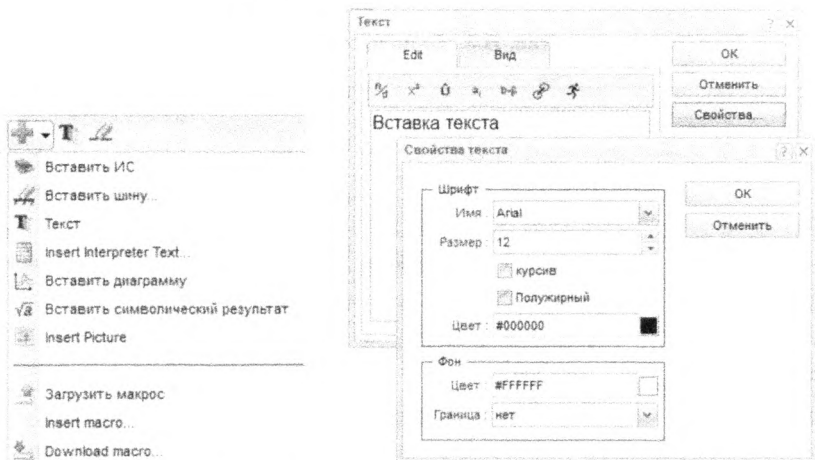





Рис. В.7. Меню вставки

Рис. В.8. Вставка текста


увеличивают окно наблюдения и показывают сразу все компоненты. Масштаб изображения легко изменяется колёсиком мыши.

Следующая кнопка  *вставить* открывает меню вставки (вставить микросхему, шину, текст, диаграмму и т.д.) (рис. В.7). Следующая кнопка  нужна для вставки и редактирования текста (рис. В.8).

И, наконец, последняя кнопка  позволяет нарисовать провод или шину, соединяющую компоненты. Для рисования шины сначала надо нажать Ctrl, а затем кнопку.

В.3.4. Размещение компонентов

Компоненты выбирают из строки компонентов редактора схем. Их символы перемещают с помощью мыши в требуемое положение. При нажатии на левую кнопку мыши программа устанавливает контакты символа компонента на ближайшей точке сетки точек. Ком-

поненты могут быть расположены вертикально или горизонтально, их можно поворачивать с шагом в 90 градусов с помощью кнопок . Кроме того, некоторые компоненты (например, транзисторы) можно зеркально отобразить вокруг их вертикальной оси, нажав кнопку на панели инструментов.

На сенсорных экранах при размещении компонентов коснитесь символа компонента на панели инструментов. Затем нажмите приблизительное местоположение на поверхности редактирования, чтобы поместить туда символ. Компонент будет помещён в область редактирования. После этого Вы можете коснуться и перетащить символ на окончательное место с помощью пальца или с помощью позиционирующего устройства, если оно имеется.

После того как символ компонента был выбран и позиционирован, Вы можете дважды щёлкнуть на нем, чтобы включить диалоговое окно, в котором можно ввести значения параметров и метки. При вводе числовых значений используют аббревиатуры дольных и кратных величин в пределах от 10^{-12} до 10^{12} :


p = пико = 10^{-12} ;	T = тера = 10^{12} ;
n = нано = 10^{-9} ;	G = гига = 10^9 ;
u = микро = 10^{-6} ;	M = мега = 10^6 ;
m = милли = 10^{-3} ;	k = кило = 10^3 .

В.3.5. Соединение компонентов

Провод устанавливает простую переключку (нулевое омическое соединение) между двумя контактами компонента. Для того чтобы поместить провод, переместите курсор к контактной точке компонента, откуда Вы хотите начать проводник. Курсор превратится в крестик. Вы можете нарисовать провод двумя различными способами:

1. Выберите начальную точку провода левой кнопкой мыши, а затем переместите крестик с помощью мыши до контакта другого компонента. TINACloud рисует провод вдоль пути перемещения. Двигаться можно в любом направлении, и провод будет отслеживать путь с прямоугольными поворотами. В конечной точке провода снова нажмите левую кнопку мыши.

2. Можно, удерживая нажатой левую кнопку мыши, провести крест до конечного контакта и отпустить кнопку в конечной точке. Протягивая провод, можно удалить предыдущие участки, перемещая крест назад по той же дорожке. При нажатии на клавиши Ctrl+C, Ctrl+V можно копировать и вставлять участки проводников. После небольшой тренировки Вы научитесь это делать.

Для коротких сечений проводов, возможно, потребуется удерживать клавишу переключения во время рисования. Можно также вызвать инструмент рисования провода или шины  и начать рисовать провод в любом месте, нажав левую кнопку мыши. Когда Вы завершили подключение, используйте в всплывающем меню *отменить* или нажмите правую кнопку мыши. Правая кнопка или клавиша Esc прекратит режим проводки. Будьте уверены, чтобы Вы не оставили никаких не подключённых контактов. Если есть несвязанные компоненты или терминалы, TINACloud проверит электрические правила соединения (ERC) и выдаст предупреждение. Проводники с помощью инструмента Wire всегда расположены вертикально или горизонтально. Тем не менее, из панели специальных компонентов вы можете добавить угловые сегменты проводов с помощью компонент, изготовленных для мостов, схем треугольников и звёзд.

В.3.6. Входы и выходы

Некоторые виды анализа (переходные характеристики на постоянном токе, Воде-диаграммы и т. д.) не могут выполняться, пока не определены входы и выходы цепи. Они определяют, где прилагается воздействие и откуда снимать реакцию цепи. Выходы также определяют, какие графики будут отображаться в выбранном режиме анализа. Источники и генераторы должны быть подключены к входам, а измерители — к выходам. Однако измерители могут также служить для определения количественного значения входных сигналов, которые будут использоваться при вычислении переходных характеристик и функций в режиме переменного тока.

В.3.7. Основные режимы работы TINACloud

Возможности и достоинства TINACloud мало уступают последней версии программы TINA-10 и состоят в следующем.

1. Результаты на постоянном и переменном токе легко получаются в виде таблиц напряжения в узлах, на всех элементах, таблиц токов во всех элементах, таблиц других напряжений. Причём на переменном токе вычисляются амплитуды и фазы.

2. Во всех узлах можно измерить напряжения специальным щупом.

3. Программа TINACloud имеет режим многовариантного анализа (*Шаг параметра*), в котором значение параметров выбранных компонентов варьируется на каждом шаге вычислений. В результате вычисляется и строится набор графиков, который иллюстрирует чувствительность цепи к изменению параметров компонентов. Из-

меняемое значение параметра компонента может быть любым численным параметром.

4. Легко получаются амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики цепей. Анализ передаточных характеристик позволяет в режиме *Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока* получить АЧХ и ФЧХ, а также, используя *Символический анализ*, получить аналитическое выражение передаточной функции.

5. Удобно исследовать переходные характеристики цепей и получать их в виде графиков. Выбрав в главном меню *Анализ — Переходной процесс*, можно провести анализ переходных характеристик, регистрировать графики и получить в редакторе уравнений аналитическое выражение отклика.

6. *Фурье-анализ* вычисляет спектры сложных сигналов и рисует их на диаграммах.

7. Передаточные функции и переходные характеристики можно получить в виде аналитических выражений в режиме *Символический анализ*.

8. Предусмотрен режим *Оптимизация*, позволяющий выбрать оптимальные параметры цепи для достижения поставленной цели. Целевой отклик цепи (напряжение, ток, сопротивление или мощность) должны наблюдаться измерителями, предварительно установленными на нужных позициях. Неизвестные параметры цепи будут определены автоматически тогда, когда цепь выдаст целевой выходной результат.

9. TINACloud включает в себя очень быстрый и мощный симулятор для цифровых схем. В режиме *Цифровой интерактивный анализ* можно следить за операциями в цепи шаг за шагом, вперёд и назад или наблюдать полную временную диаграмму в специальном окне логического анализатора.

10. TINACloud включает интегрированный VHDL-симулятор для проверки VHDL-устройств (спроектированных с помощью высокоуровневого языка описания аппаратуры *Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*) как в цифровых, так и в аналого-цифровых реализациях.

TINACloud содержит в библиотеке большое число микроконтроллеров (PIC, AVR, 8051), которые можно тестировать, программировать и запускать в интерактивном режиме. Встроенный программатор позволяет модифицировать программы и наблюдать результаты.

11. *Шумовой анализ* определяет шумовой спектр, который соответствует каждому входу или выходу. Может быть вычислена мощность шума и отношение сигнал-шум.

12. *Статистический анализ и анализ наилучших случаев* позволяет установить требуемую точность элементов цепи и получить статистические характеристики.

Данный лабораторный практикум по электротехнике, электронике и схемотехнике предназначен для обучения студентов работе с облачной программой TINACloud. Опыт автора подтверждает, что программа TINACloud может быть успешно использована в научных исследованиях и в образовании.

Часть I

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

1 ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Элементы, структура и основные законы электрических цепей

Идеальные пассивные элементы это резистор R [Ом], индуктивность L [Гн], емкость C [Ф] (рис. 1.1).

Понятие «постоянное напряжение (ток)» означает, что во времени значение и направление напряжения (тока) не меняются. Можно сказать, что частота изменения постоянного напряжения (тока) $\omega = 0$.

На постоянном токе $i = I = \text{const}$ получим $di/dt = 0$. Следовательно, напряжение на индуктивности равно нулю и индуктивность для постоянного тока является коротким замыканием.

Для ёмкости на постоянном токе $du/dt = 0$. Следовательно, ток через ёмкость равен нулю и ёмкость на постоянном токе эквивалентна разрыву.

Линейные пассивные элементы имеют линейные зависимости между током и напряжением (или их производными для индуктивности и ёмкости). Для этого значения R , L , C не должны зависеть от токов и напряжений на этих элементах.

Идеальные активные элементы (источники энергии) — это идеальный источник напряжения E и идеальный источник тока J (рис. 1.2).

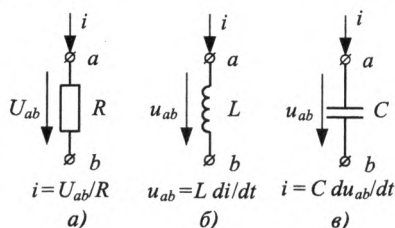


Рис. 1.1. Идеальные пассивные элементы: а — резистор; б — индуктивность; в — емкость

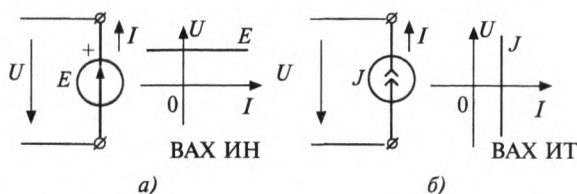


Рис. 1.2. Идеальные активные элементы: а — идеальный источник напряжения; б — идеальный источник тока

Идеальный источник напряжения E (ИН) имеет нулевое внутреннее сопротивление ($R_{\text{ин}} = 0$), и напряжение на его зажимах не зависит от тока, который он отдаёт во внешнюю цепь. Вольтамперной характеристикой электрической цепи называют зависимость тока, проходящего через элемент, от напряжения на его зажимах. Вольтамперная характеристика источника напряжения (ВАХ ИН) — это горизонтальная линия на отметке E по оси напряжения.

Идеальный источник тока J (ИТ) имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление ($R_{\text{ит}} = \infty$), и ток, который он отдаёт во внешнюю цепь, не зависит от напряжения на зажимах источника тока. Вольтамперная характеристика источника напряжения (ВАХ ИТ) — это вертикальная линия на отметке J по оси тока.

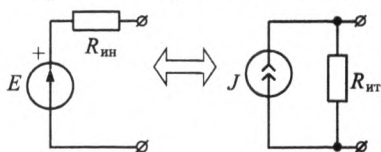


Рис. 1.3. Замена источника напряжения и источника тока

Реальные активные элементы имеют конечные внутренние сопротивления (рис. 1.3).

Источник напряжения с последовательным внутренним сопротивлением можно заменить на эквивалентный источник тока с параллельным внутренним сопротивлением при условии, что

$$R_{\text{ин}} = R_{\text{ит}} = R_{\text{вн}}; \quad E = JR_{\text{вн}}; \quad J = E/R_{\text{вн}}.$$

Линейные источники энергии имеют линейные вольтамперные характеристики.

Электрическая цепь постоянного тока является линейной, если все элементы цепи имеют линейные вольтамперные характеристики.

На рис. 1.4 показана схема линейной электрической цепи постоянного тока.

Структура электрической цепи определяется взаимным расположением ветвей, узлов и контуров. Ветвь — это участок цепи, через который проходит один и тот же ток. Узел — место соединения трех и более ветвей. Контур — замкнутый путь, последовательность ветвей и узлов, в которой каждая ветвь и каждый узел

Записываем канонические уравнения по методу МКТ для трехконтурной схемы:

$$\begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix}.$$

Диагональные сопротивления контурной матрицы сопротивлений с одинаковыми индексами находим как сумму всех сопротивлений контура при последовательном обходе ($R_{11} = R_1 + R_5 + R_{\text{ин}}, \dots$). Недиагональные сопротивления с разными индексами равны сопротивлениям смежных ветвей контуров, причём со знаком плюс берут те сопротивления смежных ветвей, в которых контурные токи направлены одинаково ($R_{12} = -R_5, \dots$). Контурные ЭДС равны алгебраической сумме всех ЭДС контура. Со знаком плюс берут ЭДС, совпадающие по направлению с обходом контура ($E_{33} = -E_2$).

1.3. Расчёт методом узловых напряжений (МУН)

Составляем уравнения по методу узловых напряжений.

Нумеруем узлы: $b \rightarrow 1, c \rightarrow 2, e \rightarrow 3$.

Записываем для схемы с тремя независимыми узлами канонические уравнения МУН в матричной форме для расчёта напряжений в узлах:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} J_{11} \\ J_{22} \\ J_{33} \end{pmatrix}.$$

В матрице узловых проводимостей диагональные проводимости G_{11}, G_{22}, G_{33} с одинаковыми индексами находим как сумму проводимостей всех ветвей, подключённых к узлу с таким же индексом ($G_{11} = G_1 + G_4 + G_5, \dots$). Недиагональная проводимость с разными индексами (например, G_{12}) равна взятой со знаком минус проводимости всех ветвей, соединяющих узлы 1 и 2 ($G_{12} = -G_4, \dots$).

Узловые токи J_{11}, J_{22}, J_{33} находим как алгебраическую сумму подключённых к данному узлу источников напряжения, делённых на сопротивления ветвей, в которых они находятся, и источников тока. Со знаком плюс берём источники, направленные к узлу. Например, $J_{22} = \frac{E_2}{R_2 + R_{\text{ин}}}.$

Пример 1. Схема электрической цепи изображена на рис. 1.5. Найти токи во всех ветвях и напряжения U_{bd} и U_{cd} .

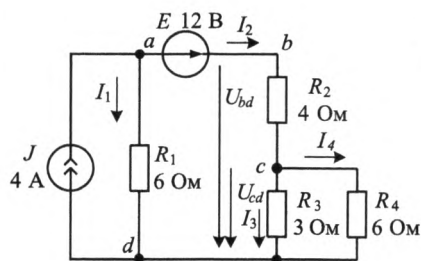


Рис. 1.5. Схема к примеру 1

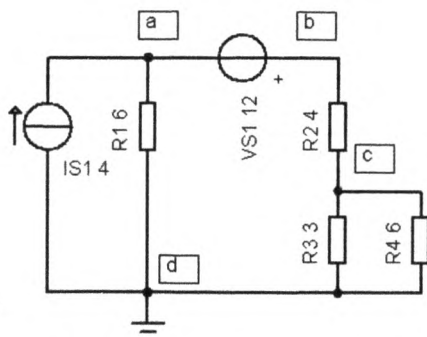


Рис. 1.6. Схема моделирования к примеру 2

Рекомендации:

1. Замените источник тока на источник напряжения.
2. Параллельно включённые сопротивления R_3 и R_4 замените эквивалентным.
3. В полученной одноконтурной цепи по второму закону Кирхгофа рассчитайте ток I_2 .
4. Вычислите напряжения U_{cd} и U_{bd} по закону Ома.
5. Вычислите токи I_3 и I_4 по закону Ома.
6. По первому закону Кирхгофа вычислите ток I_1 .
7. Запишите численные ответы для токов и напряжений.

Пример 2. Соберите схему моделирования рис. 1.6. Изображения элементов электрической цепи соответствуют европейским стандартам.

Измерение напряжений в схеме можно провести и без включения приборов (рис. 1.7). Для этого в главном меню наберите *Анализ — Анализ постоянного тока — Узловые потенциалы*. Появится *курсор-рука*. Касаясь им любого проводника, Вы измерите напряжение относительно земли.

Если Вы коснётесь резистора, то увидите падение напряжения на нём.

Полный отчёт о всех напряжениях и токах в схеме можно получить, набрав в главном меню *Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока* (рис. 1.8).

Напряжения и токи на отдельных элементах измерены по направлению узлов, указанных в скобках. Поэтому токи в резисторах и напряжения на них могут быть отрицательные и не соответствовать стрелкам на схеме рис. 1.5.

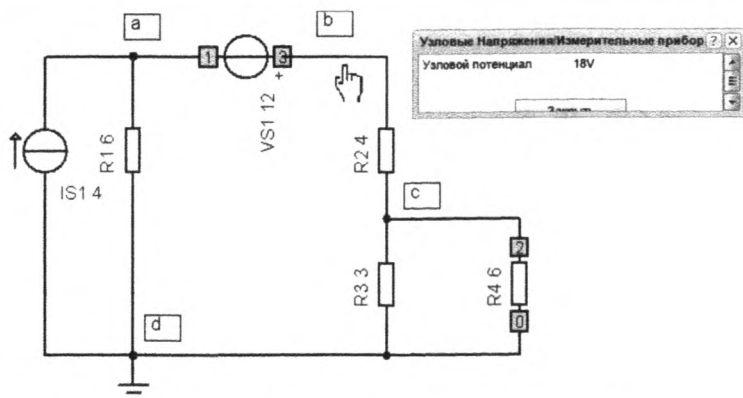


Рис. 1.7. Измерение напряжений курсором-рукой

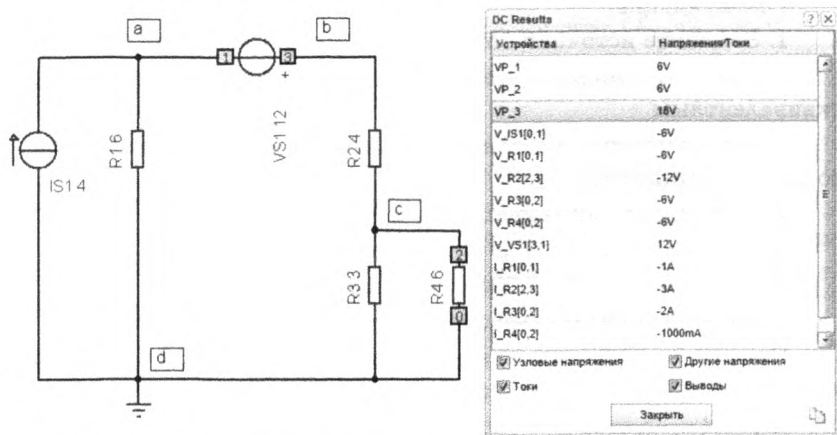


Рис. 1.8. Таблица результатов анализа схемы на постоянном токе

Дополнительное задание: для контура R_1 -E- R_2 - R_3 проверить выполнение второго закона Кирхгофа.

1.4. Делитель напряжения

В исследованной схеме напряжение в узле B $U_b = 18$ В, а напряжение в узле C $U_c = 6$ В. Сопротивления R_2 , R_3 , R_4 образуют делитель напряжения. Параллельное соединение сопротивлений R_3 и R_4 обозначим $R_3 \parallel R_4 = (3 \cdot 6)/9 = 2$ Ом. Напряжение в узле C находим по формуле

$$U_c = U_b \frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + R_3 \parallel R_4} = 18 \frac{2}{4 + 2} = 6 \text{ В.}$$

Так на резисторах можно получить часть входного напряжения.

1.5. Делитель токов

К узлу C из резистора R_2 подходит ток $I_2 = 3$ А и делится на ток I_3 и I_4 пропорционально проводимостям третьей и четвертой ветвей. Ток I_4 можно рассчитать по формуле

$$I_4 = I_2 \frac{G_4}{G_3 + G_4} = I_2 \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 3 \frac{3}{3 + 6} = 1 \text{ А.}$$

1.6. Баланс мощности

В электрической цепи постоянного тока сумма мощностей, выделяемых источниками энергии, равна сумме мощностей, потребляемых в нагрузках (резисторах). В цепи (см. рис. 1.5) мощность источников

$$P_{\text{ист}} = EI_2 + JU_{ad} = 12 \cdot 3 + 4 \cdot 6 = 60 \text{ Вт;}$$

мощность потребителей

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 = 6 + 36 + 12 + 6 = 60 \text{ Вт.}$$

Как видим, баланс мощности выполняется.

Мощность источника тока, подключённого к узлам ad (см. рис. 1.5): $P_J = JU_{ad}$ (источник тока направлен к узлу a).

1.7. Метод эквивалентного генератора, согласование нагрузки с генератором

В схеме рис. 1.5 требуется найти ток только в одной ветви, например ток I_2 в ветви bc . Такой расчёт проще сделать *методом эквивалентного генератора*. Для этого отключим временно резистор R_2 и найдём напряжение холостого хода $U_{bc\text{хх}}$ между точками bc . Затем найдём входное сопротивление $R_{bc\text{вх}}$ схемы относительно точек bc . Заменяем цепь с нагрузкой R_2 эквивалентным генератором (рис. 1.9), в котором $E_{\text{экв}} = U_{bc\text{хх}}$, $R_{\text{экв}} = R_{bc\text{вх}}$.

Можно доказать, что в нагрузке R_2 будет выделяться наибольшая активная мощность, если выполняется условие согласования нагрузки с генератором, а именно: $R_{\text{н}} = R_2 = R_{\text{экв}}$. При этом максимальная мощность в нагрузке будет равна $P_{\text{max}} = \frac{E_{\text{экв}}^2}{4R_{\text{экв}}}$.

Пример 3. В схеме рис. 1.5 найти ток нагрузки I_2 и мощность в нагрузке методом эквивалентного генератора.

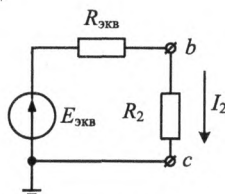


Рис. 1.9. Схема эквивалентного генератора

Рекомендации:

1. В режиме холостого хода ток в схеме рис. 1.5 будет проходить только в источнике тока и резисторе R_1 . Напряжение холостого хода найдём по формуле $U_{bcxх} = U_{abxх} + E = JR_1 + E$.

2. При расчёте входного сопротивления $R_{bcвх}$ источник тока эквивалентен разрыву, а источник напряжения эквивалентен короткому замыканию.

Пример 4. В схему рис. 1.10 включён ваттметр W для измерения мощности. В таблице результатов находим ток $I_2 = 3$ А, мощность в нагрузке $P = PM_1 = 36$ Вт.

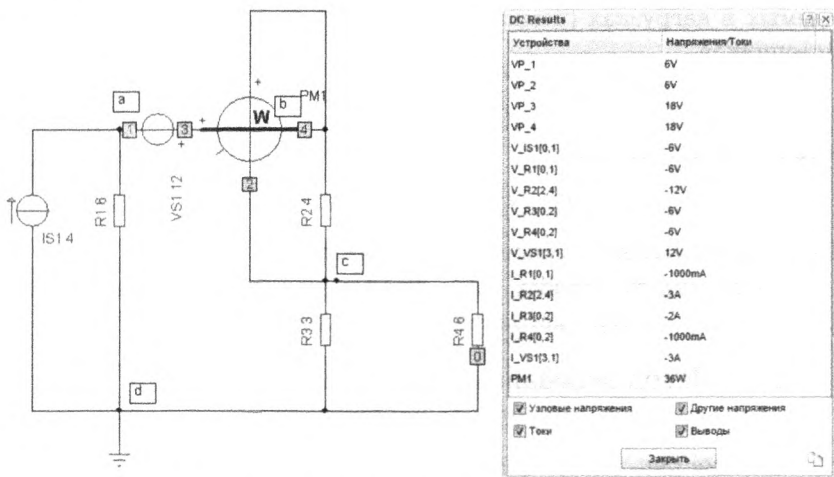


Рис. 1.10. Схема моделирования к примеру 4

Найдём оптимальное значение нагрузки R_2 . Для этого выделяем ваттметр. В открывшемся окне *Properties* выбираем *Оптимизация/Цель* (рис. 1.11).

Выделяем резистор R_2 . В окне *Properties* рядом с номиналом нажимаем *Подробности*, выбираем *Оптимизация\Объект*, устанавливаем *Начальное значение = 2*, *Конечное значение = 20*, нажимаем ОК (рис. 1.12).

Далее в главном меню выбираем *Анализ — Оптимизация*. В новом окне *Запустить оптимизацию постоянного тока* (рис. 1.13) выбираем *Обычный*. Нажимаем *Запустить*.

После вычислений получаем результат оптимального выбора сопротивления нагрузки (рис. 1.14).

Оптимальное значение резистора R_2 автоматически устанавливается в схеме. Повторно проведём измерения и в *Таблице резуль-*

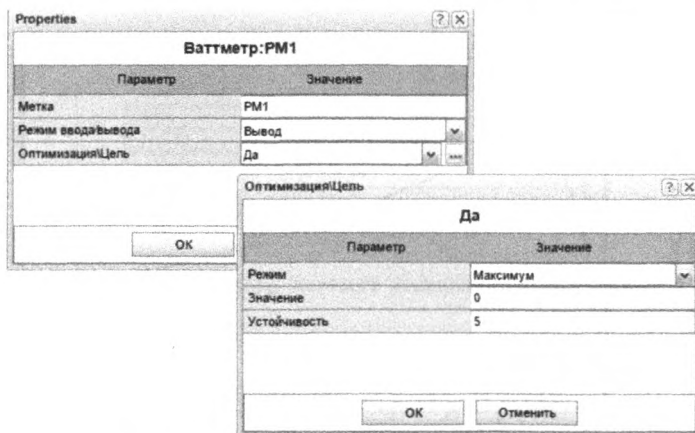


Рис. 1.11. Окна установки целей оптимизации

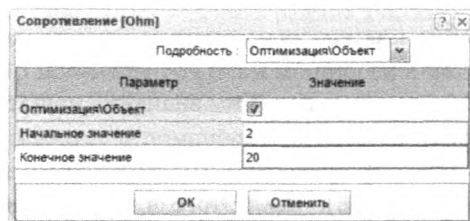


Рис. 1.12. Установка границ параметров оптимизации

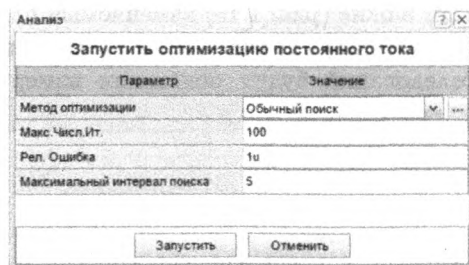


Рис. 1.13. Окно установок оптимизации

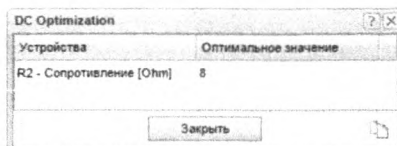


Рис. 1.14. Результат оптимизации сопротивления нагрузки

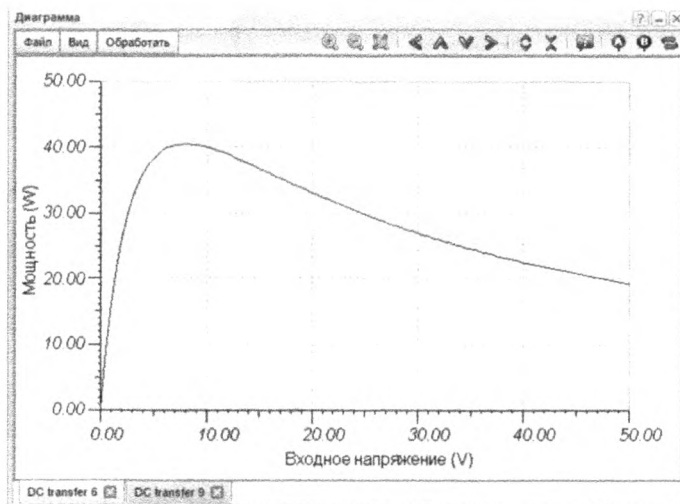


Рис. 1.15. График зависимости мощности от сопротивления нагрузки

татов постоянного тока получим значение мощности в нагрузке 4 равное 0,5 Вт.

Можно получить график зависимости мощности от сопротивления нагрузки (рис. 1.15). Для этого в главном меню выбираем Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока.

Устанавливаем в окне (рис. 1.16) изменяемый параметр Ввод — R2, начальные и конечные значения R2 и нажимаем Запустить. Результатом исследований будут показания измерителя в схеме (ваттметра).

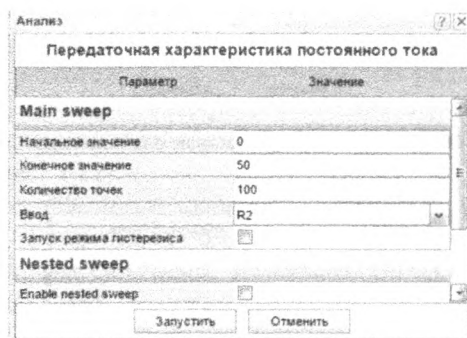


Рис. 1.16. Установка параметров для анализа передаточных характеристик на постоянном токе

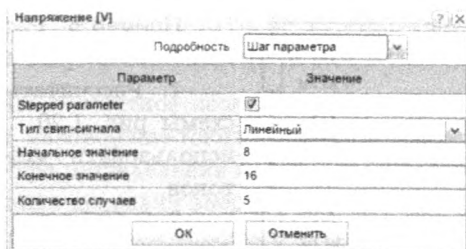
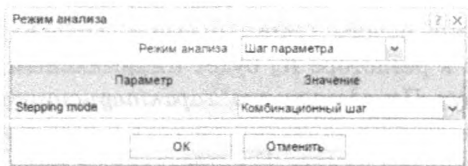
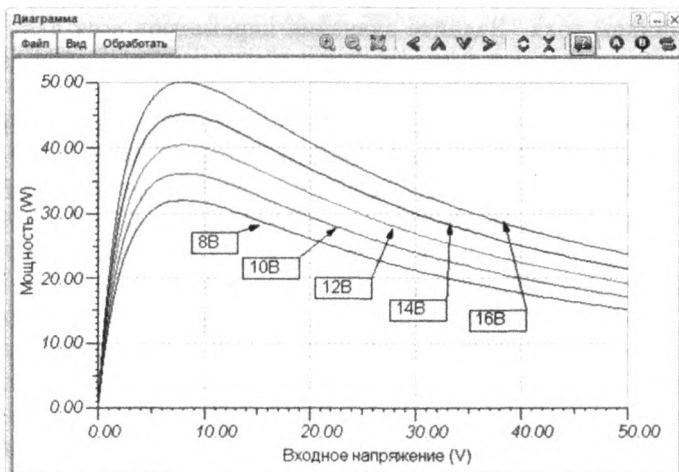
Рис. 1.17. Установка шагового изменения напряжения E 

Рис. 1.18. Установка режима анализа

На рис. 1.15 показаны графики мощности в нагрузке при изменении R_2 и E (VS1). Напряжение E меняется от 8 В до 16 В с шагом 2 В и устанавливается с помощью вкладки *Подробности* рядом с введением номинала так, как показано на рис. 1.17.

После выбираем *Анализ — Режим* и устанавливаем параметры, как показано на рис. 1.18. После этого выполняем *Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока*. Семейство графиков мощности для разных значений E показано на рис. 1.19.

Рис. 1.19. Графики мощности в нагрузке при изменении R_2 и E

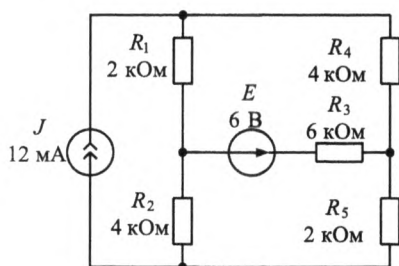


Рис. 1.20. Схема к примеру 5

Пример 5. Рассчитать и смоделировать трёхконтурную цепь.

1. Рассчитать токи в ветвях схемы рис. 1.20. Рекомендуется использовать метод контурных токов.

2. Собрать компьютерную модель схемы. Сравнить результаты моделирования с результатами расчета.

3. Используя режим *Оптимизация*, определить при каком значении E ток в резисторе R_3 будет минимальным.

4. Используя *Передающую характеристику постоянного тока*, получить график зависимости тока в резисторе R_3 от величины E . Рекомендуем менять E в пределах $(-24\text{ В}, +24\text{ В})$.

1.8. Вопросы для самопроверки и задания для подготовки к лабораторной работе

1. Какие элементы используются в линейных цепях постоянного тока? Нарисуйте вольтамперные характеристики этих элементов.

2. Как преобразовать источник напряжения в источник тока и обратно?

3. Нарисуйте четырёхконтурную цепь постоянного тока с двумя источниками напряжения и источником тока. Обозначьте токи в ветвях и запишите уравнения для расчёта токов по законам Кирхгофа, по методу контурных токов и по методу узловых напряжений.

4. Нарисуйте двухконтурную цепь с источником напряжения и источником тока. Задайте значения параметров всех элементов. Рассчитайте ток в одной из ветвей методом наложения. Определите остальные токи.

5. В двухконтурной цепи (п. 4) рассчитайте ток в одном из сопротивлений методом эквивалентного генератора.

6. Какое значение должно иметь сопротивление ветви нагрузки (п. 5), чтобы в нагрузке выделялась наибольшая мощность?

7. Как рассчитать баланс мощности для цепи рис. 1.20?

Обязательно для всех лабораторных работ!

8. Прочитайте весь текст лабораторной работы.

9. Подготовьте в тетради для лабораторных работ Протокол измерений. Протокол должен содержать схемы исследуемых цепей и таблицы для результатов измерений.

10. Подготовьтесь к вопросам по содержанию лабораторной работы, методам измерений, ожидаемым результатам.

1.9. Лабораторная работа № 1. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока

Цель работы — опытное исследование свойств линейной электрической цепи, нахождение токов в ветвях методом наложения и по законам Кирхгофа, определение потенциалов точек электрической цепи, исследование передачи энергии от активного двухполюсника к нагрузке и сопоставления опытных и теоретических данных.

Работа выполняется компьютерным моделированием виртуальной цепи с использованием программы TINACloud.

1. Собрать схему для компьютерного моделирования рис. 1.21.

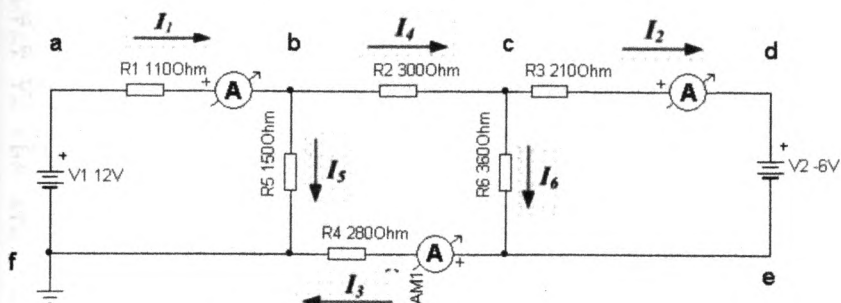


Рис. 1.21. Схема для компьютерного моделирования

Для сборки виртуальной цепи последовательно перетаскивайте на рабочее поле все элементы цепи с панели компонентов *Основные*. Расположите элементы цепи в соответствии со схемой. Элементы можно поворачивать, выделив их щелчком левой кнопки и вызвав окно команд редактирования щелчком правой кнопки (или же воспользовавшись аналогичными командами верхней панели *Схемного редактора*). Для соединения элементов в цепь подведите стрелку указателя к выводу элемента, после появления «пишущего карандаша» нажмите левую кнопку мыши, протащите проводник до вывода другого элемента и, добившись соединения, отпустите левую кнопку мыши.

Для изменения значений параметра элемента выделите его, щелкнув левой кнопкой мыши. Затем нажмите правую кнопку, выберите *Свойства* и установите нужное значение параметра.

Для измерения токов используются три амперметра АМ1–АМ3. Их входные зажимы, обозначенные знаком +, надо расположить согласно схеме рис. 1.21. При этом значения токов по знаку будут соответствовать принятым направлениям стрелок.

Лабораторное задание

1. Численные значения напряжений источников определяются по двум последним цифрам mn номера студенческого билета по следующим формулам:

$$E_1 = (-1)^m \begin{cases} m + 5, & \text{если } m \leq 5; \\ m, & \text{если } m > 5 \end{cases}$$
$$E_2 = (-1)^n \begin{cases} n + 5, & \text{если } n \leq 5; \\ n, & \text{если } n > 5 \end{cases}$$

Если работу выполняет бригада студентов, возьмите номер студенческого билета бригадира.

Установите рассчитанные по формулам или заданные преподавателем величины напряжения каждого из двух источников напряжения. Значения напряжений запишите в рабочий отчёт и поддерживайте неизменными.

Номинальные значения резисторов для каждой бригады могут быть заданы преподавателем.

2. Определите токи во всех ветвях при действии только источника напряжения E_1 . Для этого установите значение $E_2 = 0$.

Значения токов можно определить следующим способом:

В главном меню выберите *Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока*. В таблице результатов Вы получите все токи и напряжения на элементах цепи и в узлах.

Результаты измерения трёх токов запишите в табл. 1.1.

Токи надо обязательно определять с учётом знаков для «условно положительных направлений», обозначенных на схеме (рис. 1.21). Для этого стрелка тока должна быть направлена к знаку «плюс» прибора.

3. Определите токи во всех ветвях при действии только источника напряжения E_2 . Для этого установите значение $E_1 = 0$.

Результаты запишите в табл. 1.1.

4. Включите два источника напряжения. Определите токи I_1, I_2, I_3 при действии обоих источников (с учётом знаков токов). Результаты запишите в табл. 1.1.

5. По опытным данным пунктов 2 и 3 подсчитайте токи I_1, I_2, I_3 при действии обоих источников напряжения и сравните результаты с экспериментом п. 4.

6. В схеме с одним источником напряжения E_1 , вместо E_2 подключите вольтметр и измерьте напряжение холостого хода U_{xx} между разомкнутыми правыми зажимами. Затем закоротите вольтметр

Таблица 1.1

	$E_1 \neq 0; E_2 = 0$	$E_1 = 0; E_2 \neq 0$	$E_1 \neq 0; E_2 \neq 0$ (опыт)	$E_1 \neq 0; E_2 \neq 0$ (расчет)
I_1 , мА				
I_2 , мА				
I_3 , мА				
I_4 , мА				
I_5 , мА				
I_6 , мА				

перемычкой и измерьте ток короткого замыкания $I_{кз}$ при замкнутых зажимах. Рассчитайте входное сопротивление цепи со стороны правых зажимов.

7. Установите E_1 равным нулю. Исключите два источника напряжения. Измерьте омметром из группы компонентов *Измерительные приборы* входное сопротивление со стороны правых зажимов. При измерении входного сопротивления вместо удалённых источников напряжения и тока надо оставить их внутренние сопротивления. Сравните результаты, полученные в п. 6.

8. Включите два источника напряжения. В главном меню выберите *Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока*. Запишите в табл. 1.2 значения напряжений в узлах схемы.

Таблица 1.2

φ_a	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e

9. Включите вместо источника напряжения E_2 сопротивление нагрузки R_7 . Последовательно с амперметром АМ2 включите ваттметр как показано на рис. 1.10. Требуется найти оптимальное значение сопротивления нагрузки, при котором в ней выделяется наибольшая мощность. Исследование проводим аналогично моделированию задания №2.

Выделяем ваттметр. В открывшемся окне *Properties* выбираем *Оптимизация/Цель* (см. рис. 1.11). Выделяем резистор R_7 . В окне *Properties* рядом с номиналом нажимаем *Подробности*, выбираем *Оптимизация\Объект*, устанавливаем *Начальное значение* $= 0,5R_{вх}$, *Конечное значение* $= 2R_{вх}$, нажимаем ОК (см. рис. 1.12). В главном меню выбираем *Анализ — Оптимизация*. В новом окне *Запустить оптимизацию постоянного тока* (см. рис. 1.13) выбираем *Обычный поиск*. Нажимаем *Запустить*.

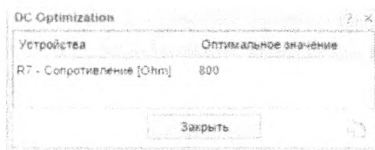


Рис. 1.22. Оптимальное сопротивление нагрузки

нагрузки. Для этого удалим из схемы все амперметры. В главном меню выбираем *Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока*. Устанавливаем в окне (рис. 1.13) изменяемый параметр *Ввод — R_7* , начальные значение $R_7 = 0$ и конечное значение $R_7 = 2R_{вх}$ и нажимаем *Запустить*. Получим искомый график.

Домашнее расчётное задание

1. По опытным данным п. 5 рабочего задания подсчитать токи во всех ветвях при действии обоих источников напряжения.

2. По данным из табл. 1.1 подсчитать входные и взаимные проводимости ветвей $g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$ и записать выражения для токов I_1 и I_2 по принципу наложения.

3. Подсчитать, при каком значении напряжения E_2 ток во второй ветви будет равен нулю.

4. По данным табл. 1.2 и значениям токов рассчитать сопротивление всех ветвей схемы. Сравнить результаты с данными, заданными по схеме.

5. Рассчитать входное сопротивление схемы со стороны правых зажимов. Сравнить с результатами предыдущих измерений и расчётов.

6. Используя U_{xx} и $R_{вх}$ для принятого в схеме значения E_1 и оптимального сопротивления нагрузки $R_{7\text{опт}}$, методом эквивалентного генератора рассчитать ток I_2 и сравнить с опытными данными.

7. Построить график зависимости мощности, выделяемой в нагрузке, от сопротивления нагрузки. Для оптимальной нагрузки рассчитать и построить график зависимости мощности в нагрузке от тока в ней. Сделать выводы об условиях выделения максимальной мощности в нагрузке.

8. Построить потенциальные диаграммы для контура с источником напряжения и без источника напряжения.

9. Сформулировать и записать выводы по результатам экспериментов и расчётов.

После вычислений получаем результат оптимального выбора сопротивления нагрузки (рис. 1.22). Запишите значение оптимальной нагрузки и значение тока I_2 .

10. Получить график зависимости мощности от сопротивления

2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Символический метод расчёта

В электрических цепях переменного тока токи и напряжения меняются во времени и могут иметь синусоидальную гармоническую форму или периодическую несинусоидальную форму. Поэтому электрические цепи переменного тока разделяют на цепи синусоидального тока и цепи несинусоидального тока.

Расчёт электрической цепи при синусоидальном сигнале.

При гармоническом синусоидальном сигнале $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_E)$ расчёт электрических цепей проводят символически методом с использованием комплексных амплитуд токов и напряжений и комплексных сопротивлений.

Рассмотрим пример расчёта простой цепи синусоидального тока (рис. 2.1). Для расчёта символическим методом исходную цепь для мгновенных значений напряжений и токов (рис. 2.1, а) заменяют символической схемой замещения для комплексных амплитуд напряжений и токов и комплексных сопротивлений (рис. 2.1, б).

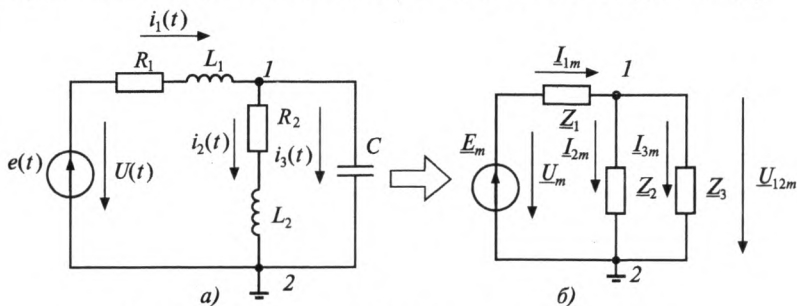


Рис. 2.1. Схема простой цепи синусоидального тока

В символической схеме замещения комплексная амплитуда входного напряжения $\underline{E}_m = E_m e^{j\psi}$.

Сопротивление каждой ветви цепи характеризуют комплексным сопротивлением

$$\underline{Z} = R + jX = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Ze^{j\varphi},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — модуль комплексного сопротивления; $\varphi = \arctg(X/R)$ — аргумент комплексного сопротивления. В ветви без индуктивности $L = 0$, а в ветви без ёмкости $C = \infty$.

Комплексной проводимостью ветви называется величина, обратная комплексному сопротивлению:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = g - jb = Y e^{-j\varphi},$$

где $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$ — модуль комплексной проводимости; $\varphi = \arctg(b/g)$ — аргумент комплексной проводимости.

Часть цепи, содержащая одну или несколько ветвей и имеющая два входных зажима, называется двухполюсником. Входное эквивалентное сопротивление двухполюсника рассчитывают свёрткой цепи.

Например, для схемы, изображённой на рис 2.1,б,

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

Входной ток

$$\underline{I}_{1m} = \frac{\underline{E}_m}{\underline{Z}_{\text{экв}}} = \frac{E_m e^{j\psi_E}}{Z_{\text{экв}} e^{j\varphi}} = I_{1m}(\omega) e^{j\psi_I(\omega)}.$$

Здесь зависимость амплитуды тока от частоты $I_{1m}(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика тока (АЧХ), $\psi_I(\omega) = \psi_E(\omega) - \varphi(\omega)$ — фазочастотная характеристика тока (ФЧХ). Если принять $\psi_E = 0$, то $\psi_I(\omega) = -\varphi(\omega)$. В цепи с индуктивным сопротивлением $[-\varphi(\omega)]$ меньше нуля и напряжение опережает ток по фазе. В цепи с ёмкостным сопротивлением $[-\varphi(\omega)]$ больше нуля и напряжение отстает от тока по фазе. В цепи с чисто активным сопротивлением, а также в резонансных режимах, когда $X_{\text{экв}} = 0$, ток совпадает с напряжением по фазе.

2.2. Мощность в цепи гармонического тока

Мгновенное напряжение на входе двухполюсника (см. рис. 2.1,а)
 $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_U) = e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_E).$

Мгновенное значение тока на входе двухполюсника $i_1(t) = I_{1m} \times \sin(\omega t + \psi_I).$

Мгновенная мощность

$$p(t) = u(t)i_1(t) = \frac{U_m I_{1m}}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_{1m}}{2} \cos(2\omega t + 2\psi_U - \varphi).$$

Средняя мощность за период, или активная мощность

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt = UI \cos \varphi.$$

Здесь $U = U_m/\sqrt{2}$ и $I = I_m/\sqrt{2}$ — действующие значения напряжения и тока на входе двухполюсника.

В расчётах символическим методом применяют комплексную мощность $\hat{S} = \underline{U}\underline{I}^* = P + jQ$, где \underline{U} — комплексное действующее значение напряжения на входе пассивного двухполюсника; \underline{I}^* — комплексно-сопряжённый ток; P — активная мощность; Q — реактивная мощность. Активная мощность потребляется в цепи. Реактивная мощность обменивается между источниками энергии и накопительными элементами.

2.3. Расчёт цепи методом двух узлов

Метод двух узлов является частным случаем метода узловых напряжений. Этот метод целесообразно применять, когда в схеме рис. 2.2 всего два узла. Один узел b можно заземлить.

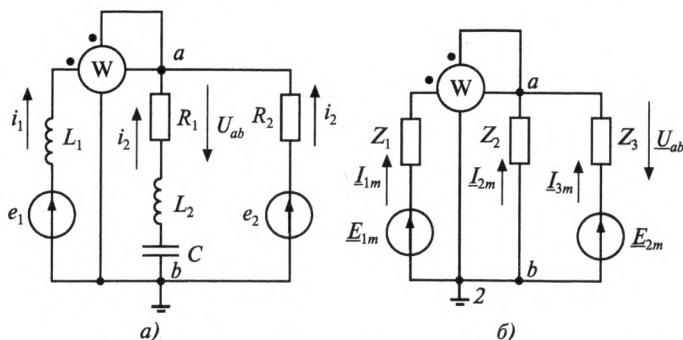


Рис. 2.2. Схема исходной цепи с двумя узлами и схема замещения

В схеме замещения (справа) $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ — комплексные сопротивления ветвей; $\underline{E}_{1m}, \underline{E}_{2m}$ — результирующие комплексные амплитуды ЭДС в ветвях; $\underline{I}_{1m}, \underline{I}_{2m}, \underline{I}_{3m}$ — комплексные амплитуды токов в ветвях. Напряжение между узлами a и b можно рассчитать по формуле метода двух узлов:

$$\underline{U}_{abm} = \frac{\underline{E}_{1m}\underline{Y}_1 + \underline{E}_{2m}\underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}.$$

После расчёта напряжения \underline{U}_{abm} токи в ветвях можно найти по обобщённому закону Ома.

Простую цепь гармонического тока надо уметь рассчитывать «в ручную», используя комплексные числа и калькулятор. Расчёт сложных цепей можно выполнить в *Mathcad* или исследовать, используя программу *TINACloud*.

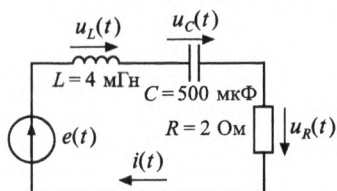


Рис. 2.3. Расчётная схема к примеру 6

Пример 6. В цепи рис. 2.3 действует синусоидальный источник напряжения $e(t) = 8 \sin 1000t$ ($f = 159,15$ Гц).

Номинальные значения пассивных элементов цепи указаны на схеме. Найти ток в цепи, напряжения на всех элементах. Построить графики напряжений и тока. Построить векторную диаграмму.

Рекомендации:

1. Вычислить комплексную амплитуду источника напряжения и комплексные сопротивления всех элементов.
2. Вычислить комплексную амплитуду тока.
3. Вычислить комплексные амплитуды напряжений на элементах цепи.
4. Построить векторную диаграмму напряжений, совмещённую с векторной диаграммой токов.
5. Записать выражения для мгновенных значений напряжений и токов.

Пример 7. Выполнить компьютерное моделирование схемы на рис. 2.4. Выделим генератор напряжения *VG1*, откроется окно *Properties*. В окне настроек генератора (рис. 2.5) надо выбрать *Сигнал*

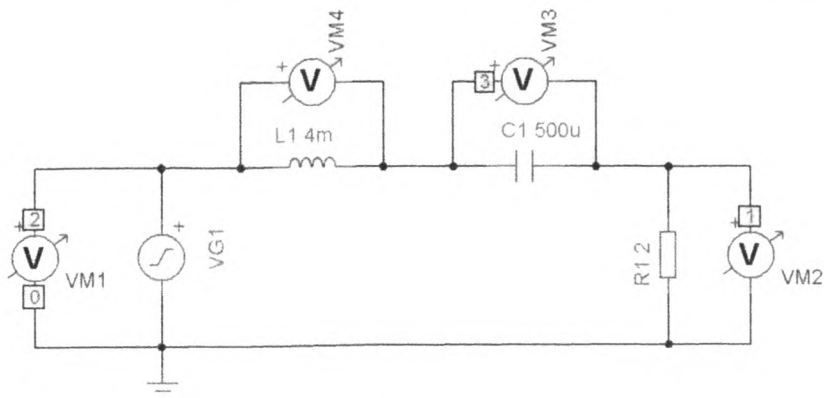


Рис. 2.4. Схема компьютерного моделирования



Рис. 2.5. Окно редактора сигналов генератора

и щёлкнуть по кнопке . В появившемся списке установим форму сигнала «синусоидальная волна», далее щёлкнем по кнопке и установим амплитуду 8В, частоту 159.155 Гц, фазу 0°. В меню Вид — Настройки — Базовая функция для пер. тока установить синус.

Ток и напряжения в цепи можно найти, не используя приборы VM1–VM4. Для этого в главном меню выбираем Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока. Таблица результатов показана на рис. 2.6. В ней указаны амплитуды и фазы напряжений и токов. Сравните полученные Вами результаты расчёта и компьютерного моделирования. Обратите внимание, что напряжение $V_{R1}[0,1] = 5,66/135^\circ = -u_R$ на схеме рис. 2.3 так как направлено противоположно. Поэтому по результатам моделирования комплексная амплитуда $\underline{U}_{Rm} = 5,66e^{j(135^\circ - 180^\circ)} = 5,66e^{-j45^\circ}$.

Подключение вольтметров к элементам цепи (рис. 2.4) позволяет получить графики всех напряжений.

устройства	Напряжения/Токи
VP_1	5.66V/-45°
VP_2	8V/9.54°
VP_3	8V/-90°
V_C1[3,1]	5.66V/-135°
V_L1[2,3]	11.31V/45°
V_R1[0,1]	5.66V/135°
V_VG1[2,0]	8V/9.54°
V_VM1[2,0]	8V/9.54°
V_VM2[1,0]	5.66V/-45°
V_VM3[3,1]	5.66V/-135°
V_VM4[2,3]	11.31V/45°
I_L1[2,3]	2.83A/-45°
I_R1[0,1]	2.83A/135°
I_VG1[2,0]	2.83A/135°
VM1	8V
VM2	5.66V
VM3	5.66V
VM4	11.31V

☒ Условные напряжения ☒ Другие напряжения
☒ Токи ☒ Выборы

Закрыть

Рис. 2.6. Таблица напряжений и токов в схеме рис. 2.4

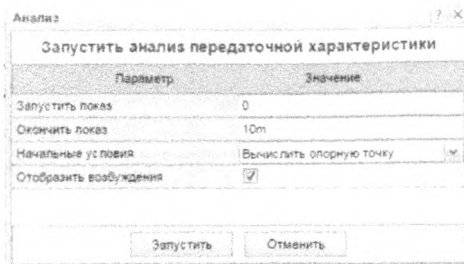


Рис. 2.7. Окно установки времени наблюдения

Для этого в главном меню выбираем *Анализ — Переходный процесс*. В окне (рис. 2.7) устанавливаем время наблюдения с учётом частоты генератора так, чтобы на графиках было 2–3 периода колебаний. Нажимаем *Запустить* и получаем семейство графиков напряжений (рис. 2.8). В окне графиков можно курсором выделить любую кривую и в окне *Настроить кривую* изменить цвет и толщину линии.

Графики напряжений (рис. 2.8) показывают, что напряжение на индуктивности $U_L(t)$ опережает напряжение на резисторе $U_R(t)$ (и, следовательно, ток в цепи) на $T/4$ (90°). Напряжение на ёмкости $U_C(t)$ отстаёт от напряжения $U_R(t)$ на 90° .

Для схемы рис. 2.4 получим амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики. Для этого в главном меню выбираем *Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока*. В окне *Передаточная характеристика*

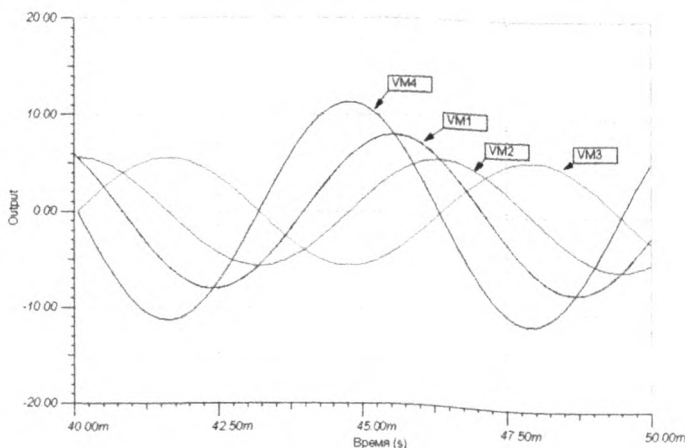


Рис. 2.8. Графики напряжений на элементах RLC-цепи

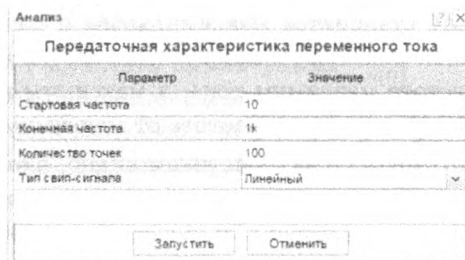
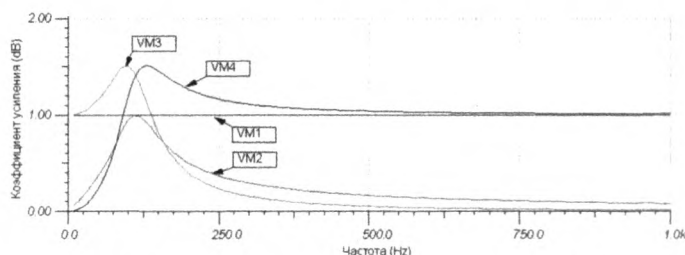
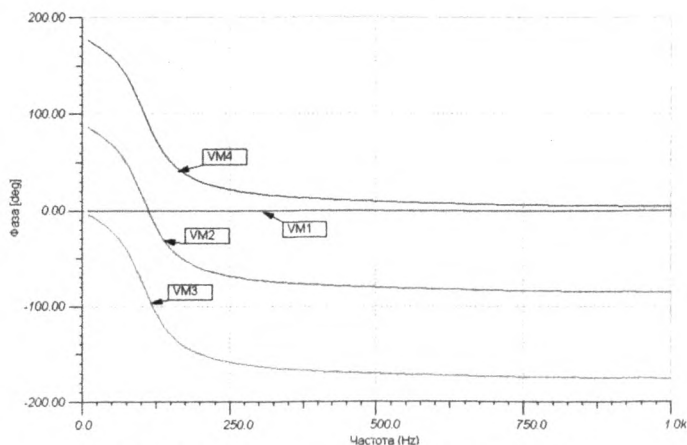


Рис. 2.9. Установка режимов моделирования АЧХ и ФЧХ

переменного тока (рис. 2.9) устанавливаем начальную частоту, конечную частоту, линейную развёртку и виды диаграмм. Нажав *Запустить*, получим АЧХ (рис. 2.10) и ФЧХ (рис. 2.11) напряжений в RLC -цепи. Кнопкой *Auto Label* обозначим графики.

Из графиков АЧХ видно, что на частоте около 113 Гц в цепи возникает последовательный резонанс. При этом напряжение

Рис. 2.10. Амплитудно-частотные характеристики RLC -цепиРис. 2.11. Фазо-частотные характеристики RLC -цепи

на резисторе VM4 становится максимальным и равным входному напряжению VM1. Максимум напряжения на конденсаторе VM3 опережает по частоте максимум тока, а максимум напряжения на индуктивности VM2 отстаёт по частоте от максимума тока.

По фазочастотным характеристикам видно, что при резонансе разность фаз между входным напряжением и током равна нулю. Фаза напряжения на индуктивности меняется от $+180^\circ$ до 0° , а фаза напряжения на ёмкости меняется от 0° до -180° .

Пример 8.

1. Рассчитать схему рис. 2.2 методом двух узлов. Параметры схемы: $L_1 = 1$ мГн, $L_2 = 3$ мГн, $C = 5$ мкФ, $R_1 = 200$ Ом, $R_2 = 25$ Ом; $e_1(t) = 90 \sin 6280t$ В, $e_2(t) = 60 \sin(6280t - 30^\circ)$ В. Определить токи в ветвях, напряжения на элементах. Рассчитать комплексную мощность в цепи ваттметра. Построить векторную диаграмму напряжений.

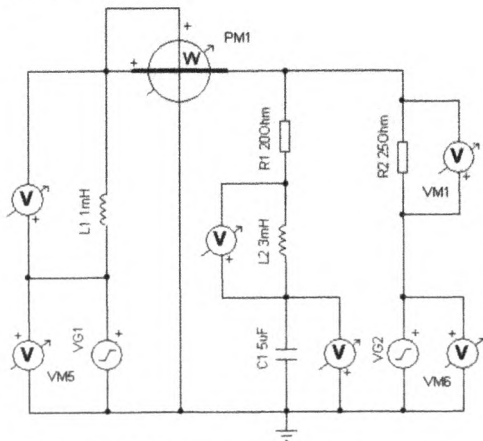


Рис. 2.12. Компьютерная модель схемы с таблицей результатов

Устройство	Напряжения/Токи
I_L1[3,6]	5.83A/-5.96°
I_L2[1,4]	4.22A/-168.19°
I_R1[4,5]	4.22A/-168.19°
I_R2[2,5]	1.69A/171.25°
I_VG1[3,0]	5.83A/-174.04°
I_VG2[2,0]	1.69A/-8.75°
PM1	261.11W
V_C1[0,1]	134.33V/101.81°
V_L1[3,6]	36.64V/95.96°
V_L2[1,4]	79.47V/-78.19°
V_R1[4,5]	84.36V/-168.19°
V_R2[2,5]	42.33V/171.25°
V_VG1[3,0]	90V/4.52°
V_VG2[2,0]	60V/-30°
V_VM1[3,6]	36.64V/95.96°
V_VM2[1,4]	79.47V/-78.19°
V_VM3[0,1]	134.33V/101.81°
V_VM4[2,5]	42.33V/171.25°
V_VM5[3,0]	90V/4.52°
V_VM6[2,0]	60V/-30°
VM1	36.64V
VM2	79.47V
VM3	134.33V
VM4	42.33V
VM5	90V
VM6	60V

☒ Условные напряжения ☒ Другие напряжения
☒ Токи ☒ Выводы

Закрыть

2. Собрать модель схемы (рис. 2.12). Провести моделирование и получить таблицу результатов. Подключить ко всем элементам схемы рис. 2.12 вольтметры. Входные клеммы вольтметров со знаком «+» должны быть ориентированы так, чтобы токи по схеме рис. 2.12 входили в клеммы «+».

Сравнить результаты расчёта и результаты моделирования.

2.4. Расчёт спектра Фурье

Пример 9. Рассчитать амплитудный спектр негармонической последовательности прямоугольных импульсов (рис. 2.13).

Периодический негармонический сигнал $u(t)$ можно представить в виде ряда Фурье:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\Omega t + \Psi_n),$$

где $\Omega = 2\pi/T$ — угловая частота первой гармоники;

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt \text{ — постоянная составляющая;}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cos n\Omega t dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \sin n\Omega t dt$$

— амплитуды гармоник косинусных и синусных составляющих ряда Фурье; $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ — амплитуды n -й гармоники ряда Фурье; $\Psi_n = \arctg(b_n/a_n)$ — фаза n -й гармоники ряда Фурье.

Амплитудным спектром называют совокупность амплитуд гармоник A_n , отнесённых к их частотам (расположенным на частотной оси).

Фазовым спектром называют совокупность фаз гармоник Ψ_n , отнесённых к их частотам.

Для заданной функции рис. 2.13 примите $T = 10$ мс и проведите расчёты амплитуд гармоник спектра A_1 – A_5 . Обратите внимание, что эта функция имеет симметрию относительно нуля. Поэтому амплитудный спектр будет содержать только синусные составляющие с нечётными номерами.

Пример 10. Соберите схему рис. 2.14. В генераторе установите прямоугольные импульсы с амплитудой 1 В, нулевой постоянной составляющей и частотой 100 Гц.

Сначала с меню *Анализ* выберите *Параметры* и установите TR максимальный временной шаг 10 м.

В главном меню выберите *Анализ — Фурье Анализ — Ряды Фурье*. Сделайте установки (рис. 2.15).

Сравните результаты расчёта и моделирования.

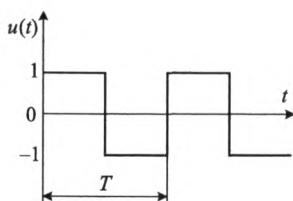


Рис. 2.13. Форма последовательности импульсов

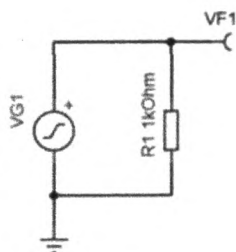


Рис. 2.14. Схема к примеру 10

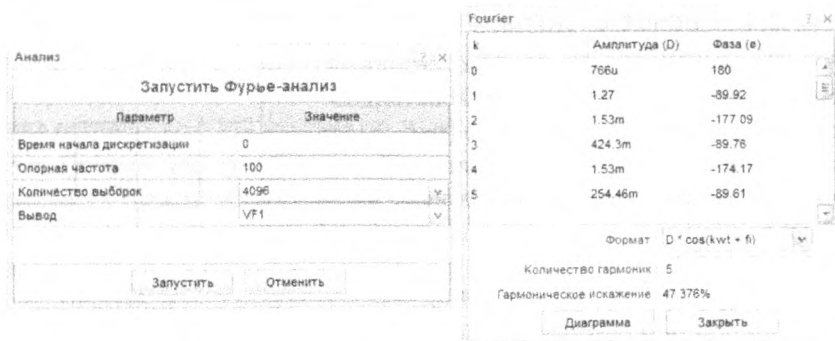


Рис. 2.15. Установки и результаты для моделирования рядов Фурье

Возможны два варианта Фурье-анализа.

В первом варианте Вы получаете ряды Фурье. Для этого в окне *Запустить Фурье-анализ* надо установить опорную частоту, равную частоте первой гармоники (частоте повторения сигнала), время начала дискретизации, количество выборок.

Амплитудный спектр показан на рис. 2.16. Гармоники спектра имеют частоты 100 Гц, 300 Гц, 500 Гц, 700 Гц, 900 Гц... и амплитуды 1,27 В, 0,424 В, 0,255 В, 0,18 В, 0,14 В.

Результаты моделирования показывают, что существенные амплитуды имеют нечётные гармоники ряда Фурье (первая, третья и пятая).

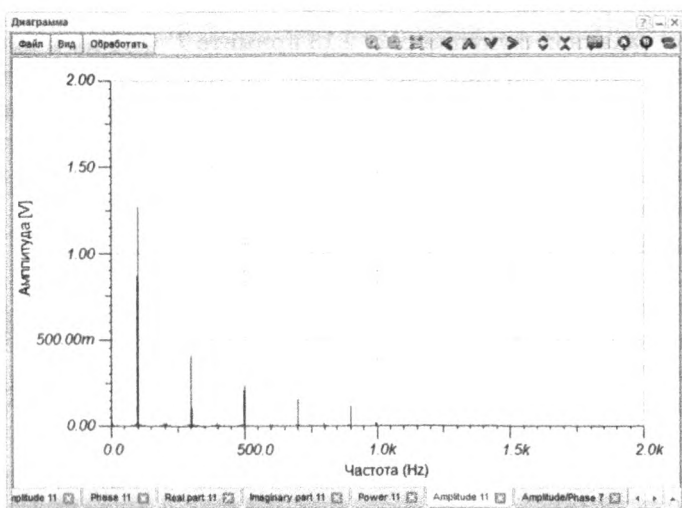


Рис. 2.16. Амплитудный спектр прямоугольных импульсов

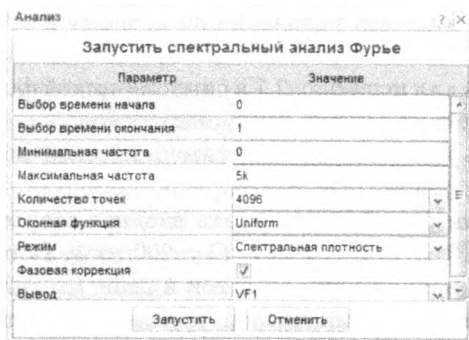


Рис. 2.17. Окно запуска спектрального анализа Фурье

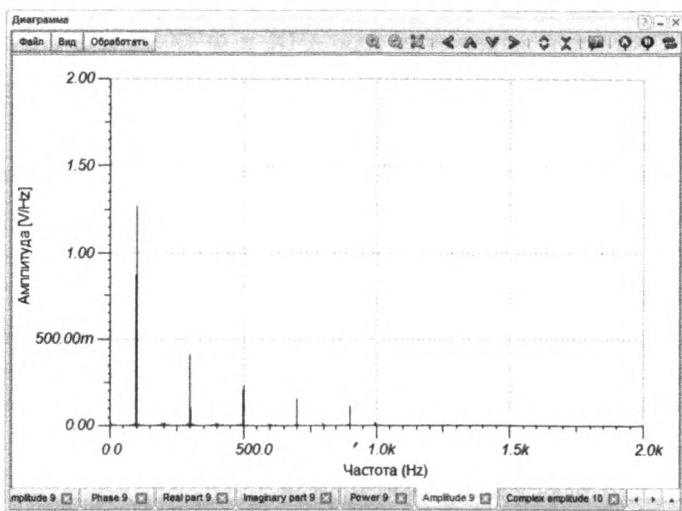


Рис. 2.18. Амплитудный спектр прямоугольных импульсов

Второй вариант запускает спектральный анализ Фурье (рис. 2.17).

В результате в режиме *Спектральная плотность* также можно получить графическое представление амплитуд спектральных составляющих (рис. 2.18). В окне диаграмм рис. 2.18 можно отобразить энергетический спектр, комплексную амплитуду, фазу и т. п.

2.5. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Какие пассивные элементы применяются в линейных цепях переменного тока? Для мгновенных значений напряжений и токов

в схеме рис. 2.1 записать уравнения по первому и второму законам Кирхгофа.

2. Записать для цепи рис. 2.1 в символической форме уравнения для расчёта токов по методу контурных токов.

3. Записать для цепи рис. 2.1 в символической форме уравнения по методу двух узлов.

4. Для цепи рис. 2.4 рассчитать входное сопротивление, если $R = 2 \text{ Ом}$, $\omega = 10^3 \text{ 1/с}$, $L = 3 \text{ мГн}$, $C = 200 \text{ мкФ}$. Построить векторную диаграмму напряжений, если ток в цепи $\underline{I}_m = 2e^{-j45^\circ} \text{ А}$.

5. Что называют комплексной частотной характеристикой цепи?

6. Что называют амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками цепи?

7. Составить выражения для АЧХ и ФЧХ тока в RL -цепи и построить графики для значений, заданных в цепи рис. 2.4.

8. Составить уравнения для АЧХ и ФЧХ тока в RC -цепи и построить графики для значений, заданных в цепи рис. 2.4.

9. Выполнить пункты, обязательные для всех лабораторных работ (см. лабораторную работу №1).

2.6. Лабораторная работа № 2. Исследование цепей переменного тока

Цель работы — исследование амплитудных и фазовых соотношений в цепях переменного тока, частотных характеристик и резонансных явлений, построение векторных диаграмм токов и напряжений.

Лабораторное задание

А. Подготовка виртуальной модели

1. Собрать схему для компьютерного моделирования рис. 2.19. Номинальные значения индуктивностей и ёмкостей в моделях цепей составляют: $L_1 = L_3 = 10 \text{ мГн}$, $L_2 = L_4 = 6,8 \text{ мГн}$, $C_1 = C_3 = 47 \text{ нФ}$, $C_2 = C_4 = 47 \text{ нФ}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$.

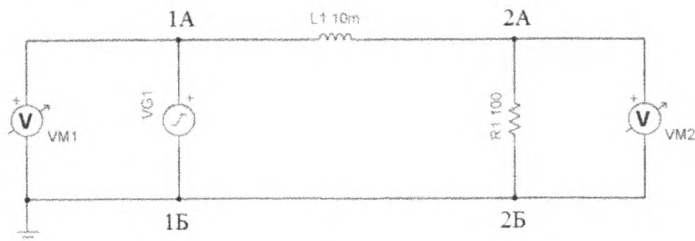


Рис. 2.19. Схема компьютерного моделирования

Приборами в схеме являются генератор напряжения, два вольтметра.

В генераторе напряжения VG1 установить синусоидальную форму сигнала, частоту 5 кГц, амплитуду 1 В, фазу 0°.

2. Двухполюсники, которые должны быть исследованы в работе, показаны на рис. 2.20. При исследованиях эти цепи включают между точками 1А и 2А схемы рис. 2.19. Значения индуктивностей L_a, L_b , ёмкостей C_a, C_b , последовательных сопротивлений потерь в индуктивностях R_{ser} , параллельных сопротивлений утечки в ёмкостях R_{Par} брать по номеру бригады из табл. 2.1.

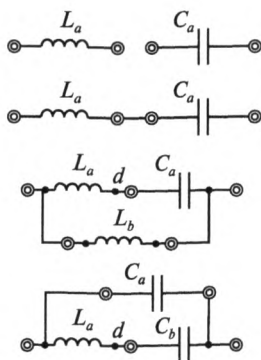


Рис. 2.20. Схемы двухполюсников

Для исследования могут быть заданы и другие варианты цепей.

Таблица 2.1

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_a	L_1	L_1	L_2	L_2	L_2	$2L_1$	$2L_1$	L_2	$2L_1$	$2L_2$	L_1	L_1
L_b	L_1	L_1	L_1	L_1	L_2	L_2	L_2	L_2	L_2	$2L_1$	$2L_2$	L_2
C_a	C_1	C_2	C_1	C_2	$0,5C_2$	$0,5C_1$	C_2	$0,5C_1$	C_1	C_1	$2C_1$	$0,5C_1$
C_b	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_1	C_2	C_2	C_1	C_2	C_2	$0,5C_2$
R_{ser} [Ом]	5	8	10	12	14	16	5	8	10	12	14	16
R_{Par} [кОм]	300	350	380	400	450	480	300	350	380	400	450	480

Б. Исследование RL - и RC -цепей.

3. Подключить между точками 1А и 2А индуктивность L_a и рассчитать частоту сигнала генератора f_1 , при которой реактивное сопротивление индуктивности равно сопротивлению R_1 : $X_L = 2\pi f_1 L_a = R_1$.

4. Установить напряжение генератора VG1 равным 1 В, а частоту равной $0,1f_1$.

Выполнить Анализ — Переходной процесс и наблюдать напряжение $U_2(t)$ на резисторе, пропорциональное току, и входное напряжение $U_1(t)$ (рис. 2.21). Обратит внимание на то, что входное напряжение в RL -цепи опережает ток.

Включить курсор А и установить его в нуле графика $U_1(t)$ с положительной производной. Курсор В установить в нуле графика $U_2(t)$ с положительной производной. Значение $B - A = T_2 - T_1$ определяет временной сдвиг осциллограммы сигнального напряжения

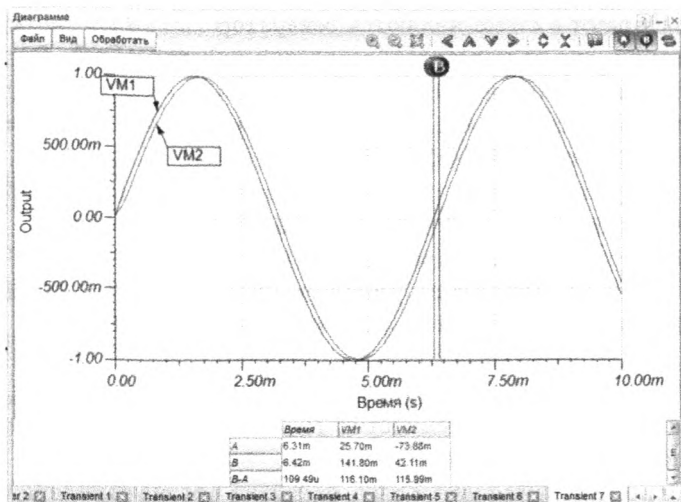


Рис. 2.21. Измерение разности фаз в режиме *переходной процесс*

относительно осциллограммы напряжения $U_2(t)$, пропорционального току и совпадающего с ним по фазе. Разность фаз рассчитывается по формуле $\varphi = 2\pi f(T_2 - T_1)$.

5. Повторить исследования по п. 4 для частот f_1 и $10f_1$.

Используя режим *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока*, записать значения напряжения и фазы для $U_1(t)$, $U_2(t)$ и $I(t)$.

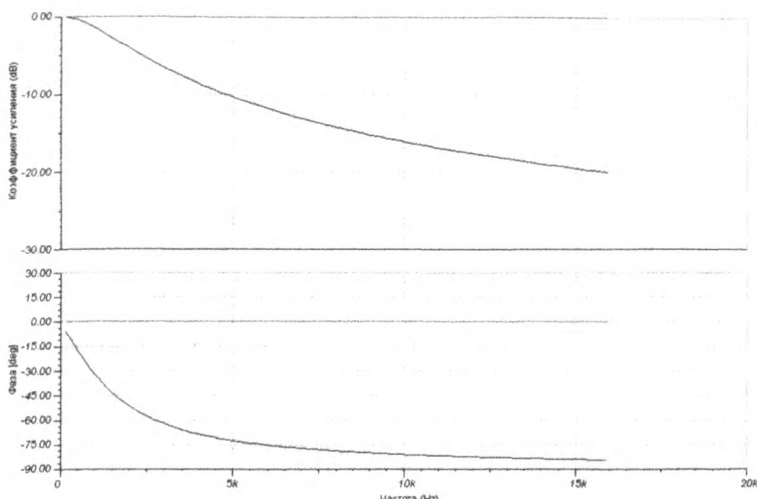
6. В режиме *Анализ — Переходный процесс* установить *Запустить показ = 0*, *Окончить показ = 1m* и получить графики напряжений $U_1(t)$, $U_2(t)$.

7. В режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока* в диапазоне частот $0,1f_1 \dots 10f_1$ с линейной разверткой получить графики АЧХ и ФЧХ (рис. 2.22). Обратите внимание на то, что ФЧХ показывает разность фаз между выходным напряжением, пропорциональным току, и входным напряжением $\psi(f) = \psi_{U_2}(f) - \psi_{U_1}(f)$. Так как в RL -цепи ток отстает от входного напряжения, график ФЧХ находится в отрицательной области и изменяется от нуля до -90° .

8. Включить между точками 1А и 2А ёмкость C_a и рассчитать частоту сигнала генератора напряжения f_2 , при которой реактивное сопротивление емкости равно сопротивлению $R_1 = 100 \text{ Ом}$:

$$X_c = \frac{1}{2\pi} f_2 C_a = R_1.$$

Повторить исследования по пп. 4–7.

Рис. 2.22. АЧХ и ФЧХ для RL -цепи

В. Исследование RLC -цепи

9. Включить между точками 1А и 2А последовательно индуктивность L_a и ёмкость C_a . Исследовать амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики RLC -цепи по методике из примера 7. Определить частоту последовательного резонанса в цепи.

10. Сделать резистор R1 управляемым параметром и задать ему четыре значения от 100 Ом до 1600 Ом с шагом 500 Ом. Для этого щёлкаем по резистору, в строчке *Сопrotивление* щёлкаем по кнопке *...*, в появившемся окне устанавливаем параметры (рис. 2.23).

Далее выбираем *Анализ — Режим* и устанавливаем параметры (рис. 2.24).

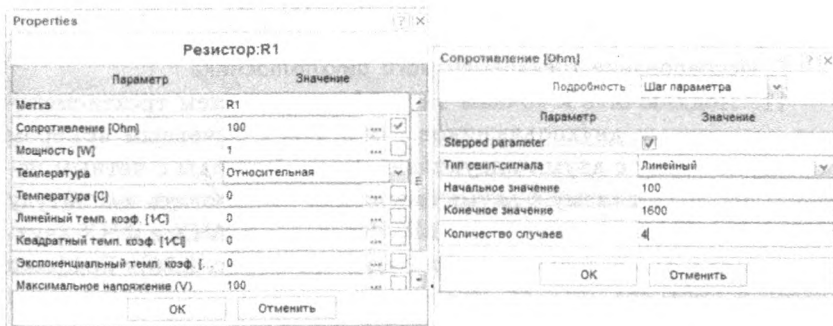


Рис. 2.23. Установка шага параметров резистора

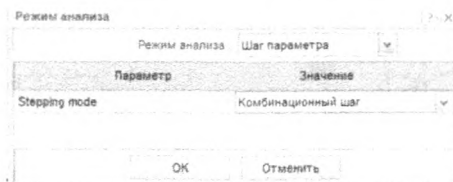


Рис. 2.24. Выбор режима анализа

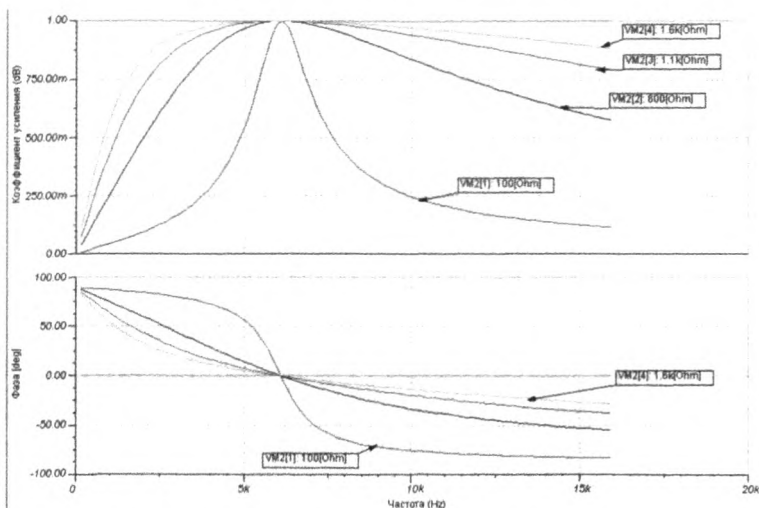


Рис. 2.25. Графики АЧХ и ФЧХ для разных потерь в контуре

После этого выполняем Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока и получаем графики АЧХ и ФЧХ для различных значений сопротивления потерь в контуре (рис. 2.25).

Объяснить влияние сопротивления потерь на форму резонансных кривых.

Г. Исследование трёхэлементного двухполюсника

11. Подключить к точкам 1А и 2А одну из схем трёхэлементных реактивных двухполюсников. Бригады с нечётным номером исследуют схему с двумя индуктивностями. Бригады с чётным номером исследуют схему с двумя ёмкостями. Установить амплитуду сигнала генератора напряжения 1 В. Исследовать АЧХ и ФЧХ двухполюсника в диапазоне частот от 2 до 20 кГц (рис. 2.26). Графики внести в протокол.

12. Используя режим Анализ — Анализ переменного тока — Узловые напряжения, в диапазоне частот от 2 кГц до 20 кГц из-

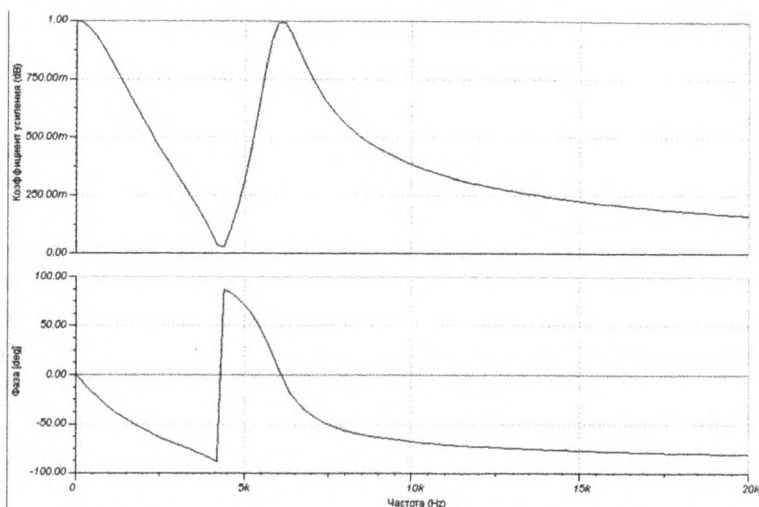


Рис. 2.26. АЧХ и ФЧХ для двухполюсника с параметрами $L_a = 10$ мГн, $L_b = 10$ мГн, $C_a = 68$ нФ

мерить напряжения и фазы в узлах 1А и 2А. Результаты записать в табл. 2.2.

Таблица 2.2

№	f , кГц	U_1	φ_1	U_2	φ_2	I	$Z_{вх}$	$ Z_{вх} $

13. Для схемы с трёхэлементным двухполюсником на частоте, $f = N_B + 2$ кГц (N_B — номер бригады), измерить напряжения и фазы в точках схемы 1А, 2А, d. Результаты записать в табл. 2.3.

Таблица 2.2

U_{1A}	φ_{1A}	U_{2A}	φ_{2A}	U_d	φ_d

Д. Преобразование формы сигнала в частотно-зависимых цепях

14. Переключить генератор в режим прямоугольных импульсов. Для нечётных бригад собрать RL -цепь из п. 1, для чётных бригад собрать RC -цепь из п. 8. Наблюдать на осциллографе изменение формы прямоугольных импульсов на выходе цепи. Зарисовать осциллограммы.

15. Представить результаты измерений преподавателю и после его проверки и одобрения выключить приборы и разобрать схему.

Домашнее расчётное задание

1. По экспериментальным данным построить амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики исследованных цепей, векторные диаграммы токов и напряжений.

2. По экспериментальным данным пп. 8 и 9 для одной из частот в середине исследованного диапазона рассчитать сопротивление потерь катушки индуктивности R_L и проводимость потерь конденсатора G_C . Для этого надо рассчитать комплексное входное сопротивление реактивного двухполюсника, включённого между точками 1А и 2А, по формуле

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{U_1 - U_2}{U_2/R_1} = R_1 \left(\frac{U_1}{U_2} e^{j\varphi} - 1 \right)$$

и найти активные составляющие $R_L = R_{\text{вх}}$ или $G_C = 1/R_{\text{вх}}$. Найти добротность катушки $Q_L = X_L/R_L$ и конденсатора $Q_C = X_C G_C$.

3. Для цепей RL , RC и RLC с учётом потерь в катушке и конденсаторе рассчитать по формулам значения АЧХ и ФЧХ для двух частот внутри исследованного диапазона и сравнить с результатами эксперимента.

4. Для RLC -цепи рассчитать и построить векторную диаграмму тока и напряжений для значений фазового угла $\varphi = +45^\circ$ и $\varphi = -45^\circ$.

5. По данным п. 11 для каждой частоты рассчитать комплексное входное сопротивление реактивного двухполюсника, включённого между точками 1А и 2А, и модуль входного сопротивления. Результаты записать в табл. 2.2. Построить частотную характеристику модуля входного сопротивления трёхэлементного реактивного двухполюсника. Объяснить вид графиков.

6. По данным табл. 2.3 построить векторную диаграмму токов и напряжений в цепи. Используя диаграмму, рассчитать значения токов в ветвях трёхэлементного двухполюсника. Сравнить векторную диаграмму с полученной моделированием.

7. По данным п. 15 рабочего задания объяснить причины изменения формы сигнала в цепях RL и RC .

8. Сформулировать и записать выводы по результатам экспериментов и расчётов.

3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С МАГНИТНО-СВЯЗАННЫМИ КАТУШКАМИ

3.1. Краткие теоретические сведения и расчёт неразветвленных цепей

Катушки называют магнитно-связанными, если они имеют общее магнитное поле и взаимно влияют друг на друга. При изменении тока в одной катушке за счёт изменения общего магнитного поля, во второй катушке наводится напряжение взаимной индукции.

На рис. 3.1 катушки индуктивности L_1 и L_2 магнитно-связанные. На схеме это обозначается стрелкой с указанием взаимной индуктивности катушек M_{21} . Взаимная индуктивность M_{21} является коэффициентом пропорциональности между напряжением взаимной индукции, наводимым во второй катушке, и производной тока в первой катушке: $u_{2M}(t) = M_{21} \frac{di_1}{dt}$. Знак наводимого напряжения зависит от направления намотки катушек и направления токов в них. Если магнитные поля, создаваемые токами в катушках, складываются, такое включение катушек называют *согласным* и напряжения самоиндукции и взаимной индукции складываются. Если магнитные поля катушек вычитаются, включение катушек называют *встречным* и напряжения самоиндукции и взаимной индукции вычитаются.

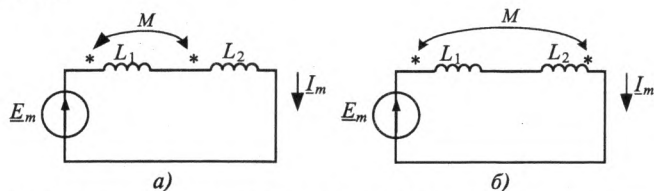


Рис. 3.1. Согласное (а) и встречное (б) включение катушек

В электрических схемах у магнитно-связанных катушек обозначают *Одноименные зажимы*, маркируя их звёздочками или кружочками. Если токи в катушках одинаково направлены относительно одноименных зажимов, включение является *согласным*. Если токи в катушках направлены неодинаково относительно одноименных зажимов, включение является *встречным*. В линейных элек-

трических цепях по принципу взаимности $M_{21} = M_{12} = M$. Коэффициент M называют взаимной индуктивностью катушек.

В схеме рис. 3.1,а катушки включены согласно. Составим уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} e(t) &= u_{L1} + u_{L2} = L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} = \\ &= L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + 2M \frac{di}{dt}. \end{aligned}$$

В символической форме получим уравнение

$$\underline{E}_m = j\omega L_1 \underline{I}_m + j\omega L_2 \underline{I}_m + 2jM \underline{I}_m = j\omega L_{\text{экв}} \underline{I}_m, \quad (3.1)$$

где $L_{\text{экв}} = L_1 + L_2 + 2M$.

Для встречного включения (рис. 3.1,б)

$$\underline{E}_m = j\omega L_1 \underline{I}_m + j\omega L_2 \underline{I}_m - 2jM \underline{I}_m = j\omega L_{\text{экв}} \underline{I}_m \quad (3.2)$$

и $L_{\text{экв}} = L_1 + L_2 - 2M$.

Пример 11. В схемах рис. 3.1 $L_1 = 2$ мГн, $L_2 = 4$ мГн, $M = 2$ мГн. Источник напряжения формирует сигнал $e(t) = \sin 1000t$ В. Рассчитать по формулам (3.1) и (3.2) комплексную амплитуду тока при согласном и встречном включении катушек.

Пример 12.

1. Собрать модель схемы с согласным включением катушек (рис. 3.2). В модели использованы связанные катушки (*Связанные катушки*) из группы *Трансформаторы*, вкладка *Основные*.

2. Установить параметры связанных катушек. Первая катушка с числом витков N_1 имеет индуктивность $L_{1's} = 2$ мГн. Вторая катушка с числом витков N_2 имеет индуктивность $L_{2's} = 4$ мГн. Взаимная индуктивность $M_1 = 1$ мГн (рис. 3.3).

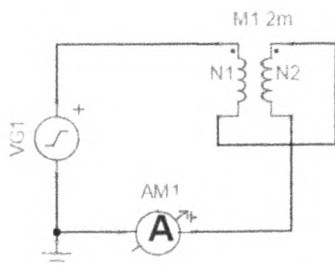


Рис. 3.2. Модель с согласным включением катушек

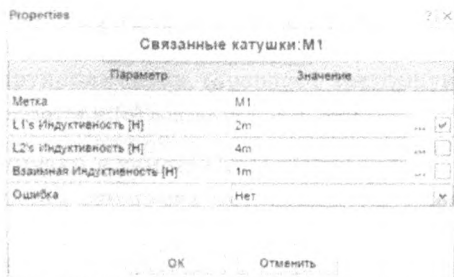


Рис. 3.3. Панель установки параметров связанных индуктивностей

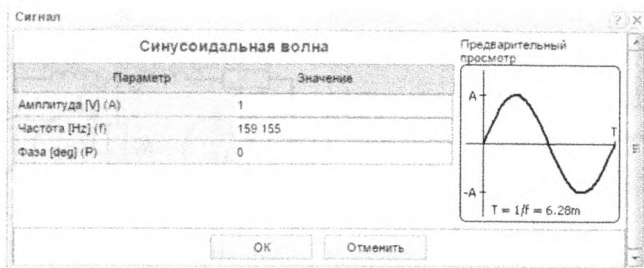


Рис. 3.4. Установка режима генератора напряжения

3. В генераторе напряжения установить амплитуду сигнала 1 В, частоту 159,155 Гц, что соответствует угловой частоте $\omega = 1000$ 1/с (рис. 3.4). Включить режим *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока*. Результаты показаны на рис. 3.5.

Важное замечание. В программе TINACloud в таблице результатов анализа на переменном токе указываются амплитудные значения токов и напряжений!

Значение амплитуды тока в амперметре равно 125 мА. Значит эквивалентное сопротивление двух согласно включённых катушек равно 8 Ом. В модели измерен ток в генераторе напряжения между узлами [1-0] $I_{VG1}[1,0] = 125e^{+j90^\circ}$. В исходной схеме ток имеет противоположное направление и равен $I_m = 125e^{-j90^\circ}$ мА. Сравните результаты моделирования и расчёта.

4. Провести аналогичное моделирование для катушек при встречном включении. Сравнить результаты расчёта и моделирования.

3.2. Составление уравнений для сложных цепей с магнитными связями

Для расчёта сложных цепей с магнитными связями составляют уравнения по законам Кирхгофа или по методу контурных токов. Метод узловых напряжений менее удобен, так как напряжения взаимной индукции выражаются через токи. Нельзя применять метод эквивалентного генератора, если есть магнитная связь внутренних и внешних цепей. Нельзя применять преобразование треугольник — звезда в схемах с взаимными индуктивностями.

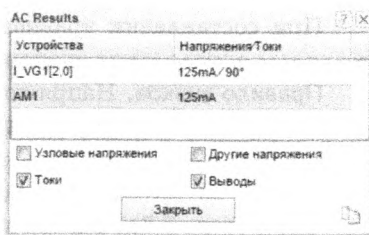


Рис. 3.5. Результаты моделирования для согласно включённых катушек

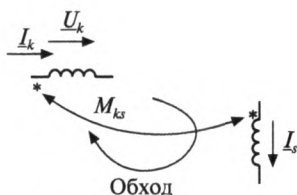


Рис. 3.6. Правило знаков

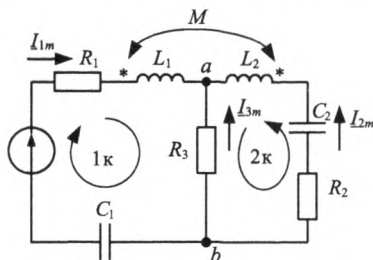


Рис. 3.7. Схема разветвлённой цепи с взаимной индуктивностью

При составлении уравнений можно пользоваться следующим правилом определения знаков в напряжениях взаимной индукции:

Правило знаков. Напряжение U_{ks} , наводимое на элемент k , равно $+j\omega M_{ks}I_s$, если направление обхода элемента k и ток I_s одинаково направлены относительно одноимённых зажимов (рис. 3.6).

Пример 13. Составить уравнения по законам Кирхгофа для расчёта цепи (рис. 3.7). Вычислить токи в ветвях.

Составим в символической форме три уравнения по первому и второму закону Кирхгофа для конкретных численных значений сопротивлений элементов и входного напряжения.

Исходные данные: $E_m = 16$ В; $R_1 = 2$ Ом; $R_2 = 2$ Ом; $R_3 = 2$ Ом; $X_{L1} = 4$ Ом; $X_{L2} = 4$ Ом; $X_M = 2$ Ом; $X_{C1} = 2$ Ом; $X_{C2} = 4$ Ом;

$$I_{1m} + I_{2m} + I_{3m} = 0;$$

$$I_{1m}R_1 + jX_{L1}I_{1m} + jX_M I_{2m} - I_{3m}R_3 - jX_{C1}I_{1m} = \underline{E}_m;$$

$$jX_{L2}I_{2m} + jX_M I_{1m} - jX_{C2}I_{2m} + I_{2m}R_2 - I_{3m}R_3 = 0.$$

Пояснения. Знак плюс в напряжении взаимной индукции ($jX_M I_{2m}$) во втором уравнении взят по *Правилу знаков*, так как направление обхода первого контура «входит» в зажим со звёздочкой и ток I_2 во второй катушке «входит» в зажим со звёздочкой. По той же причине в третьем уравнении с плюсом взято напряжение взаимной индукции ($jX_M I_{1m}$).

Решить уравнения и найти токи рекомендуется, используя Mathcad. Программа расчёта приведена в [8].

Пример 14. Собрать схему (рис. 3.8). Установить частоту генератора синусоидального сигнала $f = 159,155$ Гц, амплитуду сигнала 16 В. Параметры магнитно-связанных катушек: $L_{1's} = 4$ мГн, $L_{2's} = 4$ мГн, $M_1 = 2$ мГн. При этом угловая частота $\omega = 1000$ 1/с и реактивные сопротивления катушек и взаимной индуктивности

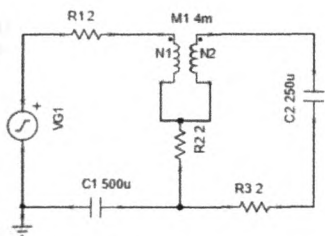


Рис. 3.8. Схема компьютерного моделирования разветвлённой цепи с взаимной индуктивностью

AC Results

Устройства	Напряжения/Токи
I_R1[2,5]	4A / -20.49u°
I_R2[4,1]	2.83A / -45°
I_R3[1,3]	2.83A / -135°
I_VG1[2,0]	4A / 180°

☐ Узловые напряжения ☐ Другие напряжения
☒ Токи ☒ Выводы

Заккрыть

Рис. 3.9. Таблица результатов моделирования разветвлённой цепи с взаимной индуктивностью

соответствуют исходным данным. Получить таблицу результатов (рис. 3.9).

В таблице (см. рис. 3.9) направления токов в элементах цепи определяется последовательностью нумерации узлов в квадратных скобках. Так ток генератора I_VG1 направлен от узла 1 к узлу 0 и имеет фазу 180°. Ток I_R1 направлен от узла 1 к узлу 3 и имеет нулевую фазу.

Сравните результаты расчётов и моделирования.

3.3. Развязка магнитно-связанных цепей

Развязкой называется замена магнитно-связанных цепей эквивалентными цепями без магнитных связей.

Правила развязки

1. Если одноименные зажимы двух магнитно-связанных индуктивностей *одинаково расположены* относительно узла (рис. 3.10,а), то эти две индуктивности можно заменить эквивалентной схемой (рис. 3.10,б) с тремя индуктивностями без магнитной связи.

2. Если одноименные зажимы двух магнитно-связанных индуктивностей *неодинаково расположены* относительно узла (рис. 3.11,а), то эти две индуктивности можно заменить эквивалентной схемой (рис. 3.11,б) с тремя индуктивностями без магнитной связи. Индуктивность с отрицательным значением ($-M$) имеет расчётный характер.

Пример 15. Выполним расчёт схемы (см. рис. 3.7) методом развязки.

В схеме (см. рис. 3.7) одноименные зажимы катушек одинаково расположены относительно узла а. Поэтому для развязки применяем эквивалентную схему рис. 3.10,б. Преобразованная схема без магнитных связей показана на рис. 3.12.

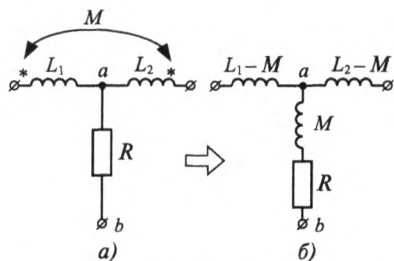


Рис. 3.10. Магнитно-связанные индуктивности (а) и эквивалентная схема б

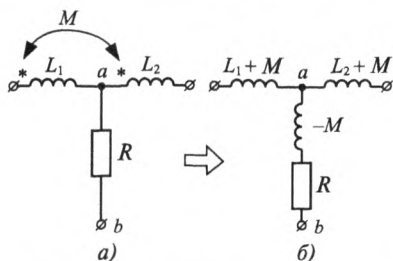


Рис. 3.11. Магнитно-связанные индуктивности (а) и эквивалентная схема б

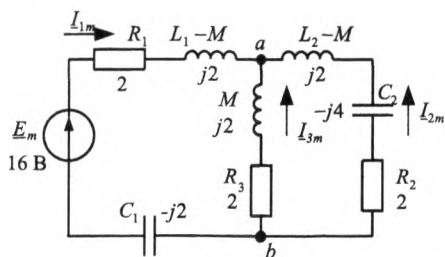


Рис. 3.12. Эквивалентная схема цепи после развязки

На схеме (рис. 3.12) у каждого элемента указаны значения комплексных сопротивлений в омах. Комплексная амплитуда источника напряжения равна 16 В. Расчёт схемы легко провести вручную. Находим эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей между узлами а-б:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{(2 + j2 - j4)(2 + j2)}{2 + j2 - j4 + 2 + j2} = 2 \text{ Ом.}$$

Находим входное сопротивление цепи:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = 2 + j2 + 2 - j2 = 4 \text{ Ом.}$$

Находим первый ток:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{\text{вх}}} = \frac{16}{4} = 4 \text{ А.}$$

Находим напряжение между узлами:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_1 \underline{Z}_{ab} = 8 \text{ В.}$$

Находим токи во второй и третьей ветви:

$$\underline{I}_2 = \frac{-8}{2 - j2} = -2 - j2 \text{ А} = 2,83e^{-j135^\circ};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{-8}{2 + j2} = -2 + j2 \text{ А} = 2,83e^{+j135^\circ}.$$

Итак, с помощью развязки мы очень просто получили те же результаты.

3.4. Линейный трансформатор

Трансформатором называется устройство для передачи энергии из одной части цепи в другую посредством электромагнитной индукции.

Схема линейного трансформатора показана на рис. 3.13. В первичной обмотке действует источник переменного напряжения \underline{E}_1 , первичная обмотка имеет индуктивность L_1 и сопротивление R_1 . Вторичная обмотка имеет индуктивность L_2 и сопротивление R_2 .

Во вторичной обмотке трансформатора включена комплексная нагрузка $\underline{Z}_н = R_н + jX_н$.

Составим уравнения трансформатора по второму закону Кирхгофа. Направления обхода контуров показаны на схеме.

$$R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 = \underline{E}_1;$$

$$\underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 R_н + jX_н \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 = 0.$$

По этим уравнениям строим векторную диаграмму токов и напряжений в трансформаторе (рис. 3.14). Диаграмму строим в такой последовательности: \underline{I}_2 , $R_н \underline{I}_2$, $jX_н \underline{I}_2$, $j\omega L_2 \underline{I}_2$, $R_2 \underline{I}_2$, $-j\omega M \underline{I}_1$.

При построении диаграммы мы будем считать, что реактивное сопротивление нагрузки имеет индуктивный характер. Поэтому на диаграмме вектор напряжения $jX_н \underline{I}_2$ опережает ток \underline{I}_2 на 90° .

Вектор $-j\omega M \underline{I}_1$ замыкает диаграмму напряжений вторичного контура, в котором нет источников напряжения. По этому вектору находим вектор тока \underline{I}_1 , повернутый на $+90^\circ$ и уменьшенный по длине в ωM раз. Далее строим: $j\omega L_1 \underline{I}_1$, $-j\omega M \underline{I}_2$, $R_1 \underline{I}_1$, \underline{E}_1 .

В схеме линейного трансформатора (рис. 3.13) токи не изменятся, если соединить точки a и b в узел ab . После этого воспользуемся правилом развязки магнитно-связанных цепей. К узлу ab катушки трансформатора подключены одинаково (зажимами без звёздочек).

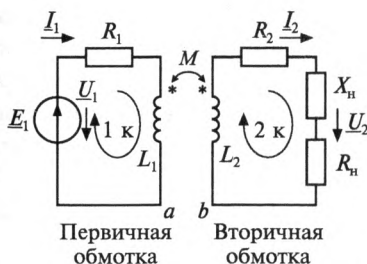


Рис. 3.13. Схема линейного трансформатора

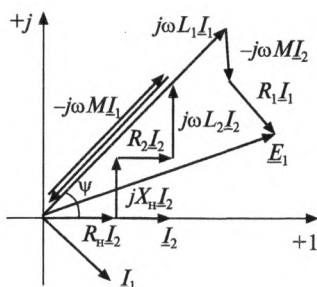


Рис. 3.14. Векторная диаграмма трансформатора

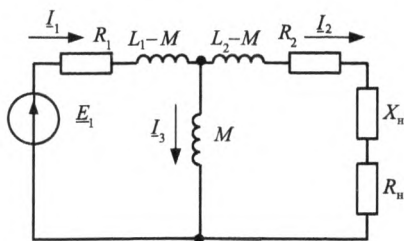


Рис. 3.15. Схема замещения линейного трансформатора

Поэтому преобразуем трансформатор по схеме рис. 3.3,б и получим схему замещения линейного трансформатора (рис. 3.15) без магнитных связей, в которой контуры связаны электрически через сопротивление общей ветви.

Важными характеристиками трансформатора являются коэффициент трансформации по

напряжению $n_U = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}$ (w_2, w_1 — число витков вторичной и первичной обмотки), коэффициент трансформации по току $n_I = \frac{I_1}{I_2}$, коэффициент трансформации по сопротивлению $n_Z = \frac{Z_2}{Z_{вх}} = \frac{U_2 I_1}{I_2 U_1} = n_U n_I$.

В трансформаторе с одинаковыми обмотками ($w_2 = w_1$) в схеме замещения (рис. 3.15) индуктивности $L_1 - M$, $L_2 - M$ имеют смысл индуктивностей рассеяния, индуктивность M называют индуктивностью намагничивания.

Пример 16. В схеме линейного трансформатора (см. рис. 3.13) амплитуда источника напряжения $E_{1m} = 100$ В, $L_1 = 200$ мГн, $L_2 = 400$ мГн, $M = 200$ мГн, $R_1 = R_2 = 50$ Ом, $R_n = 100$ Ом, $L_n = 100$ мГн. Частота сигнала генератора $f = 159,155$ Гц. Найти напряжение на нагрузке.

Рекомендации. Можно воспользоваться уравнениями трансформатора (3.5), вычислить ток I_{2m} и затем найти напряжение на нагрузке.

Пример 17. Компьютерное моделирование линейного трансформатора.

В программе TINA Cloud линейные трансформаторы представлены только двумя идеальными моделями. Идеальный линейный трансформатор характеризуется только одним параметром — коэффициентом трансформации по напряжению $n_U = U_2/U_1$. На панели компонентов в группе *Трансформаторы* есть две модели идеального трансформатора. На рис. 3.16 показана схема моделирования идеального трансформатора с коэффициентом трансформации $n_U = 2$.

Проверьте, что в идеальном трансформаторе выходное напряжение не зависит от нагрузки R_1 .

Линейный трансформатор с потерями (см. рис. 3.13) можно смоделировать, используя связанные индуктивности (*Связанные ка-*

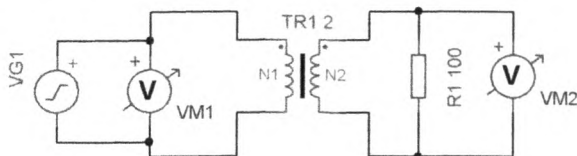


Рис. 3.16. Модель идеального трансформатора

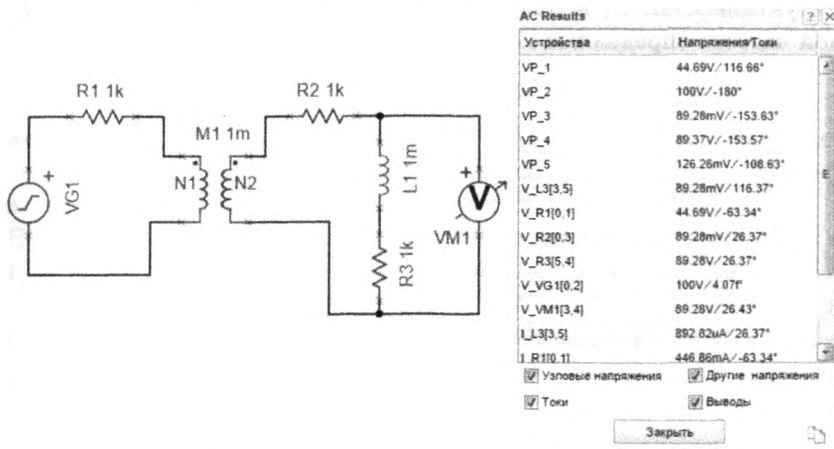


Рис. 3.17. Схема моделирования линейного трансформатора

тушки) из группы Трансформаторы. Схема моделирования цепи (см. рис. 3.12) показана на рис. 3.17. В схеме установить $f = 159,155$ Гц; $E_{1m} = 100$ В, $L_1 = 200$ мГн, $L_2 = 400$ мГн, $M = 200$ мГн, $R_1 = R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 100$ кОм, $L_3 = 100$ мГн.

3.5. Энергетические соотношения в трансформаторе

Комплексная мощность, передаваемая из первичной обмотки во вторичную, равна

$$\tilde{S} = \underline{E}_{2M} \underline{I}_2^* = E_{2M} I_2 \cos \psi + j E_{2M} I_2 \sin \psi = P_2 + j Q_2,$$

где $\underline{E}_{2M} = j \underline{I}_1 X_M = E_{2M} \cos \psi + j E_{2M} \sin \psi$ — ЭДС взаимоиндукции, наводимая магнитным потоком во вторичной обмотке (при встречном включении катушек); $I_2 = I_2$ — ток вторичной цепи трансформатора; ψ — угол между векторами E_{2M} и I_2 (см. рис. 3.14).

Так как $E_{2M} \cos \psi = I_2 R_n + I_2 R_2$ (см. векторную диаграмму), то активная мощность $P_2 = E_{2M} I_2 \cos \psi = I_2^2 R_n + I_2^2 R_2$. Реактивная мощность $Q_2 = E_{2M} I_2 \sin \psi = I_2^2 X_2 + I_2^2 X_{2n}$. Активная мощность,

потребляемая нагруженным трансформатором,

$$P = I_1^2 R_1 + P_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 (R_{\text{н}} + R_2) = U_1 I_1 \cos \varphi_{\text{вх}}.$$

3.6. Определение параметров магнитно-связанных катушек

Реальная катушка индуктивности характеризуется собственной индуктивностью L_1 и сопротивлением потерь R_1 , которые на каждой частоте определяют комплексное сопротивление катушки

$$\underline{Z}_1(\omega) = R_1 + j\omega L_1 = Z_1 \cos \varphi_1 + j Z_1 \sin \varphi_1 = Z_1 e^{j\varphi_1},$$

где $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = U_1/I_1$, $\varphi_1 = \arctg(X_1/R_1) = \varphi_U - \varphi_I$ — угол фазового сдвига между напряжением U_1 и током I_1 .

Пример 18. Для измерения параметров катушки L_1 установите в генераторе напряжения синусоидальный сигнал с амплитудой 1 В и частотой 159,155 Гц. Установите индуктивность катушки 10 мГн и сопротивление потерь $R_{\text{Сер}} = 10$ Ом. В режиме *Анализ переменного тока* — *Таблица результатов переменного тока* получите таблицу напряжений и токов и рассчитайте параметры катушки Z_1 , R_1 , X_1 (рис. 3.18).

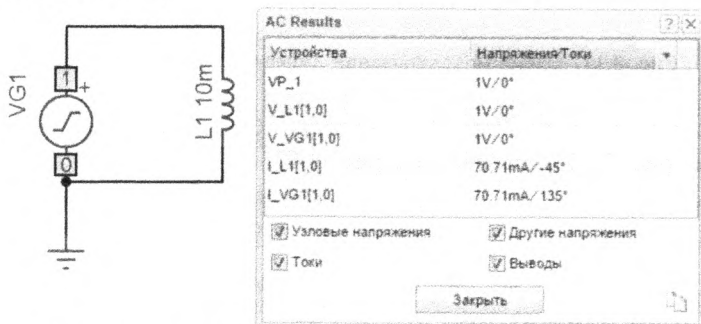


Рис. 3.18. Измерение параметров катушки индуктивности

3.7. Измерение сопротивления магнитной связи

Для определения сопротивления магнитной связи X_M следует катушки L_1 и L_2 соединить последовательно и измерить реактивное сопротивление при согласном включении $X_{\text{согл}}$ и при встречном $X_{\text{встр}}$. Одноименные зажимы катушек обозначены звёздочками.

Реактивное сопротивление $X_{\text{согл}}$ при согласном включении больше, чем сопротивление $X_{\text{встр}}$ при встречном включении. Сопротивление магнитной связи X_M определяется по формуле $X_M = \omega M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4}$. Здесь ω — круговая частота напряжения источника.

Сопротивление магнитной связи можно также определить в схеме (см. рис. 3.17) другим способом. Для этого надо измерить ток в первой катушке I_1 и напряжение U_2 на разомкнутой второй катушке L_2 (при отключённой нагрузке R_3 и L_3) и подсчитать $X_{M12} = U_2/I_1$. Если поменять катушки L_1 и L_2 местами и измерить значения тока I_2 и напряжения U_1 на разомкнутой обмотке первой катушки L_1 , то можно подсчитать $X_{M21} = U_1/I_2$. Эти эксперименты должны подтвердить, что $X_{M12} = X_{M21} = X_M$.

3.8. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Объясните смысл понятия взаимной индукции катушек.
2. Какое включение катушек называют согласным, а какое встречным?
3. Какие приборы нужны для определения «одноименных» зажимов двух катушек? Как провести такой эксперимент?
4. Запишите уравнения в символической форме по второму закону Кирхгофа для схемы рис. 3.2, если на входе действует напряжение U . Постройте векторную диаграмму напряжений в этой схеме.
5. Выполните задание п. 4 для схемы рис. 3.2, если катушки будут включены встречно.
6. Как рассчитать эквивалентную индуктивность при последовательном согласном включении магнитно-связанных катушек?
7. Как рассчитать эквивалентную индуктивность при последовательном встречном включении магнитно-связанных катушек?
8. Докажите расчётную формулу $X_M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4}$.
9. Какими способами можно менять взаимную индуктивность двух катушек?
10. Как работает линейный трансформатор и для чего он используется?
11. Пользуясь правилом развязки, нарисуйте схему замещения линейного трансформатора без магнитных связей.
12. Выполнить пункты, обязательные для всех лабораторных работ (см. главу 1).

3.9. Лабораторная работа №3. Исследование электрических цепей, содержащих магнитно-связанные катушки

Цель работы — определение параметров магнитно-связанных катушек, изучение распределения токов, напряжений и мощностей в цепях с взаимной индуктивностью.

Часть I. Определение параметров катушек и сопротивления взаимной индукции

1. Собрать схему рис. 3.19. Установить напряжение генератора на первичной обмотке примерно 1 В. Частоту генератора установить по номеру бригады в соответствии с формулой: $f_{(\kappa \Gamma \Pi)} = 2,5 + 0,5N$, где N — номер бригады.

На панели компонентов *Основное* выбрать связанные индуктивности (*Связанные катушки*). Значение индуктивности $L_1 = L_a$ из табл. 2.1 лабораторной работы № 2, $L_2 = L_b$, $M = 0,5L_a$ для нечётных бригад, $M = 0,5L_b$ для чётных бригад. Резисторы R_1 и R_2 моделируют потери в катушках, так как компонент «связанные индуктивности» является идеальным и не содержит потерь.

Ключи А, В, С, D поставить в левое положение, ключи Е, N — вверх. Выбрать режим измерений и записать в табл. 3.1 результаты замера 1 (U_1 , I_1 , φ_{I_1} , U_2). Обратите внимание на то, что $\varphi_{I_1} = \varphi_U - \varphi_I = \varphi_{VG1} - \varphi_{IR1}$.

2. В модели (см. рис. 3.19) подключить к генератору катушку 2. Для этого поставить ключи: А, D — вправо, В, С — влево, Е, N — вверх. Результаты замера 2 (U_2 , I_2 , φ_{I_2} , U_1) записать в табл. 3.1.

4. Произвести расчёт параметров обеих катушек и сопротивления взаимной индукции. Результаты расчёта записать в табл. 3.1. Убедиться, что $X_{M12} = X_{M21} = X_M$.

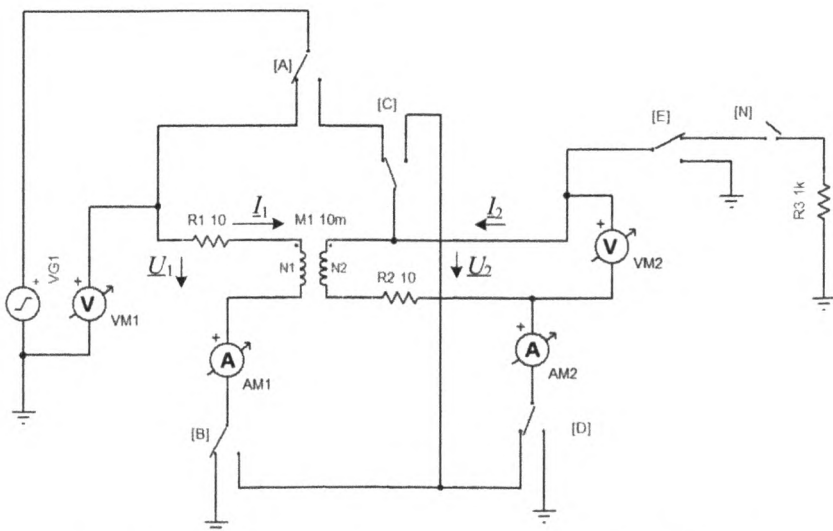


Рис. 3.19. Схема моделирования магнитно-связанных катушек

Таблица 3.1

Эксперимент				Расчет			
Замер 1	$U_1 =$	$I_1 =$	$\varphi_{I_1} =$	$U_2 =$	$Z_1 =$	$R_1 =$	$X_{M12} =$
Замер 2	$U_2 =$	$I_2 =$	$\varphi_{I_2} =$	$U_1 =$	$Z_2 =$	$R_2 =$	$X_{M21} =$
Замер 3	$U_1 =$	$I_1 =$	$\varphi_{I_1} =$		$Z_3 =$	$R_3 =$	$X_{M12} =$
Замер 4	$U_1 =$	$I_1 =$	$\varphi_{I_1} =$		$Z_3 =$	$R_3 =$	$X_{M12} =$
Замер 5	$U_1 =$	$I_1 =$	$\varphi_{I_1} =$	$U_2 = 0; I_2 = 0$			
Замер 6	$U_1 =$	$I_1 =$	$\varphi_{I_1} =$	$U_2 = I_2 =$			

Часть 2. Последовательное соединение катушек

5. Собрать схему с двумя последовательно соединёнными магнитно-связанными катушками. Включить катушки согласно. Для этого поставить ключи А влево, В, D, С — вправо, Е, N — вверх. Записать результаты измерений (замер 3).

6. Включить катушки встречно. Для этого поставить ключи А, С, D влево, В — вправо, Е — вниз, N — вверх. Записать результаты измерений (замер 4).

Используя данные замеров 3 и 4, подсчитать полное сопротивление катушек в обоих случаях и, основываясь на этих данных, подтвердить, какой из опытов соответствует согласному и какой встречному включению.

7. Используя замеры 3 и 4 и подсчитанные ранее параметры катушек, начертить в масштабе векторные диаграммы тока и напряжений для обоих случаев их соединения.

Часть 3. Исследование работы трансформатора

8. Собрать схему моделирования трансформатора. Для этого поставить ключи: А, В, С влево, D вправо, Е вверх. Для $R_n = \infty$ ключ N поставить вверх, для $R_n = R_3$ ключ N поставить вниз.

Значение R_3 рассчитать по формуле $R_3 (\text{Ом}) = 500 + 200N$, где N — номер бригады.

Записать показания приборов для двух режимов: а) $R_n = \infty$ (х.х.); б) $R_n = R_3$. Результаты (замер 5 и замер 6) записать в табл. 3.1.

Домашнее расчётное задание

1. Результаты расчёта параметров обеих катушек и сопротивления взаимной индукции записать в табл. 3.1. Убедиться, что $X_{M12} = X_{M21} = X_M$.

2. Используя замеры 3 и 4 и подсчитанные ранее параметры катушек, начертить в масштабе векторные диаграммы для обоих случаев их соединения.

3. По данным замеров 5 и 6 построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для первичного и вторичного контуров в режимах «а» и «б».

4. По векторной диаграмме, соответствующей режиму «б», вычислить активную мощность нагрузки; активную мощность, поглощаемую обеими обмотками трансформатора; мощность P_2 , передаваемую магнитным полем из первичной обмотки в вторичную. Подсчитать баланс активных мощностей: а) во всей схеме и б) отдельно для вторичной цепи.

5. Используя найденные экспериментально параметры катушек линейного трансформатора и сопротивление магнитной связи, составить схему замещения линейного трансформатора и выполнить теоретический расчёт токов для $R_n = R_3$.

4 ЛИНЕЙНЫЕ ПАССИВНЫЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКИ

4.1. Краткие теоретические сведения

Пассивный линейный четырёхполюсник представляет собой элемент цепи, не содержащий источников энергии и имеющий два входных (первичных) ($a - b$) и два выходных (вторичных) ($m - n$) зажима (рис. 4.1).

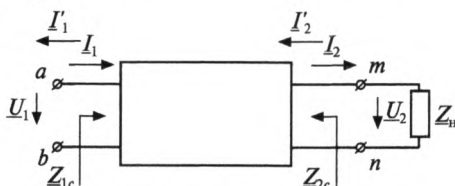


Рис. 4.1. Схема четырёхполюсника

Основные уравнения четырёхполюсника могут быть записаны в шести различных формах, использующих параметры Y , Z , A , B , H , G .

Форма Y выражает токи I_1 и I_2' через проводимости и напряжения:

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2;$$

$$I_2' = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2$$

Пассивные линейные четырёхполюсники являются *обратимыми*. Для них выполняется теорема взаимности и взаимные проводимости $Y_{12} = Y_{21}$.

Форма A выражает входное напряжение U_1 и входной ток I_1 через выходное напряжение U_2 и выходной ток I_2 . A -параметры применяются при анализе передачи энергии от входных зажимов к выходным зажимам. Для комплексных действующих значений уравнения четырёхполюсника в форме A имеют вид

$$U_1 = A_{11}U_2 + A_{12}I_2;$$

$$I_1 = A_{21}U_2 + A_{22}I_2.$$

Коэффициенты уравнений четырёхполюсника называют его параметрами. A -параметры четырёхполюсника иногда именуют как

коэффициенты A, B, C, D . Матрица А-параметров имеет вид

$$[A] = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}.$$

Определитель А-параметров пассивного линейного четырёхполюсника равен единице:

$$|A| = \underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1. \quad (4.2)$$

Это свойство надо использовать для проверки расчёта А-параметров. Так как четыре параметра пассивного линейного четырёхполюсника связаны уравнением (4.2), то независимыми являются только три параметра.

Физический смысл и непосредственное определение А-параметров:

$\underline{A}_{11} = \underline{U}_1/\underline{U}_2$ при $\underline{I}_2 = 0$ (режим холостого хода на выходе — ХХ2) — коэффициент трансформации по напряжению;

$\underline{A}_{22} = \underline{I}_1/\underline{I}_2$ при $\underline{U}_2 = 0$ (короткое замыкание на выходе — КЗ2) — коэффициент трансформации тока;

$\underline{A}_{12} = \underline{U}_1/\underline{I}_2$ при $\underline{U}_2 = 0$ — величина, обратная передаточной проводимости при КЗ2;

$\underline{A}_{21} = \underline{I}_1/\underline{U}_2$ при $\underline{I}_2 = 0$ — величина, обратная передаточному сопротивлению при ХХ2.

В симметричном четырёхполюснике (токи и напряжения во внешней цепи не меняются при перемене местами первичных и вторичных зажимов) выполняется равенство $\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22}$. Поэтому в симметричном пассивном линейном четырёхполюснике два независимых параметра.

Входное сопротивление четырёхполюсника со стороны первичных зажимов находим по формуле

$$\underline{Z}_{1\text{вх}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2}{\underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2} = \frac{\underline{A}_{11}\underline{U}_2/\underline{I}_2 + \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{U}_2/\underline{I}_2 + \underline{A}_{22}} = \frac{\underline{A}_{11}\underline{Z}_2 + \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{Z}_2 + \underline{A}_{22}}.$$

Входное сопротивление со стороны выходных зажимов находим по аналогичной формуле

$$\underline{Z}_{2\text{вх}} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{A}_{22}\underline{U}_1 + \underline{A}_{12}\underline{I}_1}{\underline{A}_{21}\underline{U}_1 + \underline{A}_{11}\underline{I}_1} = \frac{\underline{A}_{22}\underline{Z}_1 + \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{Z}_1 + \underline{A}_{11}}.$$

Из формул (4.1) и (4.2) следует, что четырёхполюсник преобразует (трансформирует) сопротивление нагрузки.

Частными случаями входных сопротивлений являются:

- сопротивления холостого хода

$$\underline{Z}_{1\text{вх}} = \underline{Z}_{1x} = \frac{A_{11}}{A_{21}} \text{ при } \underline{Z}_2 = \infty \text{ и } \underline{Z}_{2\text{вх}} = \underline{Z}_{2x} = \frac{A_{22}}{A_{21}} \text{ при } \underline{Z}_1 = \infty;$$

- сопротивления короткого замыкания

$$\underline{Z}_{1\text{вх}} = \underline{Z}_{1k} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \text{ при } \underline{Z}_2 = 0 \text{ и } \underline{Z}_{2\text{вх}} = \underline{Z}_{2k} = \frac{A_{12}}{A_{11}} \text{ при } \underline{Z}_1 = 0.$$

В данной работе А-параметры определяются по входным сопротивлениям, полученным опытным путём в режимах холостого хода (х.х) и короткого замыкания (к.з), по формулам:

$$A_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x}}{\underline{Z}_{2x} - \underline{Z}_{2k}}}; \quad A_{12} = A_{11} \underline{Z}_{2k}; \quad A_{21} = \frac{A_{11}}{\underline{Z}_{1x}}; \quad A_{22} = A_{11} \frac{\underline{Z}_{2x}}{\underline{Z}_{1x}}.$$

Выбор нагрузки из условия выделения в ней максимальной мощности $P_{\text{макс}}$

Из теории известно, что при питании четырёхполюсника от источника ЭДС для того, чтобы в нагрузке $Z_H = R_H + jX_H$ выделилась максимально возможная активная мощность P_2 , необходимо, чтобы сопротивление нагрузки было комплексно сопряжённым с входным сопротивлением четырёхполюсника со стороны зажимов $m - n$ при короткозамкнутых зажимах $a - b$. Если $\underline{Z}_{\text{вх } mn} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}}$, то должно иметь место $\underline{Z}_H = R_H + jX_H = R_{\text{вх}} - jX_{\text{вх}} = \underline{Z}_{2K}^*$. Таким образом, $R_H = R_{\text{вх}}$ и $X_H = -X_{\text{вх}}$. При этом в нагрузке выделяется $P_{\text{макс}} = U_2^2 / 4R_H$, где U_2 — напряжение холостого хода на зажимах $m - n$ из опыта 1.

Схемы замещения четырёхполюсника

Если на некоторой фиксированной частоте определены А-параметры четырёхполюсника, в расчётах и экспериментах этот четырёхполюсник можно представить схемой замещения, которая имеет ту же матрицу А-параметров. Применяют две схемы замещения: Т-образная (рис. 4.2) и П-образная (рис. 4.3).

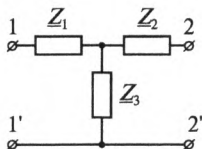


Рис. 4.2. Т-образная схема

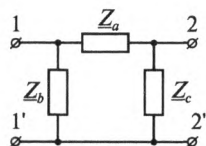


Рис. 4.3. П-образная схема

Расчёт элементов Т-образной схемы замещения через А-параметры четырёхполюсника проводят по формулам:

$$\underline{Z}_1 = \frac{A_{11} - 1}{A_{21}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{A_{22} - 1}{A_{21}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{A_{21}}.$$

Расчёт элементов П-образной схемы замещения проводят по формулам:

$$\underline{Z}_a = A_{12}; \quad \underline{Z}_b = \frac{A_{12}}{A_{22} - 1}; \quad \underline{Z}_c = \frac{A_{12}}{A_{11} - 1}.$$

Характеристические параметры четырёхполюсника

Характеристическими параметрами четырёхполюсника называют два характеристических сопротивления:

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}} = \sqrt{\underline{Z}_{1K}\underline{Z}_{1X}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{A_{22}A_{12}}{A_{21}A_{11}}} = \sqrt{\underline{Z}_{2K}\underline{Z}_{2X}}$$

и характеристическую постоянную передачи (меру передачи)

$$\underline{g} = \ln \left(\sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}} \right) = a + jb.$$

Характеристические сопротивления обладают таким свойством: если к вторичным зажимам подключить в качестве нагрузки \underline{Z}_{2C} , то входное сопротивление со стороны первичных зажимов будет равно \underline{Z}_{1C} , и наоборот, если к первичным зажимам подключить \underline{Z}_{1C} , то входное сопротивление со стороны выходных зажимов будет \underline{Z}_{2C} .

Четырёхполюсник, нагруженный на характеристическое сопротивление, называют *согласованным с нагрузкой*. Согласованный режим работы является весьма важным и часто используется на практике. Нагрузка, равная характеристическому сопротивлению, также называется *согласованной*.

В согласованном режиме напряжения на входе и выходе четырёхполюсника выражаются через характеристические параметры по формуле

$$\underline{U}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} \underline{U}_2 e^{\underline{g}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} \underline{U}_2 e^a e^{jb},$$

где a — характеристическое затухание четырёхполюсника; b — характеристическая фаза.

Комплексная передаточная функция четырёхполюсника выражается через А-параметры и сопротивление нагрузки следу-

ющей формулой:

$$K_U(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{A_{11}Z_2 + A_{12}} = K_U(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

4.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Какие цепи называют четырёхполюсниками?
2. Какими свойствами обладают линейные пассивные четырёхполюсники?
3. Что такое обратимые и симметричные четырёхполюсники?
4. Как экспериментально найти сопротивления холостого хода и короткого замыкания четырёхполюсника?
5. Каким свойством обладают А-параметры линейного пассивного четырёхполюсника?
6. Как рассчитать А-параметры линейного пассивного четырёхполюсника через параметры холостого хода и короткого замыкания?
7. Как подобрать для четырёхполюсника нагрузку, в которой будет выделяться наибольшая активная мощность?
8. Что такое схемы замещения четырёхполюсника?
9. Какие характеристические параметры имеет четырёхполюсник и как их можно рассчитать?
10. Что такое согласование четырёхполюсника с нагрузкой? Как можно рассчитать согласованный режим работы четырёхполюсника?
11. Выполнить пункты, обязательные для всех лабораторных работ (см. главу 1).

Предварительное расчётное задание

Четырёхполюсник имеет следующие сопротивления холостого хода и короткого замыкания: $Z_{1K} = j10 \text{ Ом}$, $Z_{1X} = -j2 \text{ Ом}$, $Z_{2K} = j15 \text{ Ом}$, $Z_{2X} = -j3 \text{ Ом}$.

Требуется:

1. Рассчитать А-параметры четырёхполюсника.
2. Записать уравнения четырёхполюсника через А-параметры.
2. Рассчитать Т-образную схему замещения.
3. По Т-образной схеме найти сопротивления холостого хода и короткого замыкания.
4. Рассчитать характеристические параметры четырёхполюсника.
5. Записать уравнения четырёхполюсника в согласованном режиме через характеристические параметры.

6. Для найденных А-параметров рассчитать комплексную передаточную функцию четырёхполюсника при сопротивлениях нагрузки $R_2 = 200 \text{ Ом}$ и 500 Ом .

4.3. Лабораторная работа № 4. Исследование четырёхполюсника

Цель работы — определение параметров линейного пассивного четырёхполюсника по входным сопротивлениям в режимах холостого хода и короткого замыкания, а также выбор сопротивления нагрузки четырёхполюсника из условия выделения в ней максимальной активной мощности

Четырёхполюсник с зажимами ab — mn собирается по схемам рис. 4.4 и должен содержать три реактивных элемента L_a , C_a , C_b . Схему надо выбрать по указанию преподавателя. Значения номиналов реактивных элементов для каждой бригады даны в табл. 2.1.

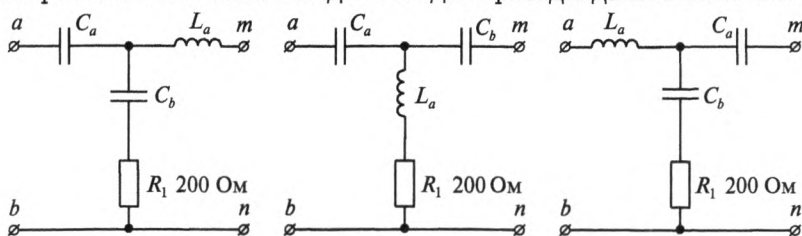


Рис. 4.4. Пример схемы четырёхполюсника

Лабораторное задание

1. Собрать схему рис. 4.5. В генераторе VG1 напряжения установить синусоидальный сигнал с амплитудой 1 В и частотой 1 кГц. Сигнал генератора ключом А подать на клемму 1А. Ключи В, К, С разомкнуть, ключ N замкнуть. Установить сопротивление нагрузки $R_2 = 1 \text{ Ом}$. Исследовать АЧХ напряжения на конденсаторе нагрузки C_3 . Для этого в меню выбрать *Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока*. Установить *Стартовая частота 1к*, *Конечная частота 20к* и получить график АЧХ в линейных масштабах по осям (рис. 4.6). Увеличив масштаб по оси частот от 8 до 10 кГц, найдём резонансную частоту четырёхполюсника $f_p = 9,75 \text{ кГц}$. Дальнейшие измерения надо проводить на частоте f_p .

На резонансной частоте в режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока* измерить и записать напряжение на конденсаторе нагрузки C_3 и ток в нагрузке, измеренный амперметром АМ2. Рассчитать реактивное сопротивление конденсатора нагрузки X_{C3} .

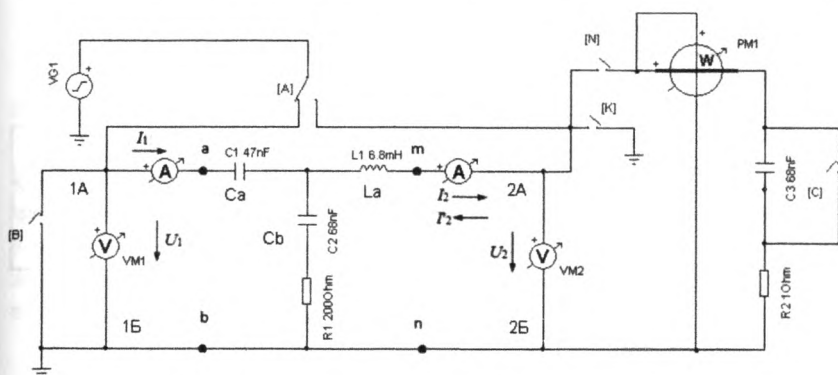


Рис. 4.5. Схема компьютерного моделирования четырёхполюсника

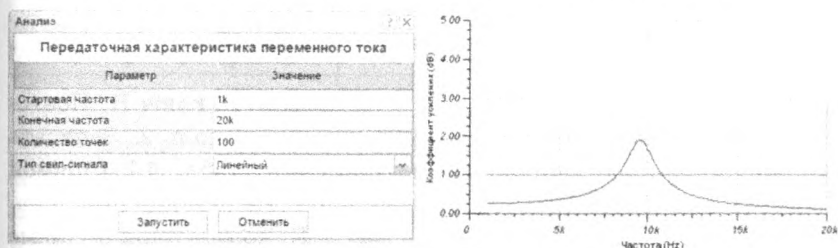


Рис. 4.6. Исследование АЧХ четырёхполюсника

Опыты холостого хода и короткого замыкания

2. Провести опыт прямого холостого хода. Для этого в схеме рис. 4.4 ключом А подать сигнал на клемму 1А, ключи В, К, N разомкнуть (рис. 4.7). В режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока* определить ток I_1 и напряжение U_1 . Обратите внимание, что в таблице результатов прямого опыта холостого хода XX1 измерен ток в генераторе напряжения I.VG1[1,0], направленный от узла 1 к узлу 0, т. е. противоположно току I_1 . Поэтому к фазе тока I.VG1[1,0] надо прибавить 180° . В результате получим $I_1 = 1,61e^{+j71,2^\circ}$ mA. Напряжение U_1 равно напряжению в первом узле VP_1 и составляет 1 В. Сдвиг фаз между током и напряжением $\varphi = \varphi_U - \varphi_I = -71,2^\circ$.

Результаты измерений записать в табл. 4.1 (прямой опыт XX1).

По этим данным можно подсчитать Z_{1X} :

$$Z_{1BX} = U_1/I_1; \quad R_{1X} = Z_{1BX} \cos \varphi_{1X}; \quad X_{1X} = Z_{1BX} \sin \varphi_{1X};$$

$$Z_{1X} = \sqrt{R_{1X}^2 + X_{1X}^2}; \quad \varphi_{1X} = \arctg \frac{X_{1X}}{R_{1X}}; \quad \underline{Z}_{1X} = Z_{1X} e^{j\varphi_{1X}}.$$

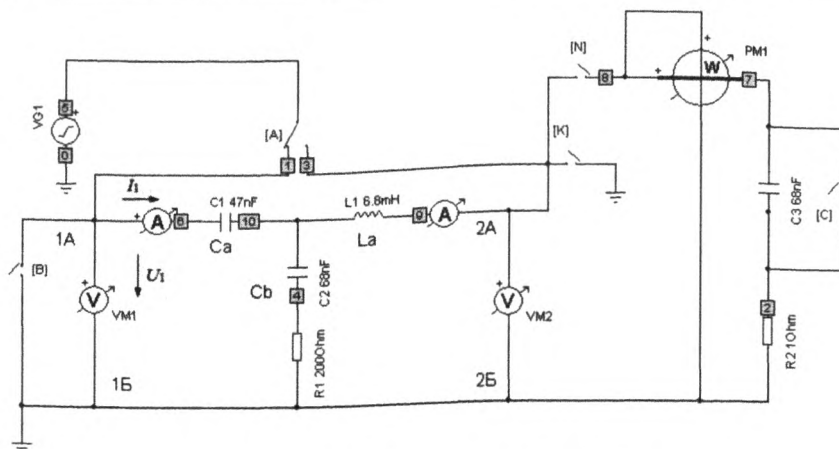


Рис. 4.7. Прямой опыт холостого хода XX1

AC Results	
Устройства	Напряжения/Токи
LL1[10,9]	679.28pA/52.83°
LR1[4,0]	1.61mA/71.2°
LR2[2,0]	503.56pA/21°
LVG1[5,0]	1.61mA/-108.8°
VP_1	1V/4.4°
VP_10	503.56mV/21°
VP_2	503.56pV/21°
<input checked="" type="checkbox"/> Условные напряжения <input type="checkbox"/> Другие напряжения <input checked="" type="checkbox"/> Токи <input type="checkbox"/> Выводы	
Закрыть	

Рис. 4.8. Таблица результатов прямого опыта XX1

3. Замкнут ключ К. Повторить измерения по п. 2. Записать результаты в табл. 4.1 (прямой опыт КЗ1). Рассчитать Z_{1K} .

4. В компьютерной схеме рис. 4.4 разомкнуть ключ К. Ключом А подать сигнал на клемму 2А, измерить и записать в табл. 4.1 напряжение U_2 , ток I'_2 и сдвиг фаз φ (опыт обратного холостого хода XX2). Рассчитать Z_{2X} .

5. Замкнуть ключ В. Повторить измерения по п. 4. Записать результаты в табл. 4.1 (обратный опыт КЗ2). Рассчитать Z_{2K} .

6. По данным опытов 2–5 проверить выполнение соотношения

$$Z_{1K}/Z_{1X} = Z_{2K}/Z_{2X}.$$

Таблица 4.1

Наименование опыта	U_1	U_2	I_1	I'_2	φ	Z
Прямой опыт XX						$Z_{1X} =$
Прямой опыт КЗ						$Z_{1K} =$
Обратный опыт XX						$Z_{2X} =$
Обратный опыт КЗ						$Z_{2K} =$

Испытание четырёхполюсника под нагрузкой

7. В компьютерной схеме рис. 4.4 ключом А подать сигнал на зажим 1А, ключ N замкнуть, ключи В, К и С разомкнуть.

Сопrotивление нагрузки R_2 изменять в пределах от 10 Ом до 200 Ом и в режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока* измерять мощность в нагрузке ваттметром. Результаты записать в табл. 4.2. Найти оптимальное значение нагрузки $R_{2\text{опт}}$, соответствующее максимальной мощности, выделяемой в нагрузке.

Таблица 4.2

$C_{\text{н выкл}}$	$R_2, \text{ Ом}$ $P_2, \text{ мкВт}$	10	200
$C_{\text{н выкл}}$	$R_2, \text{ Ом}$ $P_2, \text{ мкВт}$					

8. Замкнуть ключ С и закоротить конденсатор нагрузки. Повторить измерения мощности по п. 7. Результаты записать в табл. 4.2. Для оптимальной нагрузки записать комплексные значения напряжения и тока на входе и выходе четырёхполюсника.

9. Установить оптимальное значение активной нагрузки $R_{2\text{опт}}$, соответствующее максимальной активной мощности. Изменяя в небольших пределах частоту генератора, убедиться в снижении мощности P_2 при отклонении частоты от резонансной и нарушении согласования реактивных сопротивлений.

Определение оптимального сопротивления комплексной нагрузки

9. По данным опытов 1 и 7 записать оптимальное сопротивление комплексной нагрузки: $Z_{\text{н опт}} = R_{2\text{опт}} - jX_{C3}$.

10. Используя результаты из табл. 4.1, проверить условие согласования комплексной нагрузки с четырёхполюсником: $Z_{\text{н опт}} = Z_{2K}^*$.

Исследование передаточной функции четырёхполюсника

11. В компьютерной схеме рис. 4.4 к выходу четырёхполюсника $m - n$ подключить нагрузку R_2 без конденсатора. Изменяя сопротивление нагрузки от нуля до 200 Ом, измерить в режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока* напряжения на U_1 , U_2 и разность фаз φ .

Таблица 4.3

R_2	U_1	U_2	φ	K_{21}
0				
...				
R_{\max}				
Режим ХХ				

Провести измерения также для режима холостого хода, отключив сопротивление нагрузки. Вычислить комплексную передаточную функцию по напряжению: $K_{21} = \frac{U_2}{U_1} \exp(j\varphi)$. Результаты записать в табл. 4.3.

Домашнее задание

1. По данным табл. 4.1 рассчитать коэффициенты формы А и заданной преподавателем формы уравнений четырёхполюсника и сделать проверку правильности расчётов.

2. Используя А-параметры, рассчитать сопротивление нагрузки, при котором в ней выделяется наибольшая мощность. Сравнить с полученным экспериментально.

3. Построить графики зависимостей K_{21} и φ от величины сопротивления нагрузки R_2 .

4. Используя А-параметры, рассчитать теоретические зависимости K_{21} и φ от сопротивления нагрузки R_2 . Построить графики и сравнить с экспериментом.

5. Используя А-параметры и результаты измерений п. 8, рассчитать напряжение и ток на входе четырёхполюсника. Сравнить с опытным значением.

6. Рассчитать и нарисовать Т- и П-образные схемы замещения исследованного четырёхполюсника.

7. Рассчитать характеристические сопротивления четырёхполюсника и характеристическую постоянную передачи. Рассчитать напряжение и ток на выходе четырёхполюсника в согласованном режиме, если на входе действует напряжение, заданное в экспериментах.

5 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

5.1. Законы коммутации

Переходным процессом называется неустановившийся, нестационарный процесс, возникший при переходе из одного режима работы к другому. Всякие изменения и переключения в схеме называют коммутацией. В схеме рис. 5.1 в момент $t = 0$ происходит коммутация (в данном случае замыкание ключа). Режим работы цепи изменяется и возникает переходный процесс.

Считается, что коммутация происходит мгновенно в момент времени $t = 0$. Момент времени, предшествующий коммутации, обозначен $t = 0_-$. Момент времени, следующий сразу после коммутации, обозначен $t = 0_+$. Примем следующие значения параметров цепи: $E = 120$ В, $L = 10$ мГн, $C = 68$ нФ, $R_1 = R_2 = 1$ кОм.

До коммутации в момент $t = 0_-$ ток в индуктивности $i_1(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2}$. В индуктивности накоплена магнитная энергия $W_M(0_-) = Li_1^2(0_-)/2$.

Энергия не может измениться мгновенно, так как мощность всегда ограничена ($P(t) = \frac{dW}{dt} \neq \infty$). Поэтому в электрических цепях с постоянной индуктивностью действуют следующие законы.

Первый закон коммутации: ток в индуктивности до коммутации равен току в индуктивности в начальный момент после коммутации:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+).$$

Если при коммутации изменяется индуктивность, действует обобщенный первый закон коммутации для потокосцепления:

$$\Psi(0_-) = \Psi(0_+).$$

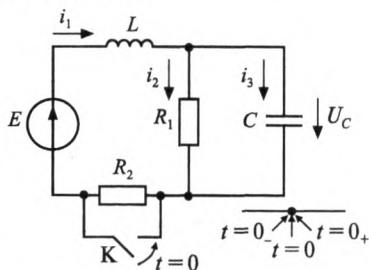


Рис. 5.1. Схема цепи с коммутирующим ключом К

Потокоцеплением называют произведение индуктивности на ток в ней.

До коммутации в момент $t = 0_-$ напряжение на ёмкости $u_C(0_-) = \frac{ER_1}{R_1 + R_2}$. На ёмкости накоплена электрическая энергия $W_э(0_-) = Cu_C^2(0_-)/2$. Электрическая энергия также не может изменяться мгновенно. Поэтому в электрической цепи с постоянной ёмкостью действует

Второй закон коммутации: *напряжение на ёмкости до коммутации равно напряжению на ёмкости в начальный момент после коммутации:*

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Если при коммутации изменяется ёмкость, действует обобщённый второй закон коммутации для зарядов:

$$q(0_-) = q(0_+).$$

Заряд равен произведению ёмкости на напряжение на ней.

Расчёт переходных процессов основан на использовании первого и второго закона коммутации.

Токи в индуктивностях и напряжения на ёмкостях не изменяются во время коммутации, определяют запас энергии в цепи и называются *независимыми начальными условиями*.

Переходные процессы в линейных электрических цепях описываются линейными дифференциальными уравнениями. Для цепи, показанной на рис. 5.1, систему дифференциальных уравнений составим по законам Кирхгофа:

$$i_1 = i_2 + i_3; \quad (5.1)$$

$$i_2 = \frac{u_C}{R_1}; \quad (5.2)$$

$$i_3 = C \frac{du_C}{dt}; \quad (5.3)$$

$$L \frac{di_1}{dt} + u_C = E. \quad (5.4)$$

Используя уравнения (5.1)–(5.3), преобразуем (5.4) к виду

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{1}{CR_1} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = \frac{E}{LC}. \quad (5.5)$$

Получили линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка.

Расчёт переходных процессов в линейной электрической цепи можно выполнить несколькими методами.

5.2. Классический метод расчёта переходных процессов

В классическом методе переходное напряжение или ток ищут как сумму свободной и принуждённой составляющей. Принуждённую составляющую находят расчётом послекоммутационной цепи в установившемся принуждённом режиме, когда после коммутации прошло много времени. Свободную составляющую ищут как общее решение однородного дифференциального уравнения при нулевом внешнем воздействии в виде:

$$u_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots, \quad (5.6)$$

где p_1, p_2, \dots — корни характеристического уравнения; A_1, A_2, \dots — неизвестные постоянные интегрирования.

Число корней характеристического уравнения и число неизвестных постоянных интегрирования равно порядку цепи, который определяется числом независимых накопительных реактивных элементов.

Для линейных цепей первого порядка характеристическое уравнение имеет один корень и свободная составляющая переходного процесса выражается одной экспоненциальной функцией из (5.6):

$$u_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p_1 t}.$$

Постоянной времени цепи первого порядка называют $\tau = 1/|p_1|$. При этом $u_{\text{св}}(t) = A_1 e^{-t/\tau}$.

Для линейных цепей второго порядка, которым соответствуют дифференциальные уравнения вида (5.5), характеристическое уравнение имеет следующий вид:

$$Z(p) = p^2 + 2\delta p + \omega_0^2 = 0.$$

Если $\delta > \omega_0$, корни характеристического уравнения отрицательные и разные. Переходный процесс описывается двумя затухающими экспонентами и называется аperiодическим.

Если $\delta < \omega_0$, корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряжёнными с отрицательной действительной частью. Переходный процесс имеет вид затухающих колебаний и называется колебательным.

Применим классический метод для теоретического анализа переходных процессов, которые будут исследоваться экспериментально в лабораторной работе.

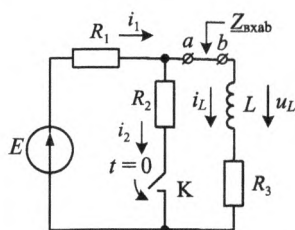


Рис. 5.2. Переходный процесс в RL -цепи

Пример 19. В схеме RL -цепи (рис. 5.2) ключ K замыкается в момент $t = 0$. Найти ток в индуктивности и напряжение на индуктивности после коммутации.

Параметры цепи: $E = 12$ В, $L = 1$ мГн, $R_1 = R_2 = R_3 = 2$ Ом.

Последовательность расчёта переходного процесса классическим методом

1. Расчёт режима до коммутации ($t = 0_-$), определение независимых начальных условий. Ток в индуктивности до коммутации $i_L(0_-) = E/(R_1 + R_3) = 3$ А $= i_L(0_+)$, так как на постоянном токе индуктивность имеет нулевое сопротивление.

2. Расчёт принуждённого режима ($t \rightarrow \infty$) после замыкания ключа и окончания переходного процесса:

$$i_1 = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = 4 \text{ А.}$$

По правилу деления токов находим принуждённый ток в индуктивности:

$$i_{L\text{пр}} = \frac{i_1 R_2}{R_2 + R_3} = 2 \text{ А.}$$

3. Составляем характеристическое уравнение. Для этого в послекоммутационной схеме разомкнём ветвь с индуктивностью между точками ab и найдём комплексное входное сопротивление:

$$\underline{Z}(j\omega) = j\omega L + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Заменим $j\omega$ на p и получим характеристическое уравнение

$$pL + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0.$$

Корень характеристического уравнения $p_1 = -3$ 1/с.

4. Свободную составляющую тока в индуктивности ищем в виде: $i_{L\text{св}}(t) = Ae^{p_1 t}$. Неизвестная постоянная интегрирования $A = i_L(0_+) - i_{L\text{пр}} = 1$ А.

5. Находим полный ток в индуктивности как сумму принуждённой и свободной составляющей:

$$i_L(t) = i_{L\text{пр}} + i_{L\text{св}}(t) = 2 + 1e^{-3t} \text{ А.}$$

6. Находим напряжение на индуктивности:

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -3e^{-3t} \text{ В.}$$

Пример 20. Выполнить компьютерное моделирование RL -цепи. Схема модели показана на рис. 5.3.

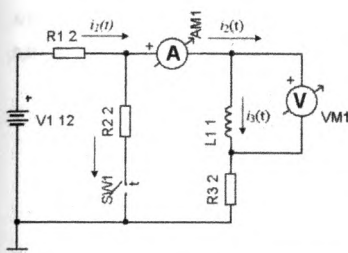


Рис. 5.3. Схема моделирования RL -цепи

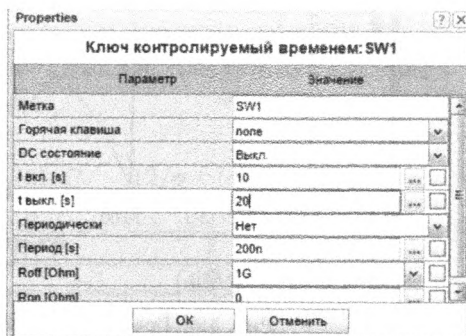


Рис. 5.4. Установка параметров ключа

В модели использован управляемый по времени ключ $SW1$. Для того чтобы наблюдать докоммутационный режим, момент замыкания ключа примем равным $t_{\text{вкл}} = 10$ с. Момент последующего размыкания $t_{\text{выкл}} = 20$ с (рис. 5.4). Режим непериодический. Формально требуется заполнить все данные в окне установки.

Теперь в главном меню выбираем *Анализ — Переходной процесс*. Устанавливаем параметры анализа и отображения переходного процесса. Начало отображения 9 с, конец отображения 12 с. Используем начальные условия (рис. 5.5).

Графики переходных процессов $i_3(t)$ и $u_L(t)$ отображаются в окне результатов (рис. 5.6) и совпадают с расчётными функциями.

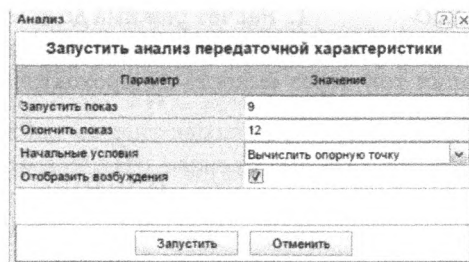


Рис. 5.5. Установка параметров переходного анализа

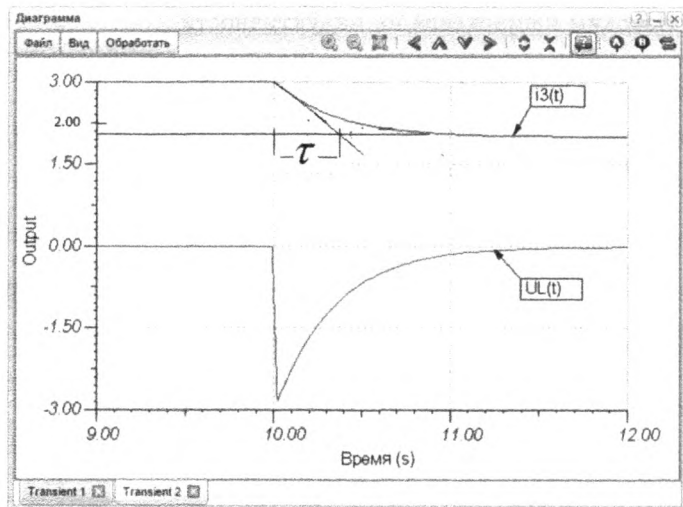
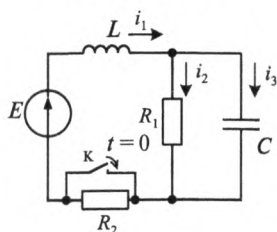


Рис. 5.6. Графики переходных процессов

По графику $i_3(t)$ определим постоянную времени цепи. Для этого из начала переходного процесса $i_3(10)$ проведём касательную. На пересечении с линией установившегося режима $i_3 = 2$ А получим отрезок $\tau = 1/3$ с.

5.3. Операторный метод расчёта переходных процессов

Рис. 5.7. Схема RLC -цепи

Пример 21. Схема RLC -цепи задана на рис. 5.7. $L = 4/3$ Гн, $C = 1/16$ Ф, $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $E = 12$ В. Найти напряжение на ёмкости после коммутации операторным методом.

Последовательность расчёта переходного процесса операторным методом

1. Расчёт режима до коммутации, определение независимых начальных условий.

До коммутации ток через ёмкость не проходит ($i_3 = 0$). Ток в индуктивности

$$i_L(0_-) = i_1(0_-) = i_2(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2} = 3 \text{ А.}$$

Напряжение на ёмкости $U_C(0_-) = 6$ В.

2. Составляем операторную схему замещения с внутренними источниками ЭДС, учитывающими начальные условия для тока в

индуктивности и напряжения на ёмкости (рис. 5.8). Внутренний источник ЭДС $Li(0)$ направлен согласно току. Внутренний источник ЭДС $U_C(0)/p$ направлен встречно току.

3. Расчёт изображений токов и напряжений в операторной схеме замещения. Вычислим напряжение $U_{ab}(p)$ методом двух узлов:

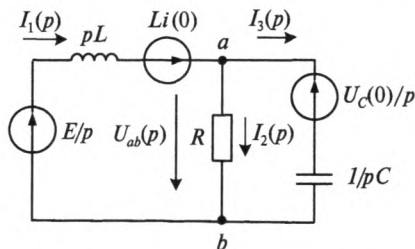


Рис. 5.8. Операторная схема замещения цепи

$$U_{ab}(P) = \frac{\frac{E/p + Li(0)}{pL} + \frac{U_C(0)pC}{p}}{\frac{1}{pL} + \frac{1}{R_1} + pC} = \frac{\frac{12/p + (4/3) \cdot 3}{(4/3)p} + 6 \cdot \frac{1}{16}}{\frac{1}{(4/3)p} + \frac{1}{2} + \frac{p}{16}} =$$

$$= \frac{6p^2 + 48p + 144}{p(p^2 + 8p + 12)} = \frac{A(p)}{B(p)}.$$

4. Вычислим оригинал напряжения $U_{ab}(t)$ по теореме разложения. Для этого:

- находим корни знаменателя $B(p) = p(p^2 + 8p + 12) = 0$: $p_1 = 0$, $p_2 = -2$ 1/с, $p_3 = -6$ 1/с;
- находим производную знаменателя $B'(p) = 3p^2 + 16p + 12$;
- вычисляем

$$\frac{A(p_1)}{B'(p_1)} = 12; \quad \frac{A(p_2)}{B'(p_2)} = -9; \quad \frac{A(p_3)}{B'(p_3)} = 12.$$

Теперь записываем по теореме разложения:

$$u_C(t) = \frac{A(p_1)}{B'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{A(p_2)}{B'(p_2)} e^{p_2 t} + \frac{A(p_3)}{B'(p_3)} e^{p_3 t} = 12 - 9e^{-2t} + 3e^{-6t} \text{ В.}$$

Построим график переходного процесса, используя Mathcad (рис. 5.9).

Пример 22. Схема компьютерного моделирования показана на рис. 5.10. Также как в примере №20 в модели использован управляемый по времени ключ $SW1$. Для того чтобы наблюдать докоммутационный режим, момент замыкания ключа установлен $t_{\text{вкл}} = 10$ с. Момент последующего размыкания $t_{\text{выкл}} = 20$ с (см. рис. 5.4). Режим неперiodический.

Теперь в главном меню выбираем Анализ — Переходной процесс. Устанавливаем параметры анализа и отображения переходного процесса. Начало отображения 9 с, конец отображения 15 с.

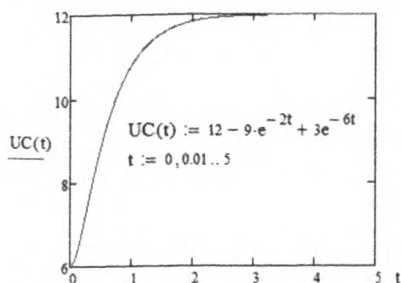


Рис. 5.9. График переходного процесса

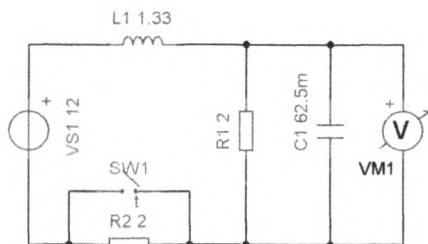


Рис. 5.10. Схема компьютерного моделирования

Используем начальные условия (см. рис. 5.5). График переходного процесса показан на рис. 5.11. На интервале времени от 10 до 15 с график совпадает с расчётным (см. рис. 5.9).

По графику видно, что переходной процесс в цепи имеет аperiодический характер. Переходной процесс будет колебательным, если корни характеристического уравнения станут комплексно-сопряжёнными. Составим для операторной схемы замещения (см. рис. 5.8) характеристическое уравнение

$$Z(p) = pL + \frac{R_1 \frac{1}{pC}}{R_1 + \frac{1}{pC}} = pL + \frac{R_1}{pR_1C + 1} = \frac{p^2 R_1 LC + pL + R_1}{pR_1C + 1} = 0.$$

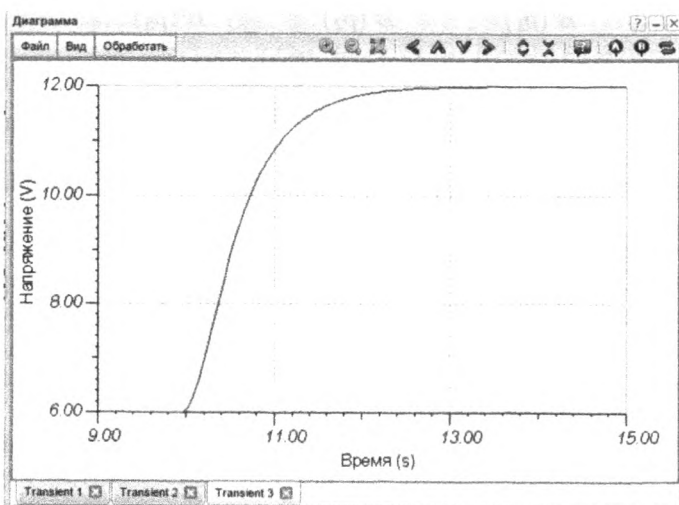


Рис. 5.11. График переходного процесса в компьютерной модели

Приравняем нулю числитель: $p^2 + \frac{2}{2R_1C}p + \frac{1}{LC} = 0$. Получим

два корня: $p_{1,2} = -\frac{1}{2R_1C} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2R_1C}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$. Переходной процесс колебательный, если подкоренное выражение отрицательное. При переходе от аperiodического режима к колебательному имеет место критический режим, в котором $p_1 = p_2 = -\frac{1}{2R_1C}$, $\left(\frac{1}{2R_1C}\right)^2 - \frac{1}{LC} = 0$. Из последнего уравнения получим, что в критическом режиме

$$C = \frac{L}{4R^2} = \frac{4/3}{4 \cdot 2^2} = \frac{1}{12} = 83 \text{ мФ}.$$

Проведём многовариантный анализ, в котором ёмкость C принимает значения 60 мФ, 80 мФ, 100 мФ, 120 мФ. Для этого выделяем ёмкость, в открывшемся окне рядом со значением номинала выбираем *Подробности* — *Шаг параметра*, устанавливаем начальное и конечное значение ёмкости и число испытаний (рис. 5.12). Затем выбираем *Анализ* — *Режим* и устанавливаем режимы анализа (рис. 5.13).

После этого повторяем *Анализ* — *Переходной процесс*. Графики переходных процессов при изменении C на интервале от 11 до 13 В показаны на рис. 5.14. Видно, что при $C = 100$ мФ график переходного режима превышает установившееся значение, т. е. начинается колебательный процесс.

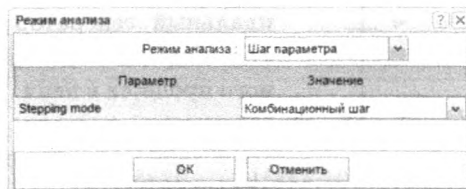


Рис. 5.12. Окно установки многовариантного анализа

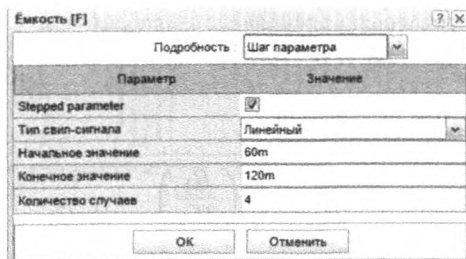


Рис. 5.13. Окно установки режима анализа

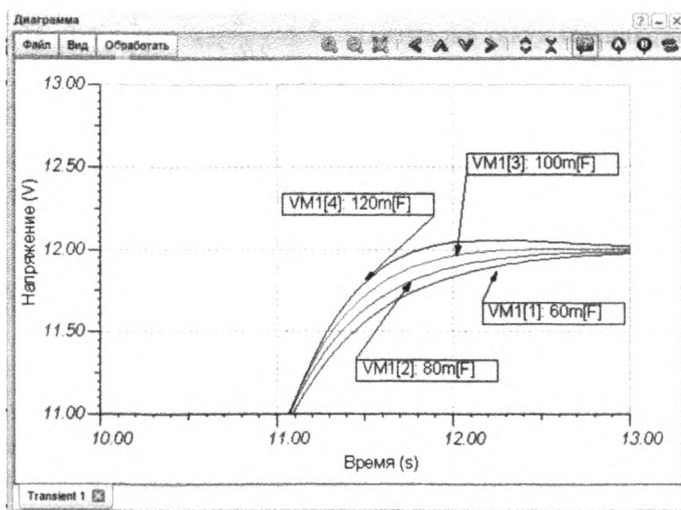


Рис. 5.14. Графики переходных процессов при изменении C

Критический режим соответствует графику $C = 80$ мФ.

5.4. Включение гармонической ЭДС в RLC-цепь

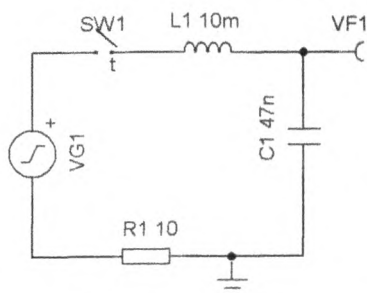


Рис. 5.15. Модель RLC-цепи

Пример 23. Модель RLC-цепи показана на рис. 5.15. В момент $t = 10$ мс в цепь включается синусоидальный генератор с амплитудой 1 В. Определить характер переходного процесса в цепи. Рассчитать резонансную частоту вынужденных колебаний в цепи и провести моделирование при частоте генератора $f_1 = 0,9f_{\text{рез}}$ и $f_1 = f_{\text{рез}}$.

1. Составляем характеристическое уравнение цепи:

$$pL_1 + \frac{1}{pC_1} + R_1 = 0 \quad \text{или} \quad p^2 + 2\frac{R_1}{2L_1}p + \frac{1}{L_1C_1} = 0.$$

Находим корни уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{R_1}{2L_1} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1C_1}}. \quad (5.7)$$

Из (5.7) найдём значение $R_{1\text{кр}}$, при котором подкоренное выра-

жение равно нулю и возникает критический переходной процесс:

$$R_{1\text{кр}} = 2\sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (5.8)$$

Подставляем в (5.7) численные значения параметров и, используя Mathcad, находим корни:

$$R_1 := 10 \quad L_1 := 10^{-2} \quad C_1 := 47 \cdot 10^{-9}$$

$$P_1 := \frac{R_1}{2 \cdot L_1} + \sqrt{\left(\frac{R_1}{2 \cdot L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 \cdot C_1}} = -500 + 4.612i \times 10^4 \text{ 1/c}$$

$$P_2 := \frac{R_1}{2 \cdot L_1} - \sqrt{\left(\frac{R_1}{2 \cdot L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 \cdot C_1}} = -500 - 4.612i \times 10^4 \text{ 1/c}$$

Корни получились комплексно-сопряжённые. Значит, переходный процесс будет иметь колебательный характер. Частота свободных колебаний:

$$f_{\text{св}} := \frac{(4.612 \times 10^4)}{2 \cdot \pi} = 7.34 \times 10^3 \text{ Гц}$$

Вычислим резонансную частоту вынужденных колебаний:

$$f_{\text{рез}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad f_{\text{рез}} = 7.341 \times 10^3 \text{ Гц}$$

В связи с малыми потерями в контуре резонансная частота вынужденных колебаний практически совпадает с частотой свободных колебаний.

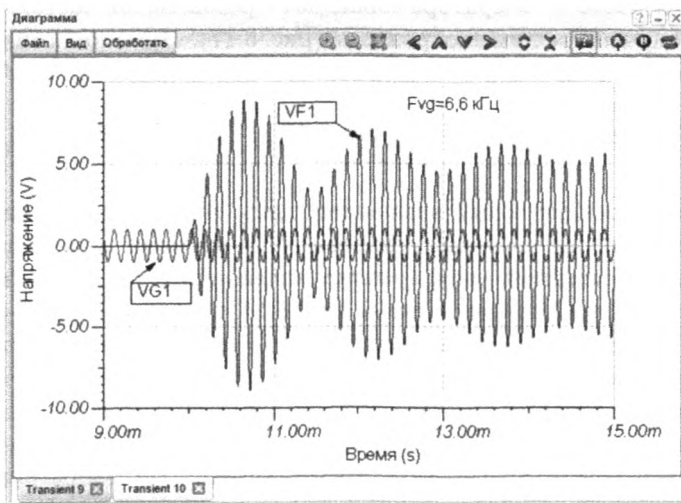


Рис. 5.16. Переходной процесс в режиме биений

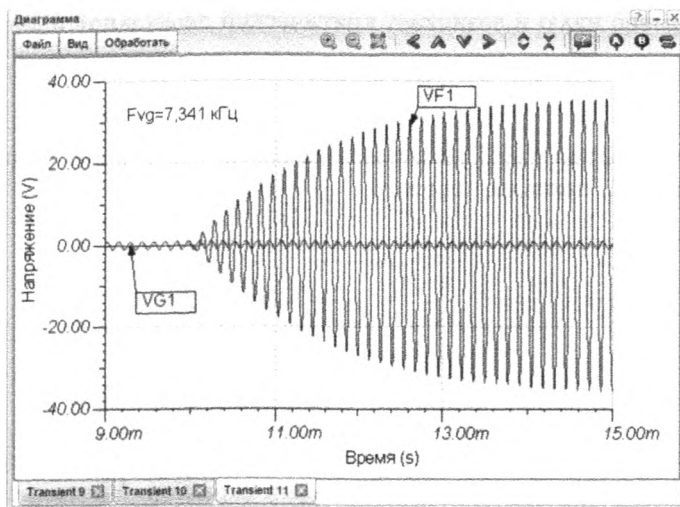


Рис. 5.17. Переходный процесс в режиме изохронизма

На рис. 5.16 показаны графики переходного процесса, полученные в режиме *Анализ — Переходной процесс* на временном интервале от 9 до 15 мс при частоте генератора $f_1 = 0,9$ имеем $f_{\text{рез}} = 6,6$ кГц. Амплитуда переменного напряжения на конденсаторе VF1 имеет вид затухающих биений. Частота биений равна разности частот резонанса и генератора $f_6 = 741$ Гц. Такой режим называют режимом биений.

Если частота генератора совпадает с резонансной частотой контура, получаем режим изохронизма (рис. 5.17). При этом амплитуда переходных колебаний в контуре монотонно возрастает.

5.5. Дифференцирующие и интегрирующие цепи

Дифференцирующей называется цепь, в которой выходная величина пропорциональна производной по времени от входной величины. Простейшей дифференцирующей цепью с использованием элементов R и C является схема рис. 5.18, в которой при $R \ll \frac{1}{\omega C}$, $u_{\text{вых}} = u_R$. Электрическое интегрирование можно осуществить при помощи схемы рис. 5.19 при условии $R \gg \frac{1}{\omega C}$, $u_{\text{вых}} = u_C$.

Дифференцирующая цепь с использованием элементов R и L показана на рис. 5.20 при $R \gg \omega L$, $u_{\text{вых}} = u_L$. Электрическое интегрирование можно осуществить также при помощи схемы рис. 5.21 при условии $R \ll \omega L$, $u_{\text{вых}} = u_R$.

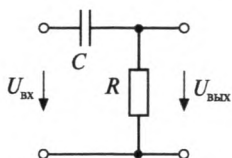


Рис. 5.18. Дифференцирующая RC-цепь

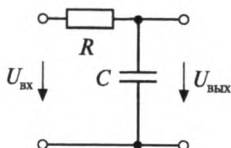


Рис. 5.19. Интегрирующая RC-цепь

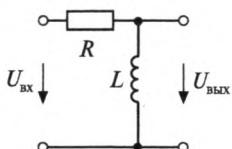


Рис. 5.20. Дифференцирующая RL-цепь

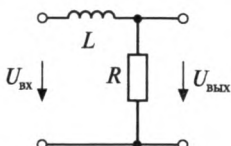


Рис. 5.21. Интегрирующая RL-цепь

5.6. Переходные и импульсные характеристики

Переходная характеристика определяется как отношение реакции цепи на ступенчатое воздействие к величине этого воздействия при нулевых начальных условиях. Переходная характеристика численно совпадает с реакцией цепи на воздействие в виде единичной функции $1(t)$. Переходную характеристику $h(t)$ можно определить, рассчитав переходный процесс и найдя $u_{\text{вых}}(t)$ при подключении к цепи источника постоянной э.д.с. $E = 1$ В.

Импульсная характеристика определяется как отношение реакции цепи на бесконечно короткий импульс бесконечно большой высоты и конечной площади к площади этого импульса при нулевых начальных условиях. Импульсная характеристика численно совпадает с реакцией цепи на воздействие в виде дельта-функции $\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}$. Взаимосвязь переходной $h(t)$ и импульсной $h_\delta(t)$ характеристик определяется известными операторными выражениями:

$$h_\delta(t) = h(0)\delta(t) + h'(t) \Leftrightarrow K(p);$$

$$h(t) = \int_0^t h_\delta(t) dt \Leftrightarrow H(p) = \frac{K(p)}{p},$$

где $K(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)}$ — операторная передаточная функция цепи; $H(p)$ — изображение переходной характеристики.

Подставив в $K(p)$ вместо p комплексную частоту $j\omega$, получим комплексную частотную характеристику цепи $\underline{K}(j\omega)$. Частотные зависимости модуля $K(\omega)$ и аргумента $\varphi(\omega)$ называют амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристиками цепи.

5.7. Вопросы для самопроверки и задания для подготовки к лабораторной работе

1. Что называют переходными процессами и когда они происходят?
2. Объясните физический смысл первого и второго закона коммутации.
3. Как определить порядок цепи при расчёте переходных процессов?
4. Объясните последовательность расчёта переходных процессов классическим методом.
5. Объясните последовательность расчёта переходных процессов операторным методом.
6. Какой вид имеют переходные процессы в цепях первого порядка?
7. Как изменяется напряжение на каждом из двух элементов при подключении постоянного напряжения E к цепям RC и RL ?
8. Как выглядят графики выходных напряжений при действии прямоугольного импульсного сигнала на входе дифференцирующего и интегрирующего звена?
9. Какой вид могут иметь переходные процессы при подключении постоянного напряжения E к RLC -цепи?
10. Что такое переходные и импульсные характеристики цепи?
11. Что такое передаточная функция цепи и как её найти?
12. Как связаны переходные и импульсные характеристики с передаточной функцией цепи?

5.8. Лабораторная работа № 5. Исследование переходных процессов в цепях с сосредоточенными параметрами R , L , C

Цель работы. В работе исследуются переходные процессы в цепях первого порядка R , L и R , C , а также в цепи второго порядка R , L , C при аperiodическом и колебательном характерах процесса.

А. Сборка схемы моделирования

1. Собрать схему измерений рис. 5.22. Наблюдение переходных процессов затруднено их кратковременностью. Поэтому для исследования применяется входной сигнал в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов. Схемы исследуемых цепей собираются для каждого задания и включаются между клеммами 1А, 1В и 2А, 2В. Номинальные значения сопротивлений, ёмкостей и индуктивностей устанавливаются в соответствии с заданиями.

Установить прямоугольную форму сигнала, частоту генератора 5 кГц, амплитуду прямоугольных импульсов 1 В.

Б. Исследование RC -цепи

2. В схеме интегрирующей RC -цепи рис. 5.22 включить заданную преподавателем ёмкость и сопротивление $R_1 = 100$ Ом. Вход RC -цепи подключить к клеммам 1А и 1В генератора сигналов. Выход RC -цепи подключить к клеммам 2А и 2В схемы измерений.

3. Длительность развертки осциллографа установить такой, чтобы на экране наблюдались не более двух-трех периодов импульсного сигнала.

4. В интегрирующей RC -цепи, снимая выходной сигнал с ёмкости, наблюдать на осциллографе и зарисовать осциллограммы напряжений $u_{вх}$ и $u_{вых} = u_C(t)$, соблюдая масштабы напряжения и времени.

5. Выбрать в главном меню режим *Анализ — Переходной процесс*, установить время наблюдения от 0 до 500 мкс и получить графики переходного процесса (рис. 5.23). Измерить по графикам напряжения $u_C(t)$ постоянные времени RC -цепи при заряде ёмкости τ_3 и разряде ёмкости τ_p .

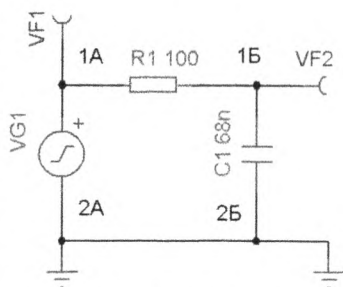


Рис. 5.22. Схема компьютерного моделирования переходных процессов

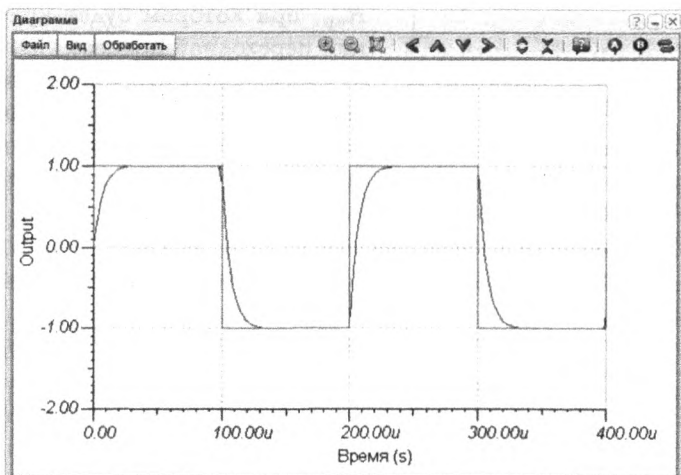


Рис. 5.23. Графики переходного процесса

6. Установить $R_1 = 1 \text{ кОм}$. Повторить исследования по пп. 4, 5.

7. Собрать дифференцирующую RC -цепь (см. рис. 5.18), включив ту же ёмкость между клеммами 1А-1В, а резистор R_1 между клеммами 1В-2В. Выходной сигнал снимать с резистора. Получить осциллограммы и графики $u_{вх}$ и $u_{вых} = u_R(t)$ для значений $R_1 = 100 \text{ Ом}$ и $R_1 = 1 \text{ кОм}$. Провести исследования по пп. 4, 5.

В. Исследование RL -цепи

8. Собрать интегрирующую RL -цепь по схеме рис. 5.21, используя заданную преподавателем индуктивность и сопротивление $R_1 = 100 \text{ Ом}$. Провести исследования по пп. 4, 5, снимая выходной сигнал с сопротивления.

11. Установить $R_1 = 1 \text{ кОм}$. Повторить исследования по п. 8.

12. Собрать дифференцирующую RL -цепь по схеме рис. 5.20, используя заданную преподавателем индуктивность и сопротивление $R_1 = 100 \text{ Ом}$. Провести исследования по п. 8, снимая выходной сигнал с индуктивности.

13. Установить $R_1 = 1 \text{ кОм}$. Повторить исследования по п. 12.

Г. Исследование RLC -цепи

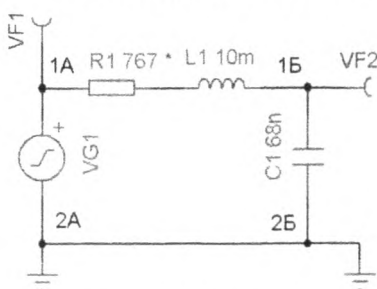


Рис. 5.24. Схема моделирования RLC -цепи

14. Собрать RLC -цепь на рис. 5.24, используя ёмкость и индуктивность из предыдущих пунктов исследования. Установить частоту генератора 500 Гц. По формуле (5.8) рассчитать критическое значение сопротивления потерь $R_{кр}$, при котором будет критический переходной процесс.

Сделать R_1 управляемым объектом и установить три значения: $R_{1кр} - 500 \text{ Ом}$, $R_{1кр}$, $R_{1кр} + 500 \text{ Ом}$. Выбрать режим Анализ — Переходной процесс, установить Запустить показ 2 мс, Окончить показ 4 мс и получить графики переходных процессов (рис. 5.25). Подписать графики и объяснить их форму.

15. Повторить исследования по п. 14, снимая выходной сигнал $u_R(t)$ с ёмкости.

16. Повторить исследования по п. 14, снимая выходной сигнал $u_L(t)$ с индуктивности.

Д. Исследование переходных и импульсных характеристик

17. По указанию преподавателя собрать одну из схем рис. 5.18–5.21, исследованных в предыдущих пунктах (например, рис. 5.26).

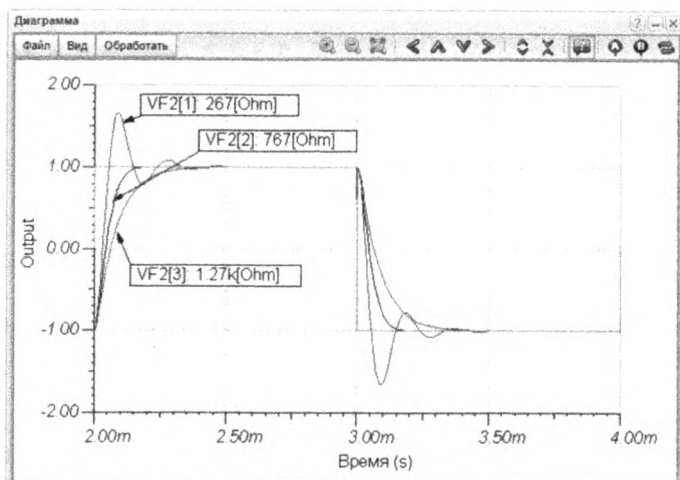


Рис. 5.25. Графики переходного процесса

Установить в генераторе напряжения форму сигнала в виде единичной функции включения $1(t)$, резистор $R_1 = 1$ кОм. Выполнить Анализ — Переходной процесс, установив Запустить показ 0 мс, Окончить показ 2 мс. Зарисовать график выходного сигнала, соответствующий переходной характеристике цепи (рис. 5.27).

18. Установить в генераторе напряжения форму сигнала в виде одиночного импульса (Импульс) с амплитудой 1 В и длительностью 1 мкс, резистор $R_1 = 100$ Ом. Выполнить Анализ — Переходной процесс, установив Запустить показ 0 мкс, Окончить показ 100 мкс. Удалить из графиков все кривые, кроме выходного сигнала VF2. Установить верхний предел по вертикальной оси 200 мВ. Зарисовать график выходного сигнала $u_{\text{вых}}(t)$, соответствующий импульсной характеристике цепи (рис. 5.28).

Приближённо импульсная характеристика цепи при действии короткого импульса единичной амплитуды для $t > t_{\text{имп}}$ определяется соотношением $h_{\delta}(t) \approx \frac{1}{t_{\text{имп}}} u_{\text{вых}}(t)$.

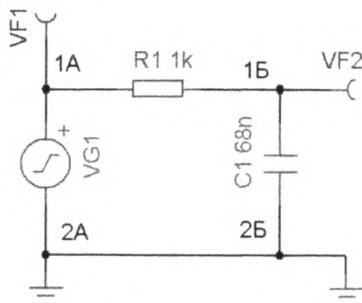


Рис. 5.26. Схема для исследования переходной характеристики

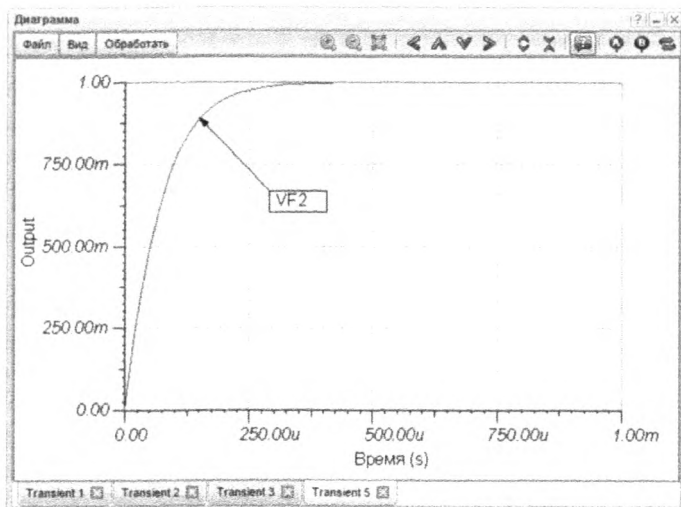
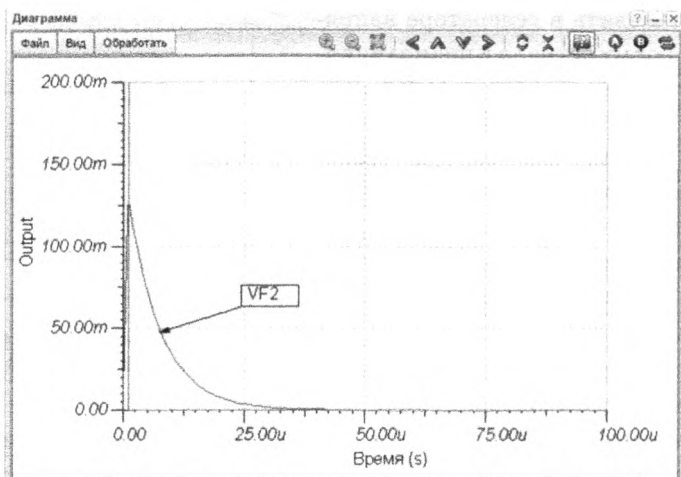


Рис. 5.27. График выходного сигнала

Рис. 5.28. Импульсная характеристика RC -цепи

Домашнее задание

1. Для всех исследованных цепей первого порядка записать теоретические формулы и рассчитать графики исследованных переходных процессов для значений параметров элементов, использованных в работе. Построить временные диаграммы $i(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$ и результаты сравнить с полученными экспериментально осциллограммами.

2. Для цепей первого порядка рассчитать постоянные времени по параметрам цепей и сравнить с полученными экспериментально.

3. Для цепей первого порядка определить условия, при которых эти цепи могут считаться дифференцирующими или интегрирующими.

4. Для цепей второго порядка рассчитать условия возникновения апериодического, критического и колебательного переходных процессов.

5. Для цепей второго порядка рассчитать период свободных колебаний и коэффициент затухания. Сравнить с полученными экспериментально. Построить графики переходных процессов $u_C(t)$, $u_L(t)$, $u_R(t)$ для колебательного переходного процесса.

6. Рассчитать теоретически переходные и импульсные характеристики исследованных цепей. Построить теоретические и экспериментальные графики. Сравнить результаты.

6 ТРЁХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

6.1. Краткие теоретические сведения и методы расчёта

Трёхфазные цепи переменного тока являются основным источником электрической энергии в электрических сетях промышленного и коммунального назначения.

Трёхфазная система ЭДС вырабатывается в трёхфазных синхронных генераторах и представляет три ЭДС с равной амплитудой и фазовым сдвигом 120° :

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

На рис. 6.1 показаны временные диаграммы трёхфазных ЭДС. На рис. 6.2 показана векторная диаграмма комплексных действующих ЭДС в трёхфазной цепи.

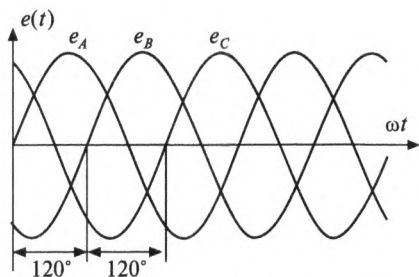


Рис. 6.1. Временные диаграммы трёхфазной системы ЭДС

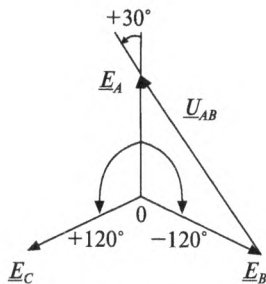


Рис. 6.2. Векторная диаграмма

Применяют несколько способов соединения трёхфазного источника ЭДС с нагрузками.

Соединение звезда-звезда

Соединение звезда-звезда показано на рис. 6.3. Трёхфазные ЭДС $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ объединены в узле 0. Фазные нагрузки $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ объединены в узле 0'. Провод, соединяющий узлы 00', называют нейтральным проводом. В случае симметричной нагрузки $\underline{Z}_A =$

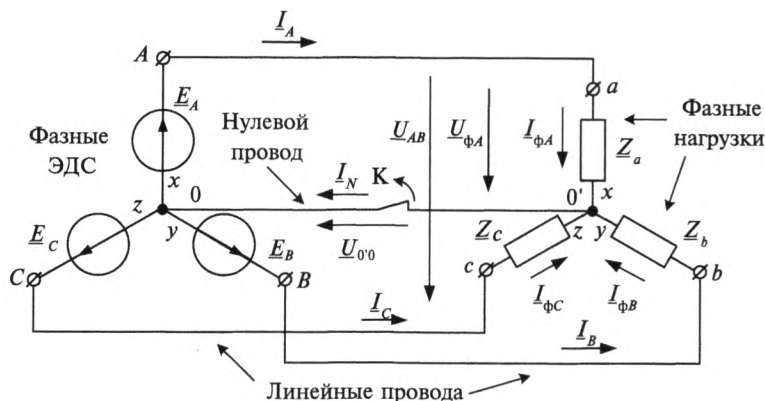


Рис. 6.3. Соединение звезда-звезда

$= \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$ применяют трёхпроводное соединение звезда-звезда без нейтрального провода (ключ К разомкнут).

Токи в линейных проводах $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ в схеме рис. 6.3 равны соответственно фазным токам в нагрузках $\underline{I}_{\phi A}, \underline{I}_{\phi B}, \underline{I}_{\phi C}$.

При симметричных нагрузках фазные напряжения на нагрузках равны фазным ЭДС, а фазные токи можно вычислить по формуле

$$\underline{I}_{\phi A} = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{\underline{U}_{\phi A}}{\underline{Z}_A}.$$

В этом случае ток в нейтральном проводе $\underline{I}_N = 0$ и можно применять трёхпроводную сеть.

При несимметричных нагрузках и включённом нейтральном проводе фазные токи не равны и возникает ток в нейтральном проводе: $\underline{I}_N = \underline{I}_{\phi A} + \underline{I}_{\phi B} + \underline{I}_{\phi C}$.

Если нагрузки несимметричны, а нейтральный провод отсутствует, то между узлами 0' и 0 возникает напряжение смещения нейтрали, которое рассчитывают по формуле

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

где $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ — комплексные проводимости фазных нагрузок. При этом токи в фазах нагрузки определяются по формулам вида

$$\underline{I}_{\phi A} = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_A}.$$

Напряжение между линейными проводами называют линейным напряжением. В схеме рис. 6.3 линейное напряжение $\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} \underline{E}_A \times \times e^{+j30^\circ}$ (см. рис. 6.2).

Соединение звезда–треугольник

Соединение звезда–треугольник показано на рис. 6.4.

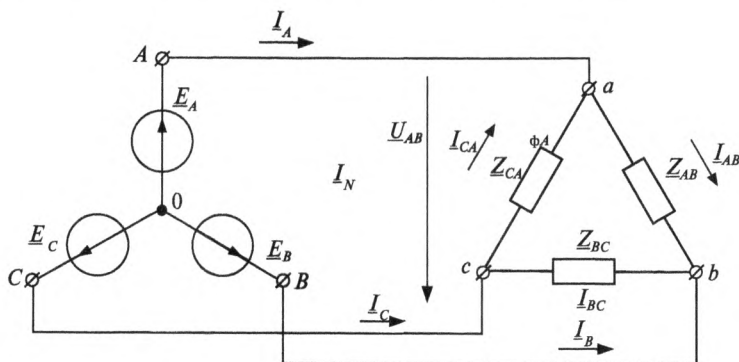


Рис. 6.4. Соединение звезда–треугольник

К фазным нагрузкам приложены равные линейные напряжения $U_{\text{л}} = \sqrt{3}E$. Поэтому фазные нагрузки могут быть несимметричными. Фазные токи вычисляют по формуле вида $I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}$. Линейные токи определяем по формулам вида $I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}$.

Мощность в трёхфазной цепи

При любом соединении и любой нагрузке комплексная мощность фазы нагрузки $\tilde{S} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}}^*$. Суммарная комплексная мощность трех фаз: $\tilde{S}_{\Sigma} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C$. Отсюда можно получить выражения для полной активной мощности $P_{\Sigma} = P_A + P_B + P_C$ и полной реактивной мощности $Q_{\Sigma} = Q_A + Q_B + Q_C$.

При симметричной нагрузке $P_A = P_B = P_C = P_{\text{ф}}$, полная активная мощность $P_{\Sigma} = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$, где φ — сдвиг фазы фазного тока относительно одноименного фазного напряжения.

6.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Что такое трёхфазная система ЭДС?
2. Принцип работы трёхфазного машинного генератора.
3. Основные схемы соединения трехфазных цепей.
4. Достоинства и недостатки соединения звезда-звезда с нулевым проводом. Векторные диаграммы токов и напряжений при несимметричной ёмкостной нагрузке.

5. Достоинства и недостатки соединения звезда-звезда без нулевого провода. Понятие смещения нейтрали. Векторные диаграммы токов и напряжений при несимметричной резистивной нагрузке.

6. Достоинства и недостатки соединения звезда-треугольник. Векторные диаграммы токов и напряжений при комплексной резистивно-ёмкостной симметричной нагрузке.

7. Соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями в трёхфазных цепях.

8. Активная, реактивная и полная мощность в трёхфазной цепи.

9. Измерения активной мощности в трёхфазной цепи.

6.3. Лабораторная работа № 6. Исследование трёхфазных электрических цепей

Цель работы: исследование режимов работы трёхфазных цепей переменного тока при различных способах соединения симметричных и несимметричных нагрузок. Построение векторных диаграмм токов и напряжений в трёхфазных цепях.

Описание схемы измерений

Схема компьютерного моделирования показана на рис. 6.5. Напряжения на активных и ёмкостных нагрузках измеряются вольт-

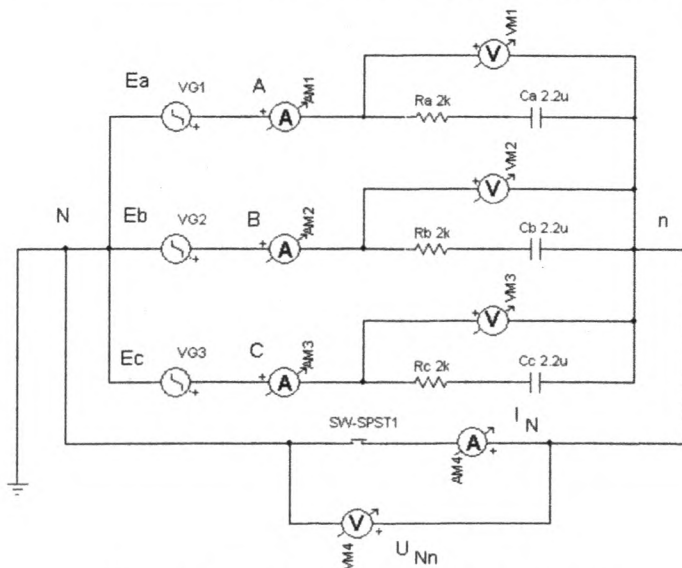


Рис. 6.5. Схема компьютерного моделирования

метрами VM1, VM2, VM3. Токи в линейных проводах измеряются амперметрами AM1, AM2, AM3. Ток нейтрали измеряется амперметром AM4. Напряжение смещения нейтрали измеряется вольтметром VM4'. Все измерительные приборы надо установить в режим «АС». Нейтральный провод подключается ключом К. Для создания несимметричных нагрузок надо изменять номиналы резисторов и ёмкостей.

Лабораторное задание

1. Собрать схему измерений рис. 6.5 с нейтральным проводом (ключ К замкнут). В генераторах напряжений установить амплитуду 120 В, частоту 50 Гц, $\varphi_A = 0$, $\varphi_B = -120^\circ$, $\varphi_C = +120^\circ$.

2. В режиме *Анализ — Переходный процесс* на интервале 40 мс получить графики фазных напряжений (рис. 6.6) и зарисовать их. По графикам измерить амплитуды и фазовые сдвиги e_A, e_B, e_C . Записать результаты.

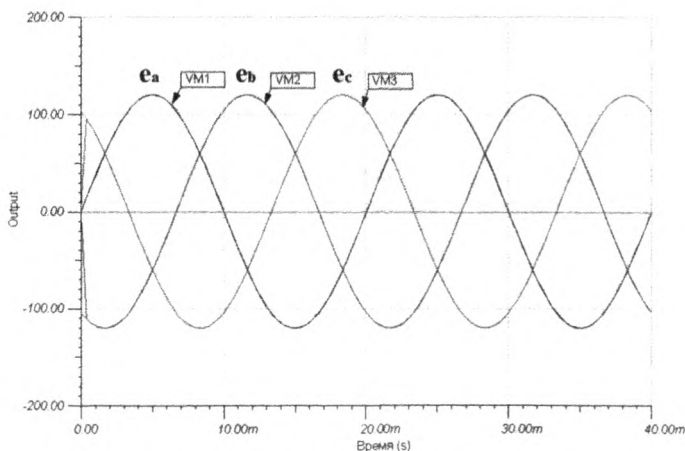


Рис. 6.6. Графики фазных напряжений

А. Исследование соединения звезда-звезда

3. Подключить к трёхфазному генератору соединённую звездой симметричную активную нагрузку из сопротивлений R_a, R_b, R_c . Для этого можно установить очень большие значения номиналов конденсаторов (например, $10e+6$, что соответствует 10^{+7} Ф). В режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Таблица результатов переменного тока* измерить вольтметрами напряжения на резисторах, напряжение смещения нейтрали и амперметром ток нейтрали. Результаты записать в табл. 6.1 (опыт 1).

Таблица 6.1

Опыт	Вид нагрузки	Кол-во проводов	U_{Ra}	U_{Rb}	U_{Rc}	U_{Ca}	U_{Cb}	U_{Cc}	$U_{00'}$	I_N
1	Сим. R	4								
2	Сим. R	3								
3	Несим. R	4								
4	Несим. R	3								
5	Сим. C	4								
6	Сим. C	3								
7	Несим. C	4								
8	Несим. C	3								
9	Сим. Z	4								
10	Сим. Z	3								
11	Несим. Z	4								
12	Несим. Z	3								
13	KЗ \underline{Z}_A	3								
14	XX \underline{Z}_A	3								

4. Разомкнуть нейтральный провод. Повторить измерения п. 3. Результаты записать в табл. 6.1 (опыт 2).

5. Увеличить по указанию преподавателя одно из фазных сопротивлений в два раза. Повторить измерения пп. 3 и 4. Результаты записать в табл. 6.1 (опыты 3, 4).

6. Подключить к генератору соединённую звездой симметричную ёмкостную нагрузку C_a, C_b, C_c . Номиналы конденсаторов установить по указанию преподавателя в пределах от 2 до 5 мкФ. Повторить измерения пп. 3–5. Результаты записать в табл. 6.1.

7. Подключить к генератору соединённую звездой комплексную нагрузку $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$. Повторить измерения пп. 3–5. Результаты записать в табл. 6.1 (опыты 9–12).

Б. Короткое замыкание фазы нагрузки

8. Подключить к генератору соединённую звездой симметричную комплексную нагрузку $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ без нейтрального провода. Закоротить перемычкой нагрузку \underline{Z}_A . Провести измерения и записать результаты в табл. 6.1 (опыт 13).

В. Обрыв линейного провода

9. Подключить к генератору соединённую звездой симметричную комплексную нагрузку $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ без нейтрального провода. Отключить линейный провод фазы А. Провести измерения и записать результаты в табл. 6.1 (опыт 14).

Домашнее задание

1. По результатам измерений табл. 6.1 для каждого варианта нагрузок построить векторные диаграммы напряжений и токов в трёхфазной цепи. Объяснить особенности режимов работы трёхпроводной и четырёхпроводной цепи при различных нагрузках.

2. Для соединения звезда-звезда рассчитать теоретически при несимметричных нагрузках в четырёхпроводной системе ток нейтрали, а в трёхпроводной системе напряжение смещения нейтрали. Сравнить расчётные и экспериментальные результаты.

3. Для режима короткого замыкания нагрузки фазы A в трёхпроводной системе рассчитать напряжения на элементах фазных нагрузок B и C .

4. Для режима обрыва линейного провода рассчитать напряжения и токи в фазных нагрузках B и C .

5. По результатам измерений табл. 6.2 для соединения звезда-треугольник построить векторные диаграммы напряжений и токов. По диаграммам определить сдвиг фаз между линейными напряжениями и токами в нагрузках. Рассчитать активные и реактивные мощности в нагрузках. Определить комплексные значения токов в нагрузках $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$. Вычислить по формулам линейные токи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ и сравнить с экспериментальными значениями этих токов.

Часть II

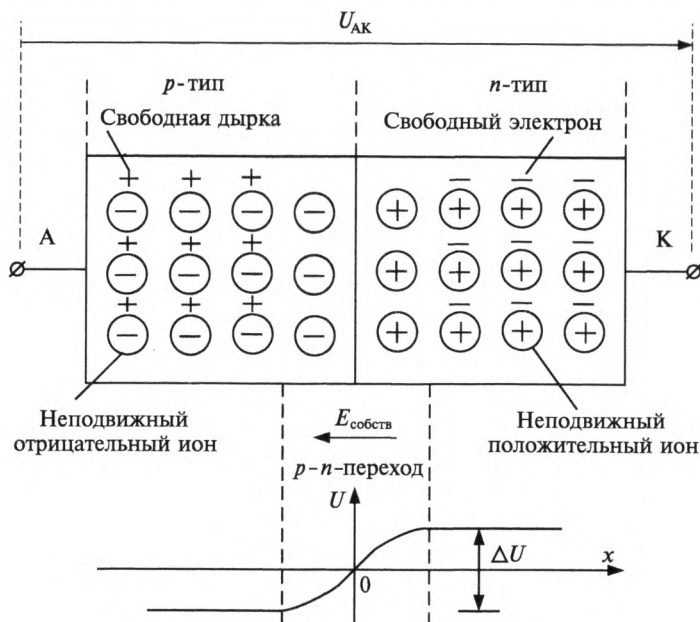
ЭЛЕКТРОНИКА

7 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ, СТАБИЛИТРОНОВ И ТИРИСТОРОВ

7.1. Теоретические сведения

Полупроводниковым диодом называют прибор, который имеет два вывода и содержит один (или несколько) электронно-дырочных переходов. Электронно-дырочный переход — это тонкий слой между двумя частями полупроводникового кристалла, в котором одна часть имеет электронную проводимость (n -область), а другая часть имеет дырочную проводимость (p -область). Электронно-дырочный переход называют p - n -переходом. Электронную проводимость имеет, например, четырёхвалентный кристалл кремния с примесью пентавалентного фосфора. Такой полупроводник имеет неподвижные положительные ионы, свободные электроны, называется полупроводником n -типа, а соответствующую примесь называют донорной. Дырочную проводимость имеет кристалл кремния с примесью трёхвалентного индия. Такой кристалл имеет неподвижные отрицательные ионы, недостаток электронов, называется полупроводником p -типа, а соответствующую примесь называют акцепторной. Дырка является фиктивным носителем заряда, образуется в кристалле на месте отсутствующего электрона, имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона.

Принцип работы p - n -перехода показан на рис. 7.1. В кристалле кремния, имеющем n -область и p -область, в результате встречного движения противоположных зарядов в области с меньшей их концентрацией на границе областей возникает диффузный ток и собственное электрическое поле $E_{\text{собств}}$. На границе раздела двух областей происходит скачкообразное изменение знака объёмного заряда, возникает контактная разность потенциалов ψ_k , напряжённость собственного электрического поля максимальна и создаёт потен-

Рис. 7.1. Условное изображение p - n -перехода

циальный барьер U , препятствующий дальнейшему прохождению диффузного тока.

Если к внешним контактам p - n -перехода А и К подключить отрицательное напряжение $U_{AK} < 0$, то созданное этим напряжением внешнее электрическое поле в полупроводнике будет складываться с $E_{собр}$, p - n -переход останется закрытым и во внешней цепи будет существовать незначительный по величине обратный ток $I_{обр}$, обусловленный током проводимости неосновных носителей и называемый током насыщения I_s .

Если к внешним контактам p - n -перехода А и К подключить положительное напряжение $U_{AK} > 0$, то созданное этим напряжением внешнее электрическое поле в полупроводнике будет компенсировать $E_{собр}$, вызывать прямое смещение p - n -перехода, p - n -переход откроется и во внешней цепи появится диффузионный ток $I_{диф}$, вызванный диффузией основных носителей, преодолевающих потенциальный барьер. Величина потенциального барьера составляет для разных материалов от 0,6 до 1,2 В.

При открытом p - n -переходе прямой ток во внешней цепи кроме диффузионного тока содержит ток проводимости, протекающий в противоположном направлении. Полный ток при прямом смещении

p - n -перехода определяется уравнением Эберса–Молла

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_s = I_s(e^{U/\varphi_T} - 1). \quad (7.1)$$

При температуре $T = 300$ К тепловой потенциал $\varphi_T = 25$ мВ, поэтому уже при $U = 0,1$ В формулу (7.1) можно упростить:

$$I = I_s e^{U/\varphi_T}.$$

Дифференциальное сопротивление p - n -перехода можно определить по формуле

$$\frac{1}{r_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU} = \frac{1}{\varphi_T} (I + I_s),$$

откуда получим

$$r_{\text{диф}} = \frac{\varphi_T}{(I + I_s)}.$$

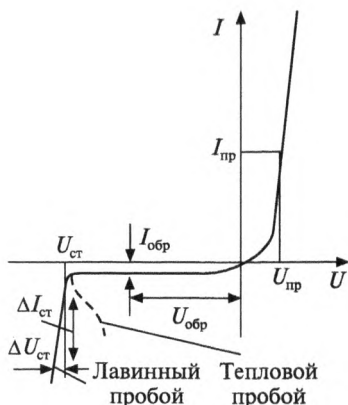


Рис. 7.2. Вольтамперная характеристика p - n -перехода

Вольтамперная характеристика p - n -перехода показана на рис. 7.2,а. Прямое напряжение не превышает контактной разности потенциалов ψ_K . Обратное напряжение ограничивается пробоем p - n -перехода. В закрытом

состоянии через p - n -переход проходит малый по величине ток $I_{\text{обр}}$. Как видно, p - n -переход пропускает ток в одном направлении и может использоваться для выпрямления синусоидальных токов. При лавинном пробое происходит резкое увеличение числа подвижных носителей зарядов, ток через p - n -переход неограниченно возрастает, а напряжение на нем остаётся неизменными. Это используется для стабилизации напряжения. Лавинный пробой обратим, свойства полупроводника восстанавливаются после снятия напряжения. Однако вслед за лавинным пробоем может произойти тепловой пробой, который разрушает полупроводник.

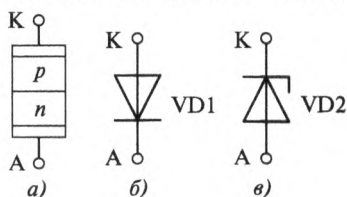


Рис. 7.3. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называется полупроводниковый прибор, имеющий два вывода и один выпрямляющий p - n -переход. Структура полупроводникового диода показана на рис. 7.3,а, условное обозначение диода показано на рис. 7.2,б.

Электрод, подключённый к области p , называют анодом, а электрод,

подключённый к области n , — катодом. Выпрямительные полупроводниковые диоды используют для выпрямления токов величиной от десятков миллиампер до десятков ампер. При протекании большого тока через p - n -переход в объёме полупроводника падает значительное напряжение. С учётом этого вольтамперная характеристика приобретает вид

$$I = I_s e^{(U - IR)/\varphi_T},$$

где R называют последовательным сопротивлением.

Высокочастотные диоды детектируют сигналы на частотах до десятков мегагерц. Выпрямительные диоды при высоких обратных напряжениях имеют необратимый тепловой пробой (пунктирная линия на рис. 7.2).

Стабилитроном называют полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного пробоя и предназначенный для стабилизации постоянного напряжения. Условное обозначение стабилитрона показано на рис. 7.3, в. По графику ВАХ на участке лавинного пробоя можно найти дифференциальное сопротивление стабилитрона:

$$R_{\text{диф.ст}} = \frac{U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст}}}.$$

Мощность рассеяния у стабилитронов составляет от сотен милливатт до десяти ватт.

Тиристором называют полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями и тремя или более последовательно включёнными p - n -переходами. Наиболее распространённая структура управляемого тиристора с четырьмя чередующимися слоями полупроводников p - и n -типов показана на рис. 7.4, а. Кроме анодного и катодного выводов, управляемый тиристор имеет ещё вывод управляющего электрода (УЭ). УЭ может подключаться к ближайшей к катоду p -области (тиристор с катодным управлением) или к ближайшей к аноду n -области (тиристор с анодным управлением).

На рис. 7.4, б показана схема включения тиристора с катодным управлением. Источник напряжения $E_{\text{упр}}$ через сопротивление $R_{\text{упр}}$ создаёт в УЭ ток управления I_y . В цепи анода I при возрастании анодного напряжения U остаётся малым до напряжения включения $U_{\text{вкл}}$, которое зависит от тока управления. После открывания тиристора анодный ток скачком увеличивается и переходит на участок ВАХ открытого состояния (рис. 7.4, в). Для выключения тиристора надо уменьшить анодный ток до значения тока удержания $I_{\text{уд}}$ или поменять полярность напряжения на аноде.

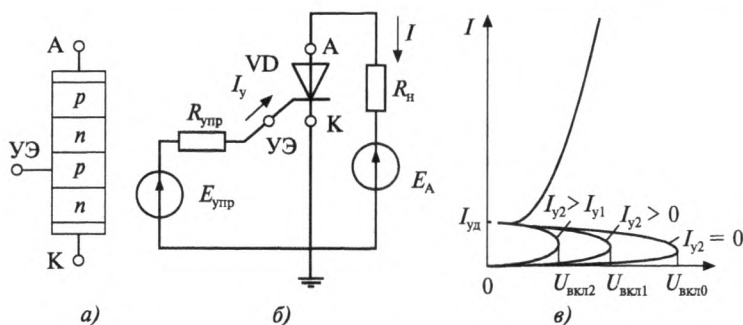


Рис. 7.4. Структура (а), схема включения (б) и вольтамперная характеристика (в) тиристора с катодным управлением

7.2. Лабораторная работа № 7. Исследование полупроводниковых диодов, стабилитронов и тиристоров

Цель работы: исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) и типовых схем включения полупроводникового диода, стабилитрона и тиристора.

1. Собрать схему компьютерного моделирования полупроводникового диода и стабилитрона рис. 7.5.

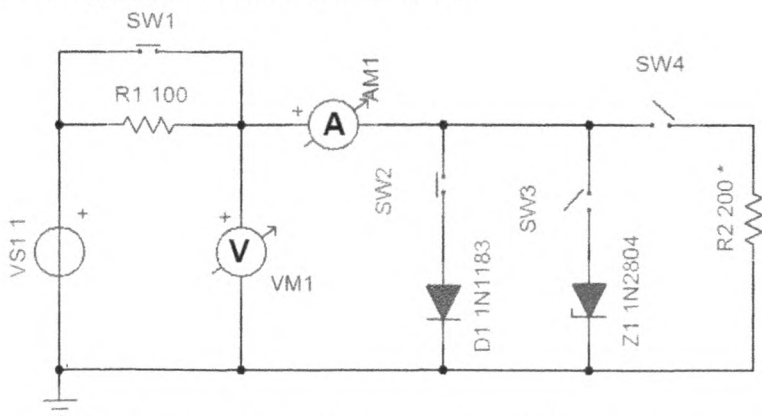


Рис. 7.5. Схема компьютерного моделирования диода и стабилитрона

В схеме использован источник постоянного напряжения VS1, диод D1 1N1183 (марку диода надо взять по указанию преподавателя), стабилитрон Z1 (марку взять по указанию преподавателя), балластный резистор R1, резистор нагрузки R2. Измерительными приборами служат вольтметр VM1 и амперметр AM1. Переключения в схеме осуществляются четырьмя ключами SW.

А. Исследование полупроводникового диода

1. Замкнуть ключи 1 и 2, разомкнуть ключи 3 и 4. Для изменения состояния ключа надо подвести к нему курсор, получить изображение чёрной вертикальной стрелки и щёлкнуть левой кнопкой мыши. В открывшемся окне *Свойства ключа* изменить *DC состояние* на *Вкл-Выкл*.

2. Установить напряжение источника VS1 равным 1 В (это не влияет на результаты последующего анализа).

3. В строке меню выберите *Анализ — Анализ постоянного тока*. В диалоговом окне переходных характеристик на постоянном токе *Передаточная характеристика постоянного тока*

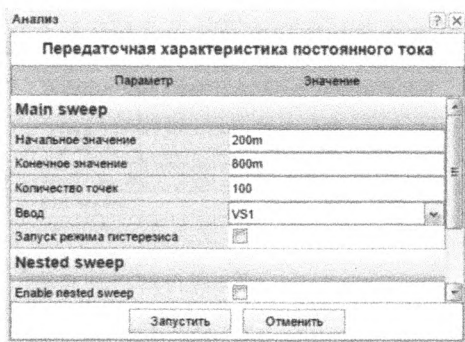


Рис. 7.6. Окно передаточной характеристики постоянного тока для диода

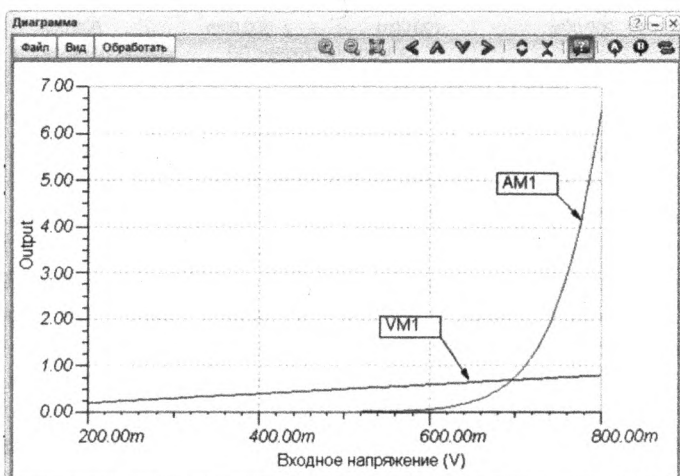


Рис. 7.7. Графики результатов анализа передаточной характеристики постоянного тока

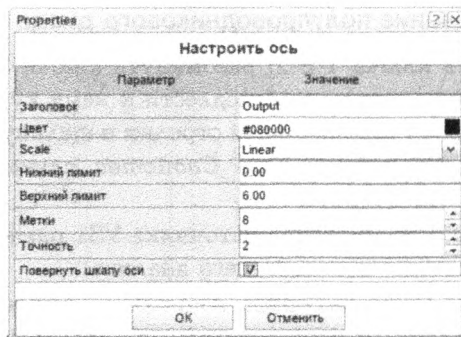


Рис. 7.8. Окно установки осей

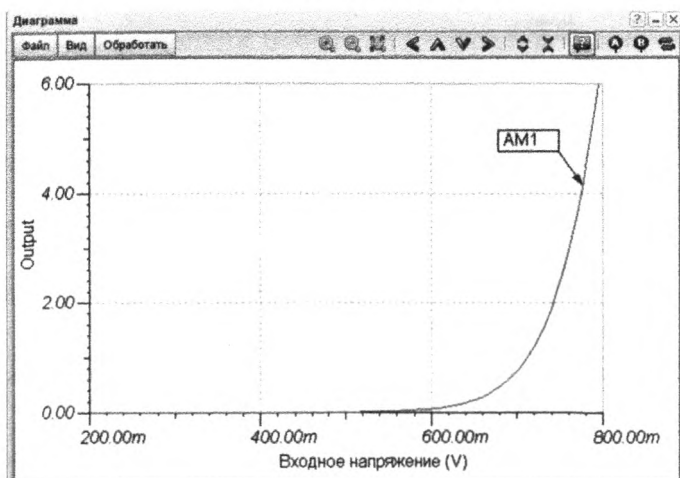




Рис. 7.9. ВАХ полупроводникового диода

(рис. 7.6) установите начальное значение анализа *Начальное значение* — 200m, конечное значение анализа *Конечное значение* 800m, входная переменная *Ввод VS1*. Нажмите *Запустить*.

Откроется окно результатов с двумя графиками (рис. 7.7).

Для идентификации графиков в строке инструментов выберите *Auto-label curve* , подведите курсор к графику и щёлкните левой кнопкой мыши. Появится метка графика.

Удалим из результатов линейный график напряжения VM1. Для этого подводим курсор к графику VM1, выделяем его, щёлкнув левой кнопкой, и в окне *Настроить кривую* нажимаем  *Delete curve*.

4. Изменим масштаб графика по вертикальной оси. Для этого подводим курсор к вертикальной оси, выделяем её левой кноп-

кой мыши, открывается диалоговое окно. В окне установки осей (рис. 7.8) установим нижний предел 0, верхний предел 6. Нажимаем ОК и получаем график вольтамперной характеристики диода (рис. 7.9). По графику видно, что диод начинает открываться при положительных напряжениях 0,6...0,7 В. При напряжении 0,8 В ток диода достигает 6,5 А.

Б. Исследование стабилитрона

5. Исследуем стабилитрон без нагрузки. Для этого в схеме рис. 7.5 замкнуть ключи 1 и 3, разомкнуть ключи 2 и 4. В режиме Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока устанавливаем начальное значение –8 В, конечное значение 2 В (рис. 7.10).

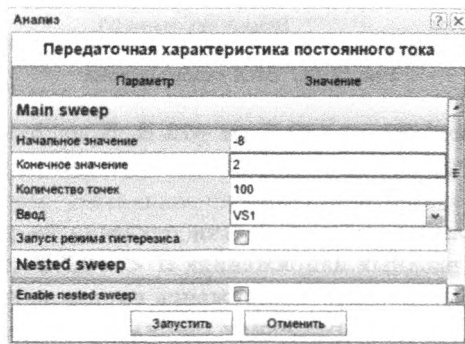


Рис. 7.10. Окно *Передаточная характеристика постоянного тока* для стабилитрона

Проводим анализ и получаем график ВАХ (рис. 7.11). Пределы по вертикальной оси графика надо выставить в окне. Правая ветвь ($U > 0$) аналогична прямой ветви ВАХ полупроводникового диода. При напряжении $U > 0,7$ В стабилитрон открывается как обычный диод. Левая ветвь ($U < 0$) до напряжения –6 В аналогична ветви обратного тока диода. При этом ток через стабилитрон практически равен 0. При напряжении –6,8 В в данном стабилитроне происходит лавинный пробой и на практически вертикальной падающей ветви тока выполняют стабилизация напряжения.

6. Исследуем стабилизатор напряжения без нагрузки. Схема простейшего стабилизатора без нагрузки показана на рис. 7.12. Стабилитрон включён в закрытом состоянии последовательно с балластным сопротивлением R_1 .

Выбираем в меню режим Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока. Изме-

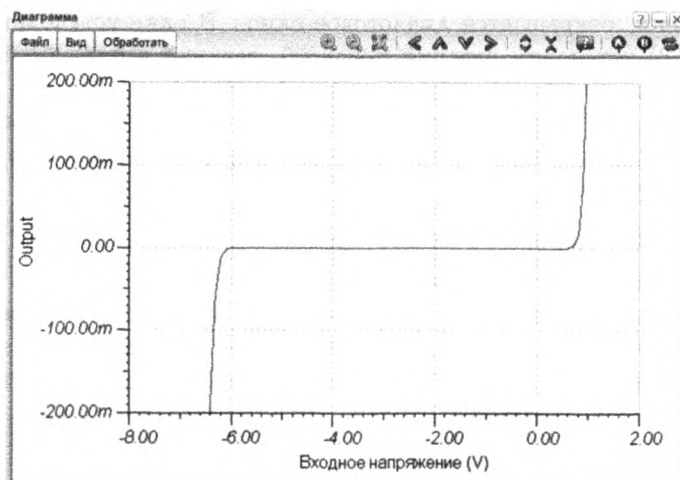


Рис. 7.11. ВАХ стабилитрона

няем напряжение VS2 от -10 В до $+10$ В. В графике ВАХ по вертикальной оси устанавливаем пределы -2 В и 10 В, число отметок (*ticks*) равно 7.

ВАХ стабилитрона без нагрузки показана на рис. 7.13. При отрицательных входных напряжениях $U < -0,7$ В стабилитрон работает как открытый диод. Напряжение на нем составляет $-0,7$ В. При положительных напряжениях стабилитрон сначала закрыт и напряжение на нем повторяет возрастающее входное напряжение VS2. При напряжении $U = 6,8$ В происходит лавинный пробой стабилитрона и напряжение стабилизируется на уровне $6,8$ В.

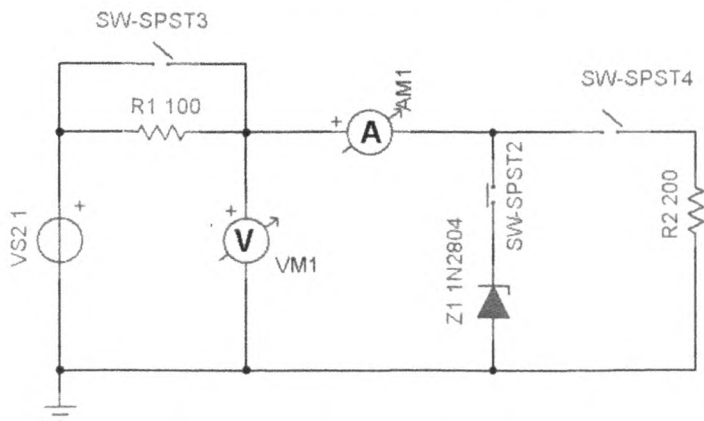


Рис. 7.12. Схема стабилизатора на стабилитроне

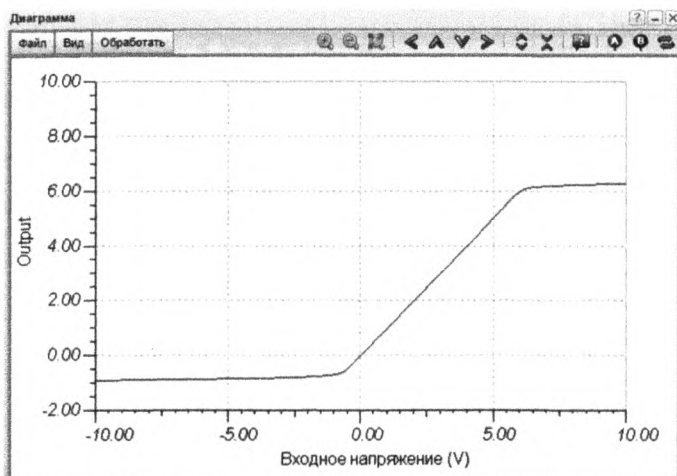


Рис. 7.13. ВАХ стабилизатора без нагрузки

7. Исследуем стабилизатор напряжения с нагрузкой. Для этого в схеме рис. 7.12 замкнём ключ 4. Резистор R2 надо сделать управляемым объектом. Начальное значение сопротивления 100 Ом, конечное значение 400 Ом, число вариантов 4.

Проводим Анализ — Режим — Режим Анализа (Шаг Параметра) нажимаем ОК. Затем выполняем Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока, изменяя VS2 в пределах от -10 В до 20 В (рис. 7.14). Графики ВАХ (рис. 7.15) показывают, что с уменьшением нагрузки увеличивается входное напряжение VS2, при котором начинается работа стабилизатора. Рассчитать минимальное требуемое напряжение VS2 можно, используя метод эквивалентного генератора. Так, при $R_2 = 100$ Ом минимальное напряжение VS2 должно быть 13,6 В (в два раза выше напряжения стабилизации стабилитрона).

Параметр	Значение
Stepped parameter	<input checked="" type="checkbox"/>
Тип свмп-сигнала	Линейный
Начальное значение	100
Конечное значение	400
Количество случаев	4

Рис. 7.14. Установка шага параметра резистора R2

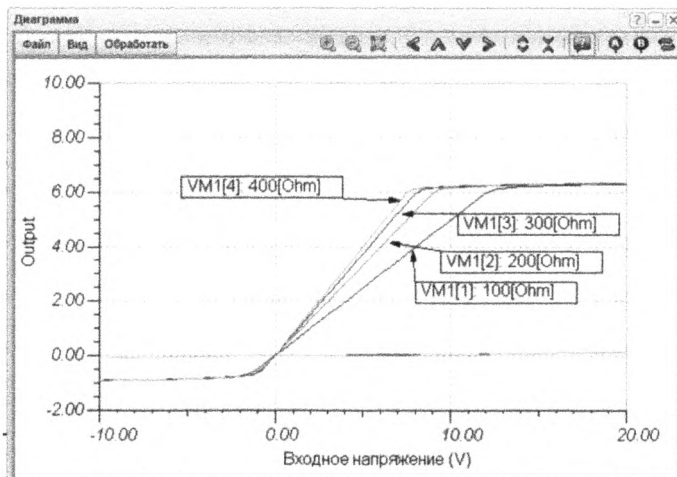


Рис. 7.15. Графики ВАХ стабилизатора при разных нагрузках

В. Исследование тиристора

8. Собираем схему моделирования тиристора (рис. 7.16). В схеме применён тиристор 2N1595. Анод тиристора через амперметр подключён к источнику постоянного напряжения VS1, управляющий электрод подключён к источнику тока IS1. Выделяем тиристор на рабочем поле, открываем *Свойства*, открываем *Тип* и изучаем параметры тиристора (рис. 7.17). Пороговый ток включения составляет 5 мА. Поэтому мы будем исследовать характеристики тиристора для управляющих токов от 1,8 до 2,4 мА.

9. Сделаем источник тока IS1 переменным параметром и установим пределы изменения 1,8 мА...2,4 мА, число вариантов 4. Проводим Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока, изменяя VS1 в пределах от 0 до 10 В. Полученные ВАХ показаны на рис. 7.18.

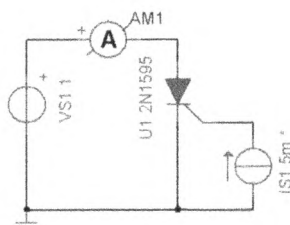


Рис. 7.16. Моделирование тиристора

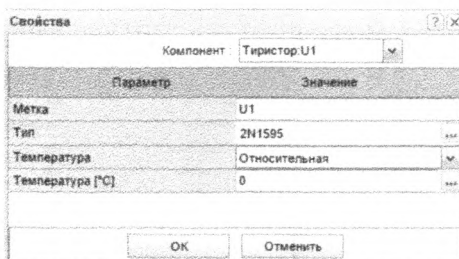


Рис. 7.17. Окна параметров тиристора

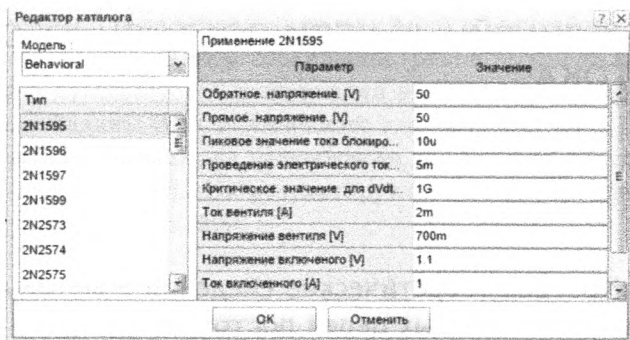


Рис. 7.18. ВАХ тиристора при различных значениях тока управления

Как видно из графиков, при значении управляющего тока 1,8 мА тиристор остаётся закрытым до напряжения на аноде 10 В. Управляющий ток 2 мА открывает тиристор при анодном напряжении 3 В. Управляющий ток 1,5 мА открывает тиристор при напряжении 0,75 В. После открывания графики ВАХ сливаются и тиристор может быть заменён статическим сопротивлением $R_{ст} \approx 8 \text{ В}/20 \text{ А} = 0,4 \text{ Ом}$.

Домашнее задание

1. По графику вольтамперной характеристики диода (п. 3) найти дифференциальное и статическое сопротивление диода для значений прямого тока $I_{пр}$ 1 мА и 5 мА.
2. По вольтамперной характеристике стабилитрона (п. 5) определить напряжение стабилизации, соответствующее току $I_{VD2} = 100 \text{ мА}$.
3. Рассчитать дифференциальное сопротивление стабилитрона $R_{диф.ст} = U_{ст}/I_{ст}$ и коэффициент стабилизации $k_{ст} = U_{вх}/U_{ст}$.
4. Используя данные п. 7 лабораторного задания и $R_{диф.ст}$, рассчитать для $U_{вх} = 10 \text{ В}$ выходное напряжение на нагрузке $R_2 = 200 \text{ Ом}$ и 100 Ом стабилитрона по формуле

$$U_{вых} = U_{вх} \frac{R_{диф.ст} R_2}{R_2 (R_{диф.ст} + R_1) + R_{диф.ст} R_1} + U_{ст} \frac{R_{10} R_2}{R_2 (R_{диф.ст} + R_1) + R_{диф.ст} R_1}.$$

Сравнить результаты расчёта и эксперимента.

6. По вольтамперным характеристикам тиристора (п. 9) при разных значениях тока управления определить анодный ток включения I_A и анодное напряжение включения U_A .

8 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

8.1. Краткие теоретические сведения и методы расчёта нелинейных цепей постоянного тока

Резисторы, вольт-амперные характеристики (ВАХ) которых не являются прямыми линиями, называются нелинейными резисторами (НР) или, в более общем определении, нелинейными элементами (НЭ). ВАХ НЭ получают экспериментально, подключив НЭ к регулируемому источнику питания и измеряя напряжение на зажимах НЭ и ток через НЭ.

Нелинейные электрические цепи постоянного тока содержат один или несколько нелинейных элементов (НЭ) с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

Нелинейными элементами в цепях постоянного тока могут быть полупроводниковые диоды, стабилитроны, тиристоры, транзисторы, лампы накаливания. В нелинейных цепях не выполняется принцип наложения. Поэтому нельзя применять методы контурных токов, узловых напряжений и т. п. Расчёты ведут графическими методами с использованием нелинейных характеристик.

Статическое и дифференциальное сопротивление нелинейного резистора

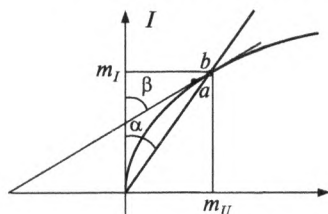


Рис. 8.1. К расчёту статического и дифференциального сопротивления

Статическое сопротивление $R_{ст} = U/I$. В точке b (рис. 8.1)

$$R_{ст} = \operatorname{tg} \alpha \frac{m_U}{m_I}.$$

Дифференциальное сопротивление на малом линейном участке ab

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \operatorname{tg} \beta \frac{m_U}{m_I}.$$

На малом участке ab нелинейный резистор можно заменить линейной моделью и пользоваться линейными методами расчётов.

Последовательное соединение линейного и нелинейного резистора. При последовательном соединении (рис. 8.2) для каждого значения тока суммируются напряжения на линейном и нелинейном элементах. Заданы ВАХ нелинейного элемента $I = f(U_{нэ})$ и линейного резистора. Суммируя напряжения, находим результирующую ВАХ $I = f(U_{нэ} + U_R)$. На результирующей ВАХ находим точку q и ток в точке m (рис. 8.3).

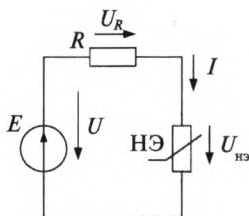


Рис. 8.2. Последовательное соединение

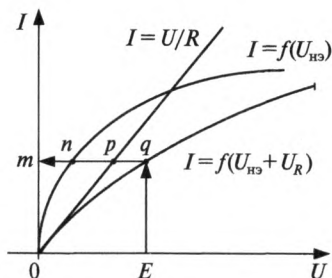


Рис. 8.3. Построение результирующей ВАХ последовательного соединения

Второй способ расчёта состоит в следующем. По схеме имеем уравнение $U_{нэ} = E - IR$, или

$$I = \frac{E}{R} - \frac{U_{нэ}}{R}.$$

Это уравнение для тока называется нагрузочной прямой.

Строим графики ВАХ и нагрузочную прямую. Точка пересечения называется рабочей точкой (рис. 8.4). Находим в ней ток и напряжение $U_{нэ}$.

Сложную цепь с одним НЭ можно заменить активным двухполюсником и эквивалентным генератором (рис. 8.5).

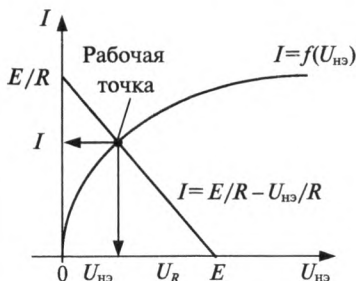


Рис. 8.4. Расчёт рабочей точки на нагрузочной прямой

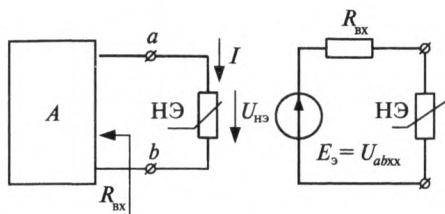


Рис. 8.5. Замена сложной линейной цепи эквивалентным генератором

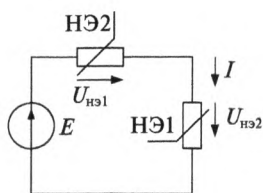


Рис. 8.6. Последовательное соединение двух нелинейных элементов

Последовательное соединение двух нелинейных элементов (рис. 8.6). В цепи складываются напряжения на двух НЭ: $E = U_{HЭ1} + U_{HЭ2}$. Решение выполняется построением результирующей ВАХ, суммируя напряжения по оси абсцисс (рис. 8.7), или строят график $I = f_2(E - U_{HЭ1})$, зеркально отображая ВАХ второго НЭ относительно вертикальной оси E , и находят точку пересечения ВАХ (рис. 8.8).

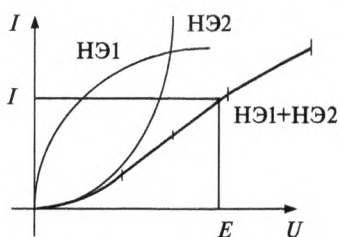


Рис. 8.7. Суммирование ВАХ

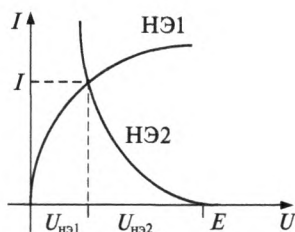


Рис. 8.8. Пересечение ВАХ

Параллельное соединение НЭ (рис. 8.9). Входной ток I равен сумме токов через нелинейные элементы. Расчёт можно провести, суммируя токи через НЭ для каждого значения напряжения и строя результирующую ВАХ (рис. 8.10).

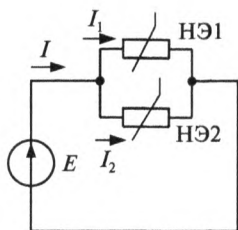


Рис. 8.9. Параллельное соединение двух нелинейных элементов

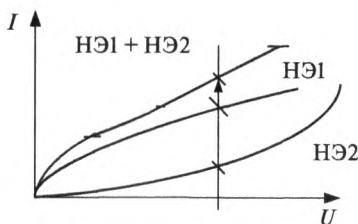


Рис. 8.10. Построение результирующей ВАХ параллельного соединения НЭ

Расчёт разветвлённой цепи методом двух узлов (рис. 8.11). Нелинейная цепь имеет два узла и три ветви. ВАХ нелинейных элементов (кривые 1–3) заданы (рис. 8.12).

Примем для определённости $E_1 = 3E_2$.

По первому закону Кирхгофа $I_1 + I_2 + I_3 = 0$.

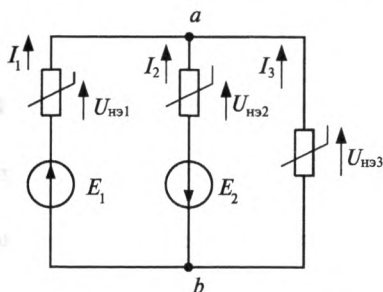


Рис. 8.11. Разветвлённая нелинейная цепь

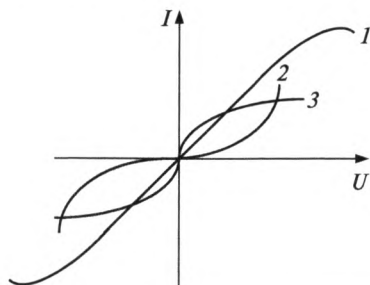


Рис. 8.12. ВАХ нелинейных элементов

По второму закону Кирхгофа

$$U_{ab} = E_1 - U_{НЭ1}; \quad U_{ab} = -E_2 - U_{НЭ2}; \quad U_{ab} = -U_{НЭ3}.$$

Выразим напряжения на нелинейных элементах:

$$U_{НЭ1} = E_1 - U_{ab}; \quad U_{НЭ2} = -E_2 - U_{ab}; \quad U_{НЭ3} = -U_{ab}.$$

Построим графики токов в нелинейных элементах от U_{ab} , преобразуя ВАХ с учетом источников напряжения. Так, в первой ветви $U_{ab} = E_1 - U_{НЭ1}$ напряжение на нелинейном элементе $U_{НЭ1} = E_1 - U_{ab}$ будет равно нулю, если $U_{ab} = E_1$, и будет возрастать, если $U_{ab} < E_1$. Поэтому график ВАХ НЭ1 сместится по оси абсцисс в точку E_1 и будет зеркальным отображением исходной ВАХ (см. рис. 8.12).

Аналогично построим графики токов для ветвей 2 и 3. Суммируем графики токов, получаем результирующую ВАХ (пунктирная линия) и находим выполнение условия $I_1 + I_2 + I_3 = 0$. В результате получаем токи в ветвях (рис. 8.13).

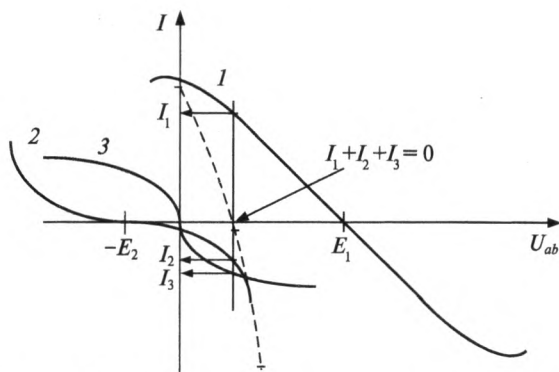


Рис. 8.13. Графический расчёт разветвлённой цепи

8.2. Вопросы для самопроверки и задания для подготовки к лабораторной работе

1. Чем отличаются нелинейные элементы электрических цепей от линейных?
2. Какие свойства имеют вольтамперные характеристики нелинейных резисторов?
3. Как определить статическое и динамическое сопротивление нелинейного резистора?
4. Какие электрические цепи называются нелинейными?
5. Чем отличаются методы расчёта нелинейных и линейных цепей?
7. Как экспериментально определяют вольтамперные характеристики нелинейных элементов?
8. Как рассчитать ток в цепи, содержащей источник напряжения и последовательно соединённые линейный и нелинейный резисторы?
9. Как рассчитать ток в цепи, содержащей источник напряжения и параллельно соединённые два нелинейных резистора?
10. Как методом двух узлов рассчитать разветвлённую цепь с тремя нелинейными ветвями, содержащими источники напряжения и нелинейные резисторы?
11. Поясните, почему в схеме с тиристором (см. рис. 9.5а) возможно возникновение колебаний.

8.3. Лабораторная работа № 8. Исследование нелинейных электрических цепей постоянного тока

Цель работы — определение вольтамперных характеристик нелинейных элементов, исследование режимов работы неразветвленных и разветвлённых нелинейных электрических цепей.

Описание схемы моделирования

Схема моделирования показана на рис. 8.14. Модели нелинейных элементов НЭ1, НЭ2, НЭ3, НЭ4 содержат диоды, стабилитроны, транзисторы, резисторы и формируют несколько видов нелинейных ВАХ. Модели НЭ подключаются к внешнему источнику напряжения E_0 ключами [1]–[4]. К нелинейным элементам подключены источники напряжения E_1 – E_4 . Резистор R_1 является нагрузкой нелинейных элементов и может отключаться ключом [5]. Ключ [6] позволяет включить НЭ3 и НЭ4 последовательно. Ключ [7] отключает источник напряжения E_0 от НЭ2–НЭ4. Резисторы $R_{1и}$, $R_{2и}$,

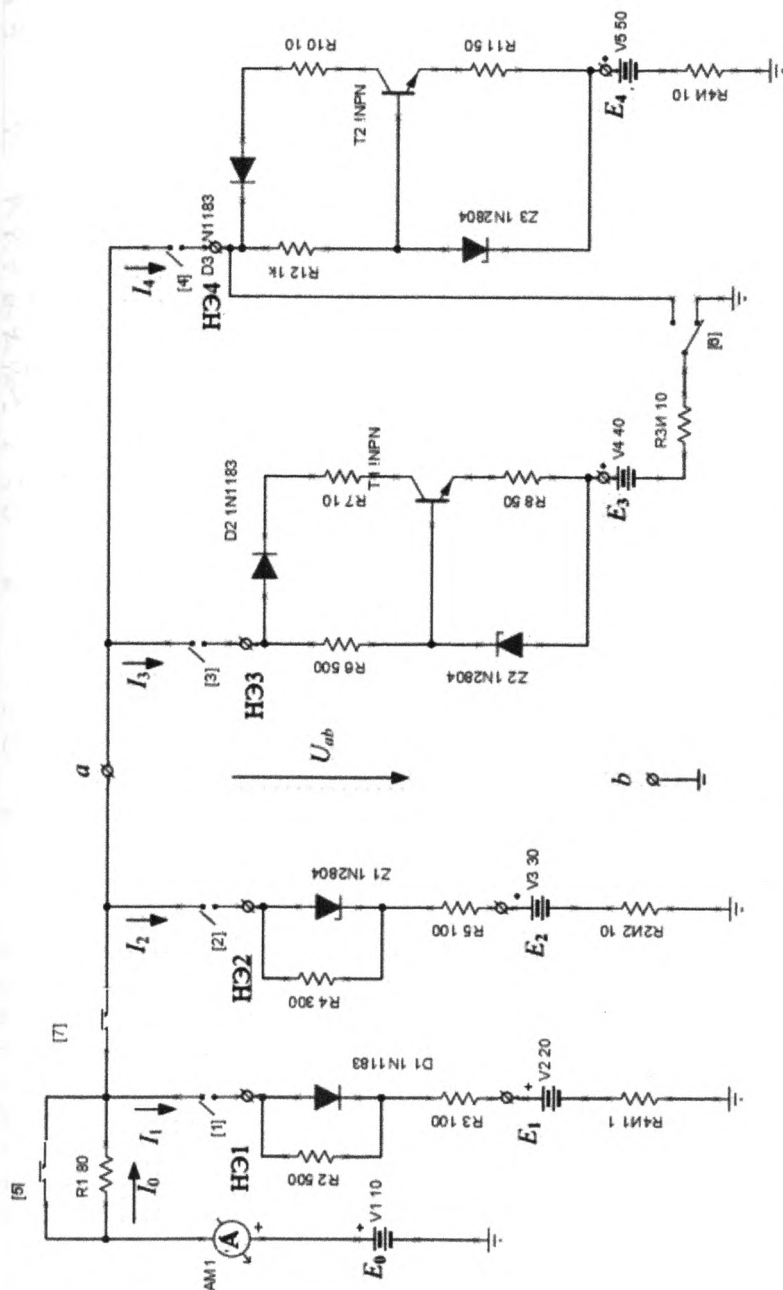


Рис. 8.14. Схема моделирования нелинейных цепей

$R_{3и}$, $R_{4и}$ служат для измерения токов в ветвях цепи. Конкретные модели и параметры элементов могут быть заданы преподавателем.

Лабораторное задание

Часть 1. Опытное получение ВАХ нелинейных резисторов, используемых в работе

1. Подключить к источнику напряжения E_0 нелинейный элемент НЭ1 без нагрузки, замкнув ключи [1] и [5]. Остальные ключи разомкнуть. Источники напряжения E_1 – E_4 установить равными нулю. Ключ [6] замкнуть на землю. Исследовать ВАХ НЭ1 в диапазоне напряжений от -20 до $+20$ В. Для этого в режиме Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока установить Начальное значение $-20V$,

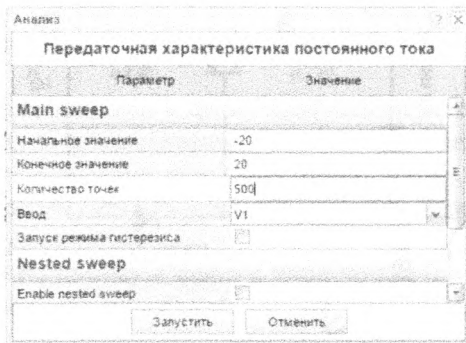


Рис. 8.15. Установка диапазона моделирования ВАХ

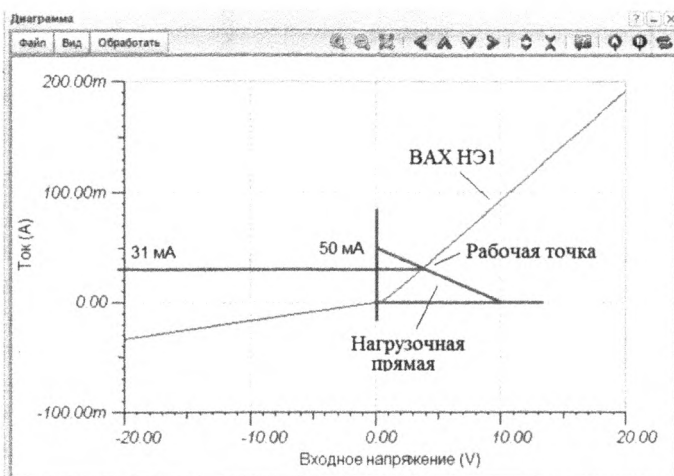


Рис. 8.16. ВАХ НЭ1 с нагрузочной прямой

Таблица 8.1

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_0	6	8	10	-6	-8	-10	6	8	10	-6	-8	-10
R_1	120	100	80	80	120	100	80	100	120	100	120	80
НЭ-А	НЭ2	НЭ2	НЭ2	НЭ1	НЭ3	НЭ3	НЭ1	НЭ1	НЭ4	НЭ4	НЭ2	НЭ3
НЭ-В	НЭ1	НЭ4	НЭ3	НЭ2	НЭ1	НЭ4	НЭ3	НЭ4	НЭ2	НЭ1	НЭ3	НЭ2

Конечное значение 20V (рис. 8.15) и получить ВАХ (рис. 8.16). Зарегистрировать в протоколе график ВАХ.

2. По номеру бригады выбрать из табл. 8.1 значения нагрузки R_1 и напряжения E_0 и рассчитать координаты нагрузочной прямой. Используя средства рисования программы TINACloud, построить нагрузочную прямую и найти ток в цепи при включении нагрузки.

3. Включить нагрузку R_1 , установить заданное в табл. 8.1 значение E_0 и в режиме Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока определить входной ток I_0 . Сравнить с результатом расчёта.

4. Для нелинейных элементов НЭ2-НЭ4 повторить исследования по п. 1-3.

Соединения нелинейных элементов

5. Для каждой бригады в табл. 8.1 заданы номинальные значения источника напряжения E_0 , линейного резистора R_1 и модели (НЭ-А, НЭ-В) нелинейных элементов, включённых параллельно.

Включить параллельно нелинейные модели НЭ-А и НЭ-В. Повторить исследования по пп. 1-3.

6. Включить последовательно нелинейные модели НЭ3 и НЭ4. Повторить исследования по пп. 1-3.

7. Подключить НЭ-А. Включить соответствующий выбранному НЭ источник напряжения (E_1 - E_4) и сделать его параметры переменными, например $E_3 = -5$ В, 0 В, +5 В. Для этого заходим в параметры. В параметре напряжение нажимаем кнопку подробнее, напротив Stepped parameter ставим галочку, Начальное значение выставляем -5, Конечное значение 5, Количество случаев 3. Во вкладке Анализ — Режим выставляем Режим анализа: Шаг параметра. В режиме Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока зарегистрировать смещение ВАХ по оси напряжения (рис. 8.17).

Отменить переменный параметр источника напряжения можно, убрав галочку на вкладке Parameter Stepping и выставив Режим анализа: Одиночный.

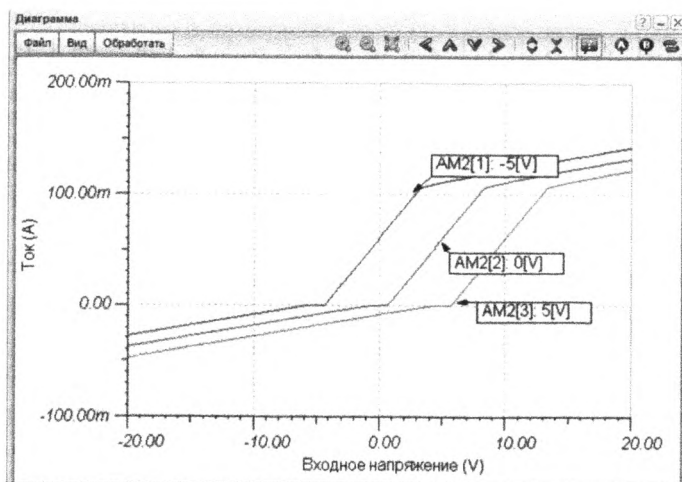


Рис. 8.17. ВАХ НЭЗ при разных значениях напряжения смещения

Часть 2. Исследование разветвлённой цепи с тремя нелинейными элементами

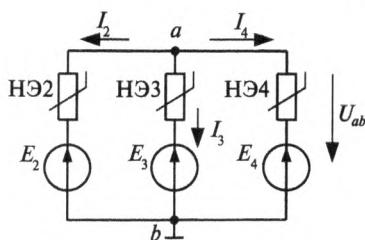


Рис. 8.18. Схема разветвлённой нелинейной цепи

8. Собрать цепь по рис. 8.18, разместив в ветвях нелинейные элементы НЭ2, НЭ3, НЭ4. Ключом [7] отключить источник напряжения E_0 . Значения E_2, E_3 и E_4 в вольтах с учётом их полярности для каждой бригады даны в табл. 8.2.

Тщательно зарисовать схему с заданными параметрами источников напряжения в протокол лабораторной работы.

Таблица 8.2

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_2	10	10	6	10	10	10	-10	-10	-6	-8	-10	8
E_3	0	-8	-6	-10	0	0	0	0	10	8	-10	0
E_4	8	0	0	0	-6	6	-6	10	0	0	0	10

9. Используя режим Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока определить токи в измерительных резисторах $R_{2и}$, $R_{3и}$, $R_{4и}$ и записать токи во всех ветвях с учётом их направлений. Найти напряжение U_{ab} между узлами. Проверить выполнение первого закона Кирхгофа.

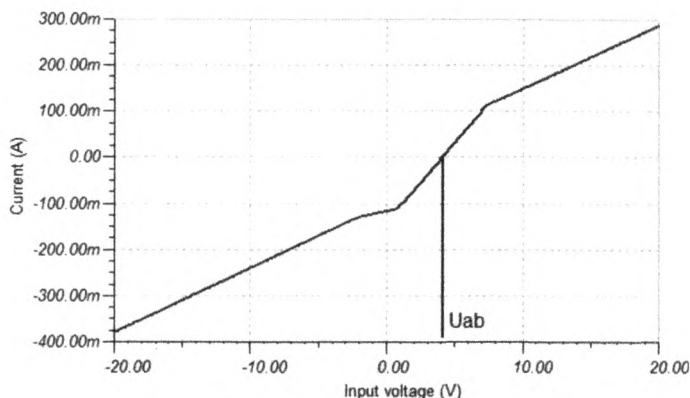


Рис. 8.19. ВАХ параллельного соединения трёх НЭ

10. Ключом [7] подключить источник напряжения E_0 . В режиме Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока получить ВАХ трёх параллельно включённых нелинейных элементов из п. 8. В точке ВАХ с нулевым значением тока найти U_{ab} (рис. 8.19) и сравнить с результатом из п. 9.

Домашнее задание

1. Построить графики ВАХ исследованных нелинейных элементов и объяснить принципы их формирования.

2. Для исследованных НЭ найти токи и напряжения в последовательном соединении НЭ с заданным в табл. 8.1 источником напряжения и линейным резистором.

3. Построить результирующую ВАХ для параллельного соединения двух НЭ по п. 5. Графически найти режим цепи для заданных в таблице 8.1 параметров и сравнить с экспериментом.

4. Построить результирующую ВАХ для последовательного соединения двух НЭ (п. 6). Двумя методами рассчитать режим в цепи и сравнить с результатами эксперимента.

5. Произвести графический расчёт токов в разветвлённой цепи (п. 8) методом двух узлов и сопоставить результаты опыта и расчёта.

6. При оформлении отчёта рекомендуем использовать методы численного расчёта нелинейной цепи с использованием программы Mathcad [3].

9 ВЫПРЯМИТЕЛИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ

9.1. Краткое теоретическое введение

Выпрямление переменного тока

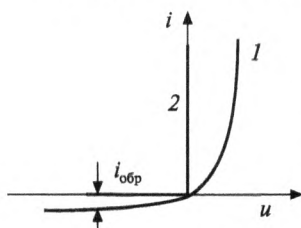


Рис. 9.1. Вольтамперная характеристика реального (1) и идеального (2) диода

В данной главе проводится анализ схем однополупериодного и двухполупериодного выпрямления переменного тока с использованием полупроводниковых диодов. ВАХ реального неуправляемого диода (кривая 1, рис. 9.1) имеет ветвь прямого тока при $u > 0$ и ветвь обратного тока при $u < 0$. Обратный ток $i_{обр}$ у качественных диодов очень невелик (единицы микроампер). Прямой ток может достигать у мощных диодов десятков ампер. При теоретическом исследовании процессов выпрямления реальный диод мы заменяем идеальным, имеющим прямоугольную ВАХ (кривая 2, рис. 9.1).

На рис. 9.2 показана простейшая схема однополупериодного выпрямления, работающая на резисторную нагрузку. При входном напряжении $u(t) = U_m \sin \omega t$ ток и напряжение на R_n имеют вид положительных полувольт (рис. 9.3). Моменты отпирания и запираания диода определяются соответственно моментами перехода напряжения и тока через нулевые значения.

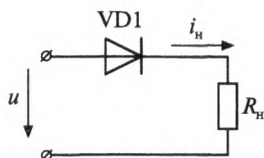


Рис. 9.2. Схема однополупериодного выпрямителя

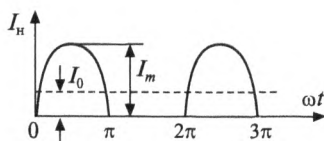


Рис. 9.3. Диаграмма тока в нагрузке однополупериодного выпрямителя

В мостовой схеме двухполупериодного выпрямления (рис. 9.4) при входном напряжении $u(t) = U_m \sin \omega t$ ток в нагрузку поступает в каждый полупериод (рис. 9.5) и имеет форму двух положительных полувольт $i_n(t) = (U_m/R_n)|\sin \omega t|$. В положительные полупериоды

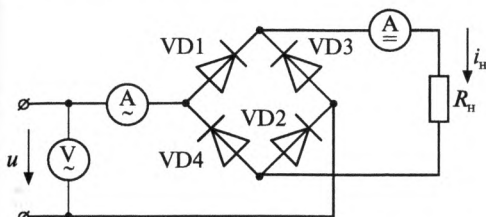


Рис. 9.4. Схема двухполупериодного выпрямителя

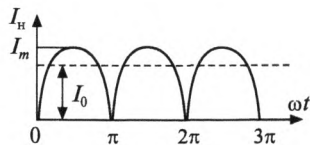


Рис. 9.5. Диаграмма тока в нагрузке двухполупериодного выпрямителя

входного напряжения диоды VD1 и VD2 открыты, а VD3 и VD4 закрыты. В отрицательные полупериоды диоды VD1 и VD2 заперты, а VD3 и VD4 открыты.

Напряжение на нагрузке R_n равно $u_n(t) = U_m |\sin \omega t|$ и будет повторять по форме кривую тока.

Функции $i_n(t)$, $u_n(t)$ в этих случаях состоят из суммы постоянной составляющей и гармоник.

В схеме *однополупериодного выпрямления* постоянные составляющие напряжения или средние за период значения напряжения $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_n dt$ и тока $I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_n dt$ равны: $U_0 = U_m/\pi$, $I_0 = I_m/\pi$. Первая, вторая и четвертая гармоники напряжения имеют амплитуды соответственно $U_m/2$, $2U_m/3\pi$, $2U_m/15\pi$.

Для схемы *двухполупериодного выпрямления* постоянная составляющая напряжения на нагрузке $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_n dt = 2U_m/\pi$, а постоянная составляющая тока $I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_n dt = 2I_m/\pi$. Эти значения в два раза больше, чем в однополупериодном выпрямителе.

Вторая, четвертая и шестая гармоники имеют амплитуды соответственно: $4U_m/3\pi$, $4U_m/15\pi$, $4U_m/35\pi$.

Действующее значение переменного тока в нагрузке

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_n^2 dt}.$$

Для схемы двухполупериодного выпрямления $I = I_m/\sqrt{2}$, то есть такое же, как для синусоидального тока.

Для схемы однополупериодного выпрямления действующее значение тока в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем в схеме двухполупериодного выпрямления.

Сглаживание пульсаций выпрямленного тока, ёмкостной фильтр

Проанализируем работу схемы однополупериодного выпрямления при наличии ёмкостного фильтра (рис. 9.6).

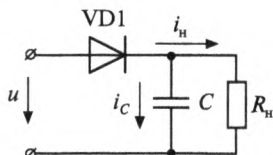


Рис. 9.6. Однополупериодный выпрямитель с ёмкостным фильтром

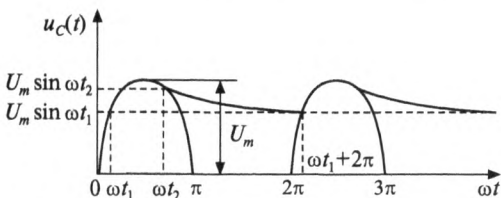


Рис. 9.7. Напряжение на ёмкости фильтра

В открытом состоянии диода $\omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2$ (рис. 9.6) напряжение $u = U_m \sin \omega t$ приложено к нагрузке R_n , C . Ёмкостный элемент схемы в эти моменты времени заряжается, ток через диод равен сумме токов через резистивный и ёмкостной элементы. В момент времени t_2 ток через диод равен нулю, диод закрывается. Угол запираания диода равен $\omega t_2 = \arctg(-\omega R_n C) = \pi - \arctg(\omega R_n C)$, ток через диод $i(\omega t_2) = 0$, напряжение на конденсаторе $U_c(\omega t_2) = U_m \sin \omega t_2$. После закрытия диода, начиная от t_2 до $(T + t_1)$, происходит разряд конденсатора C на резистор R_n по экспоненциальному закону $u_C = U_m \sin \omega t_2 e^{-(t-t_2)/R_n C}$. Кривая $u_C(t)$ приведена на рис. 9.7. В момент t_1 входное напряжение становится равным напряжению на ёмкостном элементе, диод открывается. Для определения момента открытия диода t_1 запишем равенство

$$U_m \sin(\omega t_1) = U_m \sin(\omega t_2) \exp \left[-\frac{2\pi + \omega t_1 - \omega t_2}{\omega R_n C} \right]. \quad (9.1)$$

Величину ёмкости C практически выбирают так, чтобы при заданной нагрузке выполнялось соотношение $\omega R_n C > 1$, тогда напряжение на ёмкости спадает относительно медленно.

Схема двухполупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром отличается от рис. 9.2 тем, что параллельно сопротивлению нагрузки R_n включается ёмкость C .

Решение уравнения (9.1) можно выполнить численно, используя Mathcad.

При $\omega R_n C > 10$ (с погрешностью 5 %) можно принять $\omega t_2 = \pi/2$, для расчёта ωt_1 пригодна приближенная формула

$$\sin(\omega t_1) = \exp \left[-\frac{1,5\pi + \omega t_1}{\omega R_n C} \right].$$

При этом следует принять значение $\omega t_1 < \pi/2$.

Зная ωt_1 и ωt_2 , найдём постоянную составляющую напряжения на нагрузке U_0 как среднее значение за период T в угловом измерении за 2π для однополупериодного выпрямителя и π для двухполу-

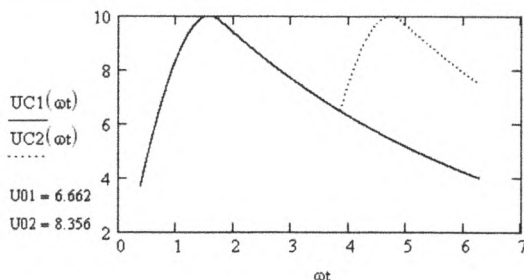


Рис. 9.8. Графики напряжения на нагрузке в однополупериодном ($UC1(\omega t)$) и двухполупериодном ($UC2(\omega t)$) выпрямителях при $m = \omega R_H C = 5$

периодного выпрямителя:

$$U_{01} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\omega t_1}^{\omega t_2} U_m \sin(\omega t) d\omega t + \int_{\omega t_2}^{2\pi + \omega t_1} u_C(t) d\omega t \right].$$

Рассчитанные в Mathcad графики формы выпрямленного напряжения на нагрузке приведены на рис. 9.8. В расчётах принято, что амплитуда переменного напряжения $U_m = 10$ В, $m = \omega R_H C = 5$, U_{01} , $UC1$ — постоянная составляющая и форма напряжения на нагрузке в однополупериодном выпрямителе, U_{02} , $UC2$ — постоянная составляющая и форма напряжения на нагрузке в двухполупериодном выпрямителе.

Степень пульсации напряжения или тока в нагрузке можно оценить коэффициентом пульсации

$$K_{\Pi} = (U_{\max} - U_{\min})/U_0.$$

Если $m > 100 \dots 200$, ёмкость C не успевает разряжаться за время периода T и напряжение на нагрузке будет практически равно амплитуде (пику) входного напряжения U_m . Такой выпрямитель называется пиковым детектором и применяется в радиотехнических устройствах для детектирования сигналов.

П-образный фильтр низких частот

П-образный фильтр низких частот (рис. 9.9) включают между выпрямителем и нагрузкой.

Наибольшее сглаживание пульсаций получают в симметричном фильтре. Для фильтра типа К параметр $k = \sqrt{L/C} = R_H$, $Z_1 = j\omega L$, $2Z_2 = -j2/\omega C$. Коэффициент передачи по напряжению для гармонических состав-

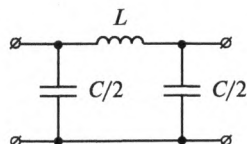


Рис. 9.9. П-образный LC-фильтр низких частот

ляющих пульсаций можно вычислить по формуле

$$K_U(\omega) = \left| \frac{R_n}{(1 + 0,5Z_1/Z_2)R_n + Z_1} \right|.$$

Частота среза ФНЧ $\omega_c = 2/\sqrt{LC}$ для однополупериодного выпрямителя должна быть в 2...3 раза меньше частоты первой гармоники, а для двухполупериодного выпрямителя — в 2...3 раза меньше частоты второй гармоники.

9.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Нарисуйте вольтамперные характеристики идеального и реального диода.
2. Нарисуйте схему однополупериодного выпрямителя и объясните его назначение и работу.
3. Нарисуйте схему двухполупериодного выпрямителя и объясните его назначение и работу.
4. Как рассчитать постоянное напряжение в активной нагрузке однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра? На сколько отличаются эти напряжения?
5. Для чего применяют сглаживающий ёмкостной фильтр в выпрямителях?
6. Как меняется напряжение на ёмкости сглаживающего фильтра в однополупериодном выпрямителе?
7. Как меняется напряжение на ёмкости сглаживающего фильтра в двухполупериодном выпрямителе?
8. Как рассчитать постоянное напряжение в активной нагрузке однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром? Какое наибольшее значение может иметь это напряжение и при каких условиях?
9. Сравните достоинства и недостатки однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя.
10. Как определить требуемую полосу пропускания сглаживающего LC-фильтра, работающего с выпрямителями?

9.3. Лабораторная работа № 9. Исследование выпрямителей на полупроводниковых диодах

Цель работы заключается в изучении работы одно- и двухполупериодных схем выпрямления, сглаживания пульсаций с помощью простейших фильтров, расчёта токов и напряжений в нагрузке и сопоставлении результатов расчёта и эксперимента.

Лабораторное задание

1. Схема моделирования выпрямителей показана на рис. 9.10. Генератор синусоидального напряжения VG1 подключается к диодному мосту из диодов D1, D2, D3, D4. Ключами [1] и [2] можно установить режим однополупериодного или двухполупериодного выпрямления. Нагрузка $R_1 = 1 \text{ кОм}$ подключается к диодам непосредственно или с использованием сглаживающих фильтров ($L_1 = 10 \text{ мГн}$, $C_1 = C_2 = 20 \text{ мкФ}$). Вспомогательный резистор $R_2 = 1 \text{ Ом}$ требуется для корректности расчётов и не влияет на точность моделирования.

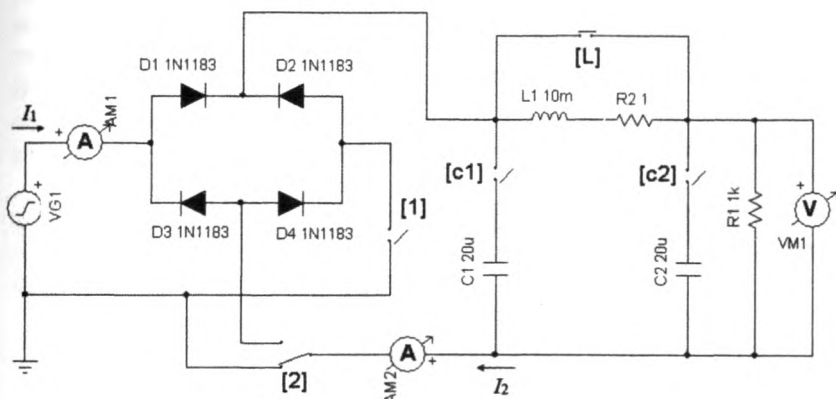


Рис. 9.10. Схема компьютерного моделирования выпрямителей

А. Исследование однополупериодного выпрямителя

2. Схема для компьютерного моделирования однополупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра показана на рис. 9.10. В ней ключ [1] разомкнут, ключ [2] находится в нижнем положении, ключ [L] замкнут, ключи [C1], [C2] разомкнуты. Выпрямление выполняется диодом D1.

3. Установить на генераторе частоту синусоидального сигнала по указанию преподавателя в диапазоне от 50 до 200 Гц, амплитуду 10 В.

4. В режиме *Анализ — Переходной процесс* получить графики напряжений на выходе генератора (VG1) и на нагрузке (VM1) (рис. 9.11). В окне результатов удалить графики VG1 и VM1. В меню результатов выбрать *Вид — Разделить кривые*. Получим совпадающие по форме графики токов I_{\sim} и $I_{=}$ (рис. 9.12).

5. Измерить значения постоянной составляющей и первой гармоники напряжений и токов в однополупериодном выпрямителе.

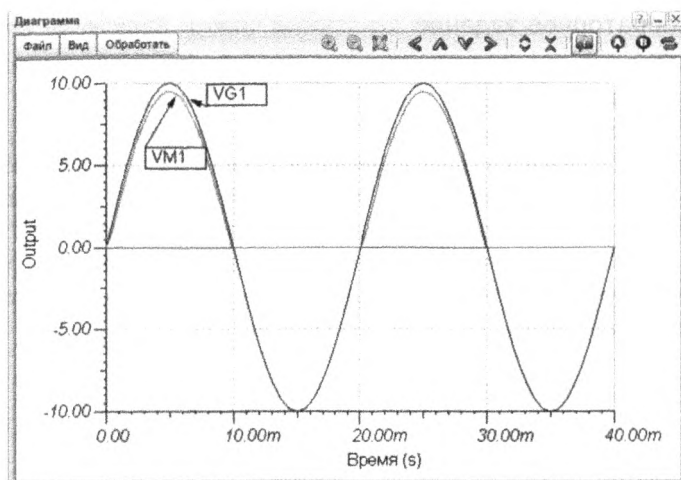


Рис. 9.11. Графики напряжений однополупериодного выпрямителя

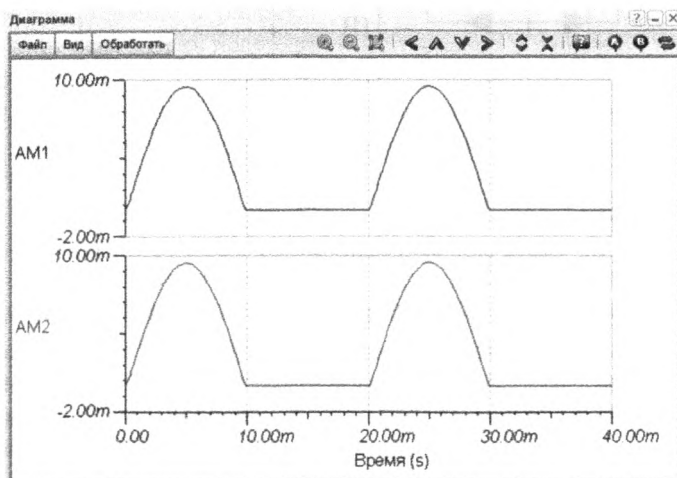
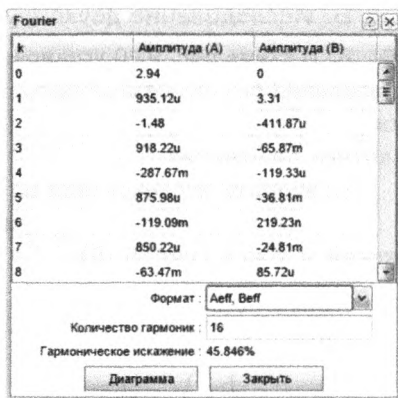


Рис. 9.12. Графики токов однополупериодного выпрямителя

Важное пояснение. В программе *TINACloud* измерительные приборы (вольтметр, амперметр, мультиметр) измеряют только постоянные и гармонические токи и напряжения. Поэтому в схеме рис. 9.10 эти приборы поставлены для обозначения выходных измеряемых параметров (*Output*) и не могут давать правильные значения в таблицах результатов. Все измерения несинусоидальных величин надо проводить с использованием анализа Фурье.

Выбрать в главном меню *Фурье анализ — Ряды Фурье*. В окне *Вывод* выбрать VM1. Нажать *Запустить*. В поле *Формат* выбрать Aeff, Beff. При этом будут вычисляться действующие значения постоянной составляющей и гармоник. В таблице (рис. 9.13) получим действующие значения постоянной составляющей 2,94 В ($k = 0$), первой гармоники –3,31 В ($k = 1$), второй гармоники –1,48 В ($k = 2$) и т.д. Знаки «минус» учитывают начальные фазы гармоник и не существенны для исследования выпрямителя.



k	Амплитуда (A)	Амплитуда (B)
0	2.94	0
1	935.12u	3.31
2	-1.48	-411.87u
3	918.22u	-65.87m
4	-287.67m	-119.33u
5	875.98u	-36.81m
6	-119.09m	219.23n
7	850.22u	-24.81m
8	-63.47m	85.72u

Формат: Aeff, Beff
 Количество гармоник: 16
 Гармоническое искажение: 45.846%

Диаграмма Закрыть

Рис. 9.13. Результаты анализа Фурье

6. В окне *Ряды Фурье — Вывод* выбрать AM1. Исследовать спектр входного тока I_1 . В схеме рис. 9.10 однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой без сглаживающего фильтра входной ток совпадает с выходным.

7. Подключить параллельно сопротивлению нагрузки конденсаторы C_1 и C_2 . Повторить исследования по пп. 4–6. Анализ Фурье показывает увеличение постоянной составляющей до 3,69 В (рис. 9.14).

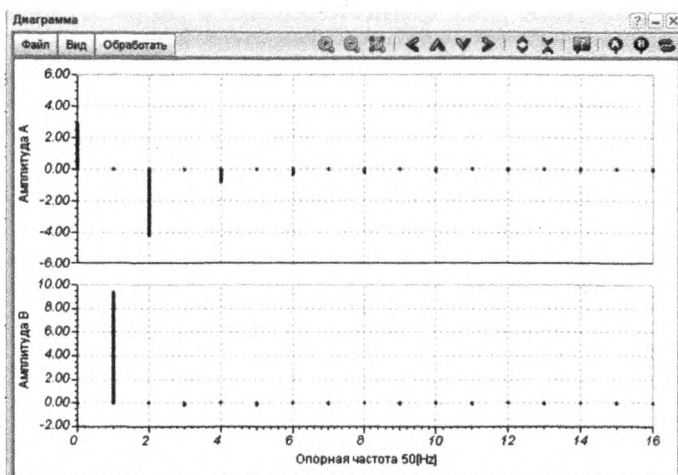


Рис. 9.14. Спектр Фурье напряжения на нагрузке однополупериодного выпрямителя

Б. Исследование двухполупериодного выпрямителя

8. В схеме рис. 9.10 установить режим двухполупериодного выпрямления без сглаживающего фильтра. Для этого замкнуть ключи [1] и [L], разомкнуть ключи [C1] и [C2], ключ [2] переключить в верхнее положение.

Повторить исследования по п. 4–7 для VM1, AM1, AM2.

Зарегистрировать все графики и действующие значения напряжений и токов (рис. 9.15).

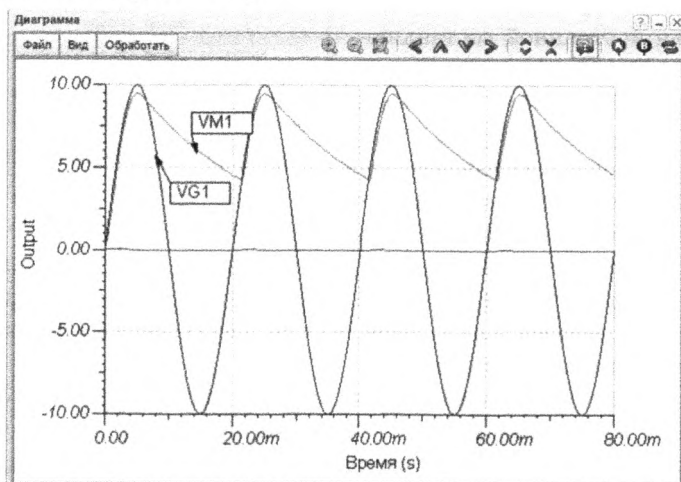


Рис. 9.15. Графики напряжений однополупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром

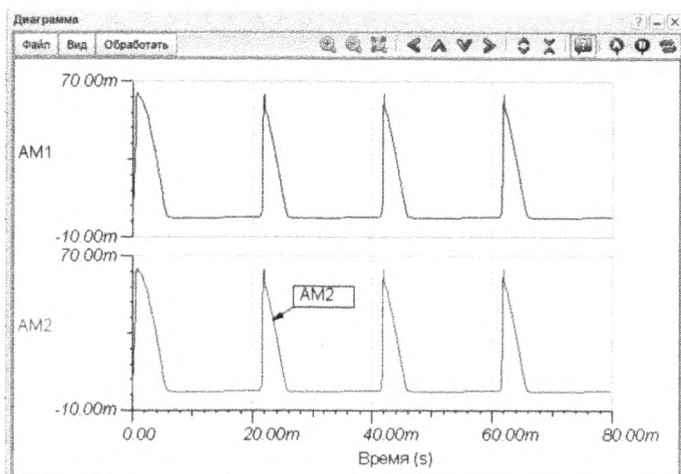


Рис. 9.16. Графики тока однополупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром

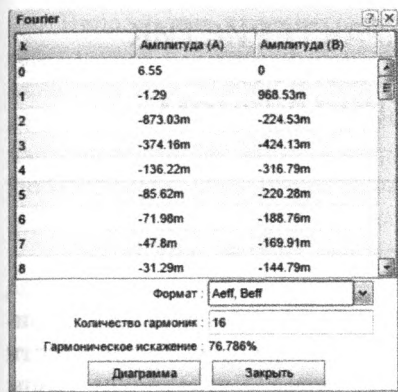


Рис. 9.17. Спектр Фурье напряжения на нагрузке однополупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром

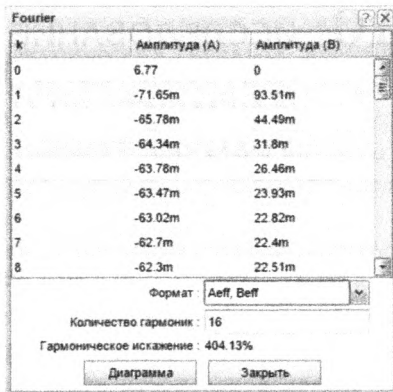


Рис. 9.18. Спектр Фурье напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя с LC-фильтром

9. Подключить к ёмкостям C_1 и C_2 индуктивность L_1 так, чтобы образовался П-образный сглаживающий ФНЧ. Рассчитать частоту среза ФНЧ по формуле $f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$. Установить частоту сигнала генератора $f > 1,5f_c$. Повторить исследования двухполупериодного выпрямителя с П-образным LC-фильтром.

Для этого в режиме *Анализ — Переходной процесс* исследования провести в интервале 0...20 мс и 20...40 мс, когда переходные процессы закончатся.

Сохранив в режиме *Анализ — Переходной процесс* установку интервала 20...40 мс, исследовать спектр VM1, AM1, AM2 при значении *Время начала дискретизации* 20m. Наблюдать возрастание постоянной составляющей и уменьшение пульсаций (рис. 9.16).

Домашнее расчётное задание

1. Построить графики напряжения на нагрузке для всех исследованных схем. Объяснить форму полученных графиков.

2. Для исследованных схем выпрямителей определить по экспериментальным данным U_{\max} , U_{\min} , постоянные составляющие U_0 , I_0 , первые, вторые и третьи гармоники $U_{(1)}-U_{(3)}$, коэффициент пульсаций K_p и сделать выводы о свойствах выпрямителей и сглаживающих цепей.

3. Используя частоту и напряжение сигнала из п. 9, рассчитать и построить спектр напряжения на выходе диодного моста двухполупериодного выпрямителя с идеальными диодами. Рассчитать коэффициент передачи сглаживающего П-образного ФНЧ на постоянном напряжении и второй гармонике сигнала.

10 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА И УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

10.1. Теоретические сведения

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих p - n -перехода. В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают n - p - n -транзисторы и p - n - p -транзисторы. Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей обоих знаков (свободных дырок и электронов). Трёхслойная структура n - p - n -транзистора показана на рис. 10.1,а. На рис. 10.1,б показано условное обозначение n - p - n -транзистора, на рис. 10.1,в — условное обозначение p - n - p -транзистора.

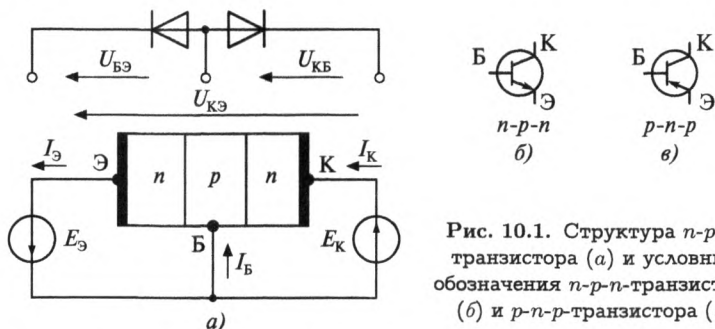


Рис. 10.1. Структура n - p - n -транзистора (а) и условные обозначения n - p - n -транзистора (б) и p - n - p -транзистора (в)

Средний слой биполярного транзистора называют базой (Б), один крайний слой называют коллектором (К), другой крайний слой называют эмиттером (Э). В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, различают следующие режимы его работы: линейный (усилительный), насыщения, отсечки, инверсный. В линейном режиме эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный — в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении. В режиме отсечки оба перехода смещены в обратном направлении. В инверсном режиме коллекторный переход смещён в прямом направлении, а эмиттерный в обратном.

Биполярные транзисторы применяются в схемах усилителей, генераторов и преобразователей электрических сигналов, изготавливаются из кремния, германия или арсенида галлия и делятся на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (до 30 МГц), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (более 300 МГц). По мощности транзисторы бывают маломощные (до 300 мВт), средней мощности (до 1,5 Вт) и большой мощности (более 1,5 Вт).

Работа транзистора основана на управлении токами электронов в зависимости от приложенных к его переходам напряжений. В линейном режиме приложенное к базе напряжение $U_{БЭ}$ (для $n-p-n$ -транзистора $U_{БЭ} > 0$) открывает переход база-эмиттер. Свободные электроны инжектируются из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера $I_Э$ в цепи эмиттера. Большая часть электронов, инжектированных из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем $p-n$ -перехода между базой и коллектором, образуя ток коллектора $I_К$ в цепи коллектора. Незначительная часть свободных электронов, инжектированных из эмиттера в базу, образует ток $I_Б$.

В схеме рис. 10.1,а база является общим электродом входной и выходной цепи. Такая схема включения биполярного транзистора называется *схемой с общей базой* (ОБ). В усилителях сигналов применяют также схемы включения биполярных транзисторов с *общим эмиттером* (ОЭ) и *общим коллектором* (ОК).

Схема с общим эмиттером наиболее распространена, исследуется в лабораторной работе и показана на рис. 10.2. В этой схеме напряжение на нелинейном переходе база-эмиттер $U_{БЭ} = E_Б - I_Б R_Б$. Напряжение на переходе коллектор-эмиттер $U_{КЭ} = E_К - I_К R_К$.

Расчёт статического режима транзистора для усиления малого сигнала проводят графически. Сначала на выходных характеристиках (рис. 10.3,б) проводят нагрузочную прямую для заданных $E_К$, $R_К$ и находят номинальный ток базы $I_Б^*$, при котором напряжение $U_{КЭ}$ примерно составляет $E_К/2$. Затем по входной характеристике для заданного $E_Б$ находят $R_Б$.

В линейном режиме усиления малого сигнала биполярный транзистор описывают системой уравнений четырёхполюсника в Н-параметрах:

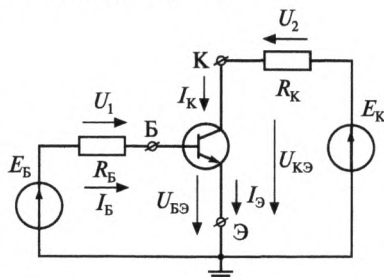


Рис. 10.2. Схема включения транзистора с общим эмиттером

$$u_{БЭ} = h_{11}i_Б + h_{12}u_{КЭ}; \quad i_К = h_{21}i_Б + h_{22}u_{КЭ},$$

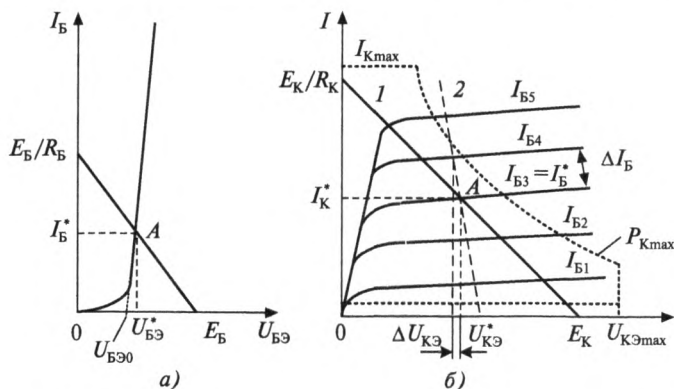


Рис. 10.3. Входная (а) и выходные (б) характеристики биполярного транзистора

где

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left. \frac{u_{БЭ}}{i_B} \right|_{u_{КЭ}=\text{const}}; & h_{12} &= \left. \frac{u_{БЭ}}{u_{КЭ}} \right|_{i_B=\text{const}}; \\ h_{21} &= \left. \frac{i_K}{i_B} \right|_{u_{КЭ}=\text{const}}; & h_{22} &= \left. \frac{i_K}{u_{КЭ}} \right|_{i_B=\text{const}}; \end{aligned} \quad (10.1)$$

Н-параметры биполярного транзистора можно рассчитать по вольтамперным характеристикам и определить экспериментально. Их типовые значения находятся в пределах: $h_{11} = 10^3 \dots 10^4$ Ом; $h_{12} = 2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$; $h_{21} = 20 \dots 200$; $h_{22} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ См.

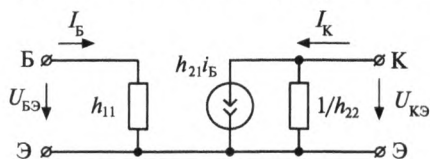


Рис. 10.4. Схема замещения биполярного транзистора на постоянном токе и низких частотах

В этой схеме $h_{11} = R_{вх}$, $1/h_{22} = R_{вых}$ — входное и выходное сопротивления; $h_{21}i_B$ — источник тока, управляемый током базы i_B . Таким образом, биполярный транзистор представляет собой источник тока, управляемый током.

Эта схема замещения используется на постоянном токе и низких частотах, когда инерционность транзистора можно не учитывать. В более общем случае Н-параметры транзистора являются комплексными величинами, в схему замещения добавляются ёмкости между базой и коллектором C_K и базой и эмиттером $C_Э$.

Пренебрегая малым значением параметра h_{12} , получим схему замещения биполярного транзистора, включённого по схеме с ОЭ, в режиме малого сигнала (рис. 10.4). В этой схеме $h_{11} = R_{вх}$, $1/h_{22} = R_{вых}$ — входное и выходное сопротивления

Для работы в линейном режиме на выходных характеристиках транзистора (см. рис. 10.3,б) в режиме покоя выбирают рабочую точку А в центре линии нагрузки 1 цепи коллектора. В рабочей точке по выходным характеристикам находят ток коллектора I_K^* и ток базы I_B^* . Область рабочих режимов транзистора на рис. 10.3,б отмечена пунктирными линиями и ограничивается максимальными допустимыми значениями тока коллектора $I_{K\max}$, напряжения $U_{K\max}$, мощности рассеяния $P_{K\max} \approx U_{KЭ} I_{KЭ}$ и нелинейными искажениями при малых значениях тока коллектора.

Для стабилизации рабочей точки в линейных усилительных каскадах обычно применяют схему с общим эмиттером и отрицательной обратной связью (рис. 10.5). Резисторы R_1 , R_2 задают номинальный ток базы. Резистор $R_Э$ создаёт отрицательную обратную связь по постоянному току и служит для стабилизации режима транзистора. Ёмкость $C_Э$ называется блокировочной, устраняет отрицательную обратную связь по переменной составляющей и увеличивает усиление. Входной переменный сигнал через разделительную ёмкость C_1 поступает на базу транзистора и усиливается. Усиленный выходной сигнал с резистора R_K через разделительную ёмкость C_2 поступает на нагрузку R_H , которой может быть следующий усилительный каскад.

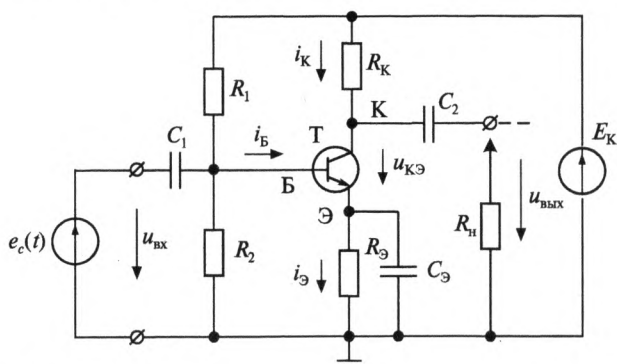


Рис. 10.5. Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером

Если напряжение входного сигнала $u_{вх}$ невелико, то работу усилительного транзисторного каскада можно представить в виде наложения режима покоя с постоянным источником ЭДС E_K и с постоянными составляющими тока базы I_B^* , тока коллектора I_K^* и тока эмиттера $I_Э^*$, соответствующими точке А на рабочей характеристике, и режима малого сигнала с переменными составляющими i_B , i_K , $i_Э$, $u_{вх}$, $u_{вых}$.

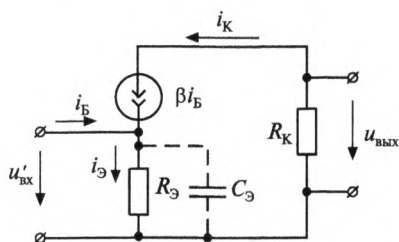


Рис. 10.6. Схема замещения усилительного транзисторного каскада для малого переменного сигнала

В схеме замещения рис. 10.6 сопротивления R_1 и R_2 схемы рис. 10.5 не учитываются, ёмкости для переменного сигнала сначала считаются короткозамкнутыми.

Для схемы замещения без учета ёмкостей коэффициент усиления по напряжению в режиме холостого хода

$$K'_{Ux} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = -\frac{R_K}{R_E + r_E},$$

где $r_E = 25 \text{ мВ}/I_E$ — дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер; I_E — постоянный ток эмиттера.

Отрицательное значение комплексного коэффициента усиления напряжения отражает изменение фаз выходного напряжения на 180° относительно входного напряжения.

Если в схеме учесть ёмкость C_E , то коэффициент усиления в режиме холостого хода станет равным

$$K_{Ux} = -\frac{R_K}{R_E + r_E} \sqrt{1 + (\omega C_E R_E)^2}. \quad (10.2)$$

Входное сопротивление по переменному току определяется как параллельное соединение входного сопротивления транзистора $r_{BЭ} = h_{11} = \beta r_E$ и сопротивления R_B , которое служит для установки рабочей точки каскада.

В схеме (см. рис. 10.5)

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_{\text{вх}} = \frac{r_{BЭ} R_B}{r_{BЭ} + R_B}. \quad (10.3)$$

Входная разделительная ёмкость C_1 образует с входным сопротивлением $R_{\text{вх}}$ делитель напряжения и коэффициент передачи входной цепи составит

$$K_{\text{вц}} = \frac{R_{\text{вх}} \omega C_1}{\sqrt{1 + (R_{\text{вх}} \omega C_1)^2}}. \quad (10.4)$$

В режиме покоя рабочая точка находится на пересечении нагрузочной прямой

$$I_K = \frac{E - U_{KЭ}}{R_K + R_E}$$

с выходной ВАХ, соответствующей номинальному току базы I_B^* .

Схема замещения режима малого сигнала на низких частотах показана на рис. 10.6.

С учётом (10.2), (10.4) коэффициент усиления транзисторного каскада с общим эмиттером на низких частотах можно рассчитать по формуле

$$K_{U_{\text{нч}}} = K_{U_x} K_{\text{вц}}. \quad (10.5)$$

С учётом сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ на высокой частоте для малого переменного сигнала соответствует нагрузочная прямая 2, показанная на рис. 10.3 пунктирной линией и определяемая уравнением

$$u_{\text{кэ}} = -\frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{к}}} i_{\text{к}}.$$

Ток в цепи нагрузки

$$i_{\text{н}} = -\frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{к}}} i_{\text{к}}.$$

На высоких частотах применяют более точные модели транзисторов. Наиболее распространёнными являются модели, основанные на схеме замещения Джаколетто (рис. 10.7), в которой сопротивление $r_{\text{б}}$ — распределённое сопротивление базы, $g_{\text{э}}$ и $C_{\text{э}}$ отражают полную проводимость эмиттерного перехода, $g_{\text{к}}$ и $C_{\text{к}}$ учитывают влияние коллекторного перехода, проводимость $g_{\text{кэ}}$ учитывает связь между эмиттером и коллектором. Усилительные свойства транзистора учтены крутизной S .

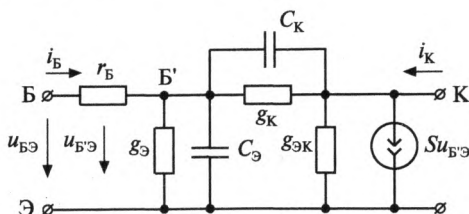


Рис. 10.7. Схема замещения транзистора на высокой частоте

10.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Устройство и принцип работы биполярных транзисторов.
2. В чем отличие $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзистора?
3. Схемы включения биполярных транзисторов.
4. Входные характеристики биполярного транзистора и методы их измерения.
5. Выходные характеристики биполярного транзистора и методы их измерения.

6. Уравнения биполярного транзистора в системе Н-параметров.
7. Физический смысл и методы измерения Н-параметров биполярных транзисторов.
8. Схема замещения биполярного транзистора на постоянном токе и низких частотах.
9. Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером.
10. Выбор рабочей точки транзисторного усилителя для малых сигналов.
11. Чем обеспечивается режим транзисторного усилителя по постоянному току и стабилизация рабочей точки?
12. Расчёт коэффициента усиления транзисторного усилителя в режиме холостого хода.
13. Расчёт коэффициента передачи входной цепи транзисторного усилителя.
14. Расчёт коэффициента усиления транзисторного усилителя на низких частотах с учётом входной цепи.

10.3. Лабораторная работа № 10. Исследование характеристик биполярного транзистора и усилителя на биполярном транзисторе


Цель работы — исследование вольт-амперных характеристик биполярного транзистора и усилителя на его основе.

Лабораторное задание

А. Исследование входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером и определение статического коэффициента передачи тока

1. Собрать схему, показанную на рис. 10.8. В этой компьютерной модели использован транзистор BC140 (аналог отечественного транзистора КТ630). Модель транзистора может быть задана преподавателем.

Транзистор работает в усилительном режиме: эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный переход в обратном направлении (на эмиттер поступает отрицательный потенциал, а на базу и коллектор положительный). В этом режиме транзистор обеспечивает максимальное усиление сигнала по току, напряжению и мощности.

Для размещения на схеме транзистора выберите во вкладке *Полупроводники*  *NPN Биполярный Транзистор*.

2. В схеме установить $V_{S1} = V_{S2} = 5$ В. Ток базы транзистора измеряется амперметром *АМ1*.

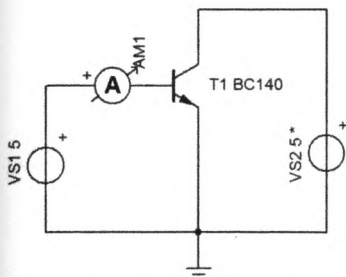


Рис. 10.8. Схема компьютерного моделирования биполярного транзистора

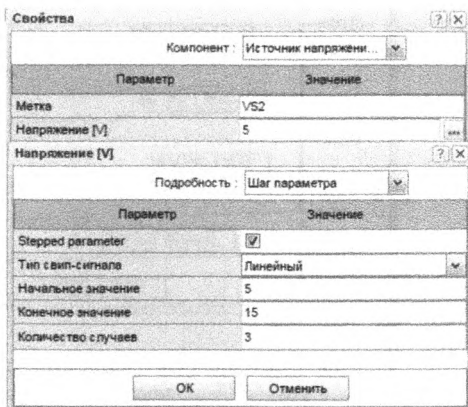


Рис. 10.9. Окно настройки многовариантного анализа

3. Для снятия входных характеристик транзистора при различных значениях $U_{КЭ}$ выделите VS2, в строке «Напряжение» (рис. 10.9) нажимаем *Подробности*. Выбираем *Шаг параметра* — *Начальное значение* = 5, *Конечное значение* = 15, *Количество случаев* = 3.

4. В строке меню выберите *Анализ — Режим — Шаг параметра*. Затем *Анализ — Анализ постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока*. В диалоговом окне (рис. 10.10) установите начальное значение анализа: *Начальное значение* = 0 В, *Конечное значение* = 1 В, *Количество точек* = 100, ввод VS1. Нажмите *Запустить*.

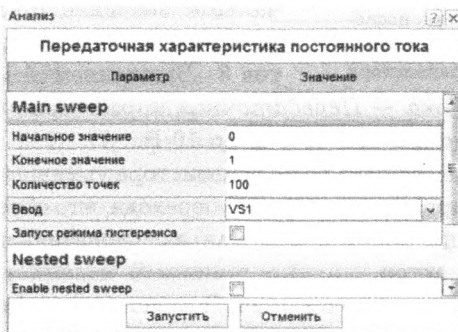


Рис. 10.10. Окно передаточных характеристик постоянного тока

5. Откроется окно результатов (рис. 10.11) с четырьмя графиками. Для идентификации графиков выберете *Auto Label* и укажите на интересующий график.

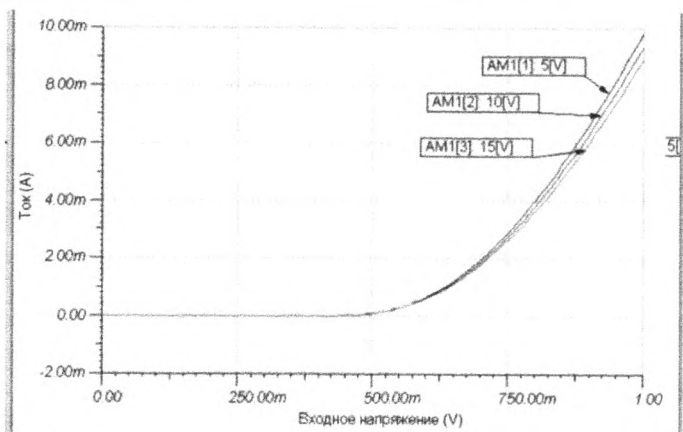


Рис. 10.11. Входные вольтамперные характеристики транзистора

Б. Исследование выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

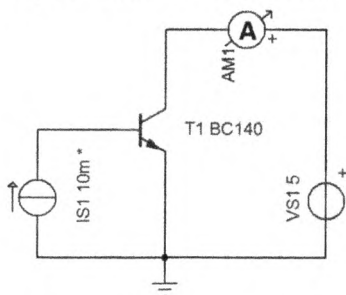


Рис. 10.12. Схема исследования выходных характеристик транзистора

6. Схема для снятия выходных характеристик биполярного транзистора показана на рис. 10.12. К базе транзистора подключается источник тока.

7. Для снятия выходной характеристики при различных значениях тока базы нужно сделать источник тока $IS1$ управляемым объектом. Начальное значение тока 250 мкА, конечное значение 2 мА, число вариантов 8. Выполняем Анализ— Анализ

постоянного тока — Передаточная характеристика постоянного тока, изменяя $VS1$ от 0 В до 10 В.

При увеличении тока базы транзистора уменьшается высота потенциального барьера эмиттерного перехода, что обуславливает увеличение инжекции носителей заряда, а следовательно, и увеличение тока через коллектор.

В. Выбор рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером

8. Собрать схему транзисторного усилителя рис. 10.14. Установить напряжение питания $VS1 = 10$ В. Напряжение питания $VS1$ и номиналы резисторов могут быть заданы преподавателем. Переменный входной сигнал не подключать, ключ 1 должен быть разомкнут.

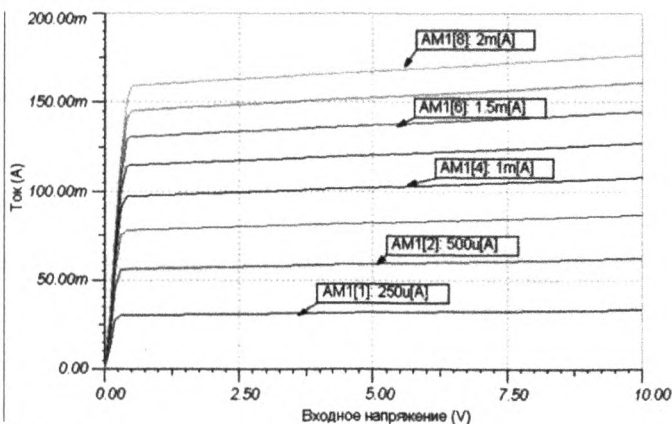


Рис. 10.13. Графики ВАХ транзистора при разных значениях тока базы

9. Измерить и записать значения постоянной составляющей тока коллектора I_K (AM1) и напряжения $U_{КЭ}$ (VM1).

Измерение напряжений и токов в схеме можно выполнить и без включения измерительных приборов. Чтобы получить полный отчет обо всех напряжениях и токах в схеме, выберите в главном меню Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока (рис. 10.15).

10. Регулируя сопротивление R_3 , можно установить напряжение $U_{КЭ} = 5$ В. Программа TINACloud позволяет выполнить это в автоматическом режиме. Для этого выделяем вольтметр VM1, в окне *Properties* (рис. 10.16) выбираем *Оптимизация/цель* — Да, далее в этой же строке *Подробнее* и устанавливаем *Значение* = 5.

Далее выбираем резистор R_3 . В окне R_3 в строке *Сопротивление* щелкаем *Подробнее* — *Оптимизация/объект*, устанавливаем *Начальное значение* = 120k, *Конечное значение* = 180k. В главном меню выбираем Анализ — Оптимизация. В окне Оптимизации (рис. 10.17) выбираем *Обычный поиск* и *Линейное сканирование*.

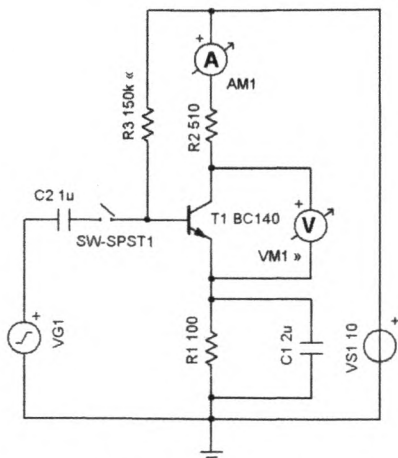
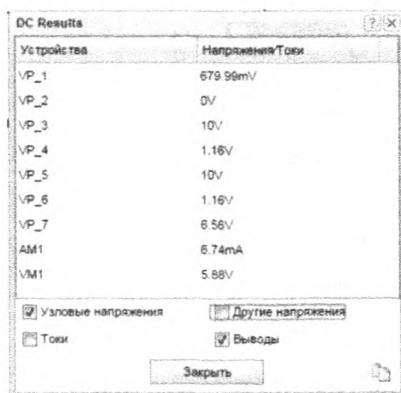


Рис. 10.14. Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером



Устройства	Напряжения/Токи
VP_1	679.99mV
VP_2	0V
VP_3	10V
VP_4	1.16V
VP_5	10V
VP_6	1.16V
VP_7	6.58V
AM1	6.74mA
VM1	5.88V

☒ Условные напряжения ☐ Другие напряжения
☒ Токи ☒ Выводы

Закреть

Рис. 10.15. Таблица результатов анализа схемы на постоянном токе



Вольметр: VM1

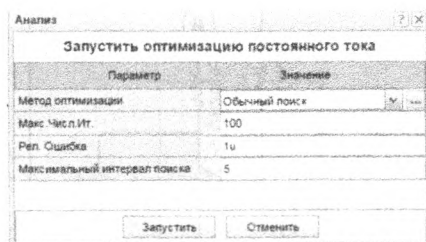
Параметр	Значение
Метка	VM1
Режим ввода/вывода	Вывод
Ошибки	Нет
Оптимизация/Цель	Да
Оптимизация/Цель	Да

Да

Параметр	Значение
Режим	Значение
Значение	5
Устойчивость	5

OK Отменить

Рис. 10.16. Окно установки целей оптимизации

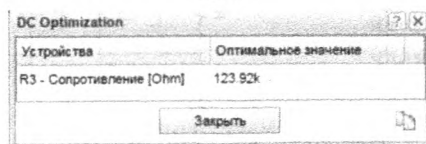


Запустить оптимизацию постоянного тока

Параметр	Значение
Метод оптимизации	Обычный поиск
Макс. Числ. ит.	100
Rel. Ошибка	1u
Максимальный интервал поиска	5

Запустить Отменить

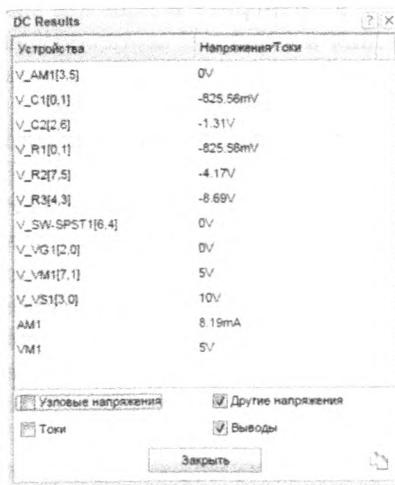
Рис. 10.17. Окно установок оптимизации



Устройство	Оптимальное значение
R3 - Сопротивление [Ohm]	123.92k

Закреть

Рис. 10.18. Результат оптимизации сопротивления R_3



Устройства	Напряжения/Токи
V_AM1[3.5]	0V
V_C1[0.1]	-825.56mV
V_C2[2.6]	-1.31V
V_R1[0.1]	-825.56mV
V_R2[7.5]	-4.17V
V_R3[4.3]	-8.69V
V_SW-SPST1[6.4]	0V
V_VG1[2.0]	0V
V_VM1[7.1]	5V
V_VS1[3.0]	10V
AM1	8.19mA
VM1	5V

☐ Условные напряжения ☒ Другие напряжения
☐ Токи ☒ Выводы

Закреть

Рис. 10.19. Токи и напряжения в схеме после оптимизации

После вычисления получаем результат оптимального выбора нагрузки (рис. 10.18):

11. Оптимальное значение резистора R_3 автоматически устанавливается в схеме. Повторно проведём измерения. Отчёт о напряжениях и токах в схеме после оптимизации (рис. 10.19).

Г. Исследование работы транзисторного усилителя с общим эмиттером в режиме малого сигнала

12. Собрать схему на рис. 10.20. Подключить источник переменного сигнала, замкнув ключ 1. Амплитуда генератора *DC* уро-

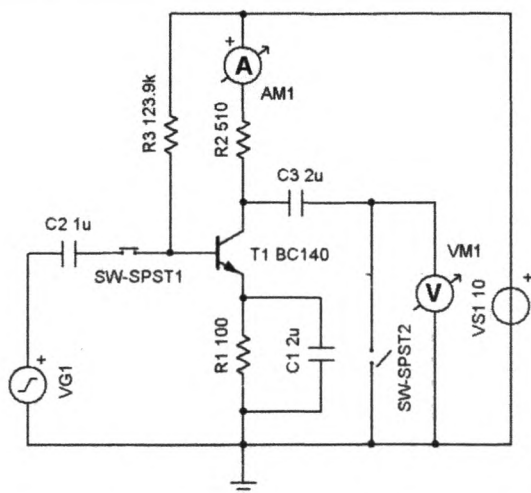


Рис. 10.20. Схема исследования транзисторного усилителя в режиме малого сигнала

вень = 0, параметр *Сигнал* установить *Синусоидальный* с амплитудой 50 мВ и частотой 1 кГц.

13. Исследовать амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики транзисторного усилителя в режиме холостого хода (рис. 10.21). Ключ 2 разомкнуть. В главном меню выбираем Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристис-

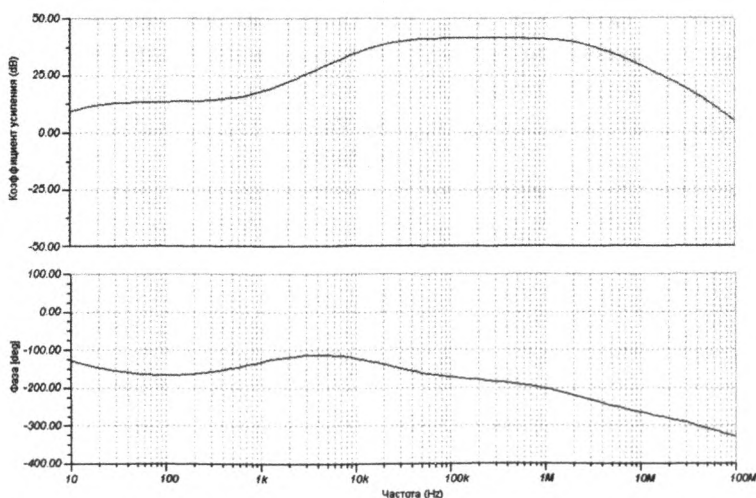


Рис. 10.21. АЧХ и ФЧХ транзисторного усилителя в режиме холостого хода

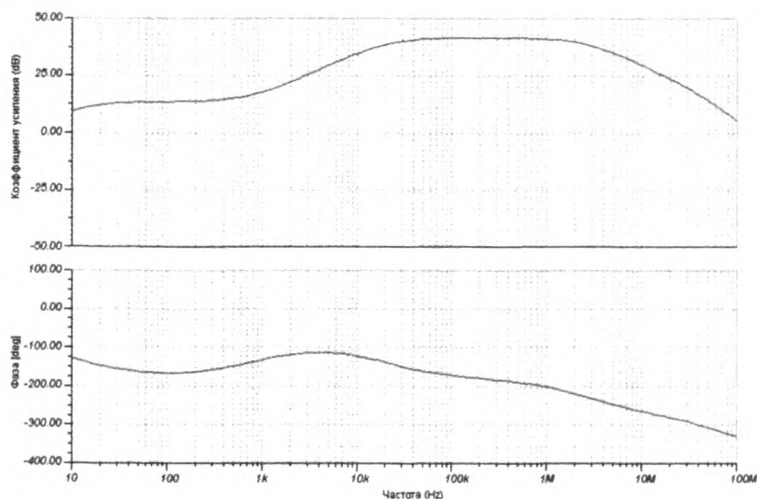


Рис. 10.22. АЧХ и ФЧХ транзисторного усилителя с подключённой нагрузкой

тока переменного тока. Частота меняется от 10 Гц до 100 кГц, масштаб логарифмический.

14. Подключить к транзисторному усилителю нагрузку $R_4 = 2$ кОм. Для этого нужно замкнуть ключ 2. Повторить измерения по п. 13 (рис. 10.22).

Д. Исследование искажений выходного сигнала

15. В схеме (см. рис. 10.20) с подключённой нагрузкой установить частоту сигнала 20 кГц. Амплитуду сигнала генератора VG1 сделать управляемым параметром и задать 10 значений от 10 до

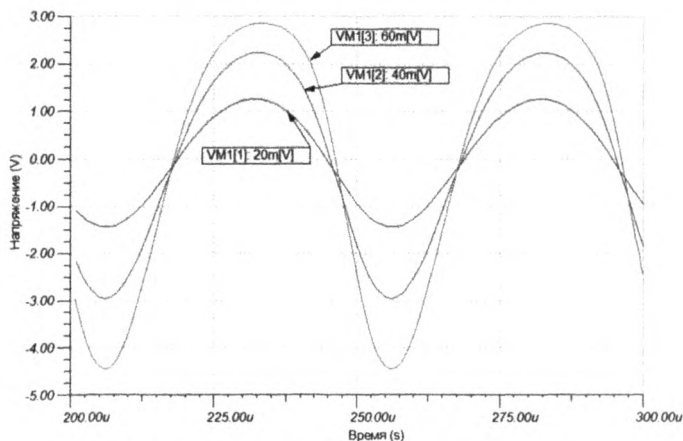


Рис. 10.23. Графики искажений выходного сигнала

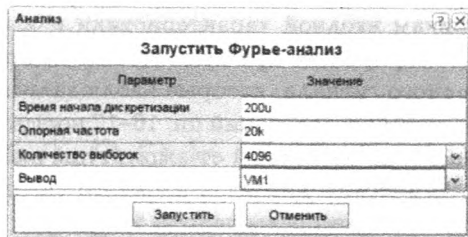


Рис. 10.24. Фурье-анализ нелинейных искажений

100 мВ. В режиме *Анализ — Переходный процесс* получить графики выходного сигнала на интервале 200...300 мкс (рис. 10.23).

16. Отключить управление амплитудой генератора VG1. Установить амплитуду сигнала 10 мВ и выполнить *Анализ — Фурье анализ — Ряды Фурье* для действующих значений выходного напряжения VM1 (рис. 10.24). *Время начала дискретизации* должно быть 200 мкс, чтобы переходные процессы успели закончиться. Записать рассчитанные нелинейные искажения (*Гармоническое искажение* = 3,5 %), которые определяются как отношение действующего значения напряжения или тока всех высших гармоник к действующему значению напряжения или тока основной частоты.

17. Повторить измерение нелинейных искажений по п. 16 для значений амплитуды 20 мВ, 40 мВ и 60 мВ.

Домашнее задание

1. По данным экспериментов построить графики входной характеристики, семейство выходных характеристик биполярного транзистора и зависимость статического коэффициента передачи тока β от тока базы.

2. Построить для схемы транзисторного усилителя (см. рис. 10.20) линии нагрузки по постоянному току и по переменному сигналу на высокой частоте.

3. Для рабочей точки А по графикам входной и выходных характеристик найти по формулам (10.1) параметры h_{11} , h_{21} , h_{22} . Нарисовать схему замещения транзистора по постоянному току с Н-параметрами (см. рис. 10.4).

4. По формулам (10.2)–(10.5) рассчитать коэффициенты усиления транзисторного каскада на частотах 200 Гц, 5 кГц и 20 кГц в режиме холостого хода. Сравнить результаты расчётов с экспериментальными данными (см. рис. 10.21).

5. По графикам входной характеристики и выходных характеристик проиллюстрировать причины возникновения нелинейных искажений выходного сигнала, которые наблюдались в п. 15.

6. По результатам исследований пп. 16–17 построить график зависимости нелинейных искажений от амплитуды входного сигнала. Определить динамический диапазон входного сигнала, в котором нелинейные искажения не превышают 5 %.

11 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА И УСИЛИТЕЛЯ НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

11.1. Теоретическое введение

Полевыми или униполярными транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых изменение тока производится изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Прохождение тока в канале обусловлено только одним типом зарядов. Электроды, подключённые к каналу, называются стоком (*Drain*) и истоком (*Source*). Управляющий электрод называется затвором (*Gate*). Напряжение управления прикладывается между затвором и истоком.

В зависимости от выполнения затвора униполярные транзисторы делятся на две группы: с управляющим *p-n*-переходом и с изолированным затвором на основе конструкции металл-диэлектрик-полупроводник (так называемые МДП-транзисторы).

Устройство полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом показано на рис. 11.1.

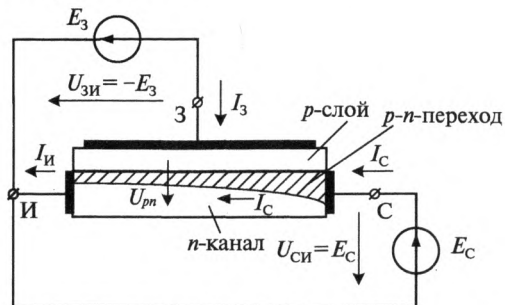


Рис. 11.1. Устройство полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Между истоком И и стоком С расположен *n*-канал из полупроводника *n*-типа и включён источник напряжения положительным полюсом к стоку. В *n*-канале есть ток проводимости I_C , значение которого зависит от сопротивления канала, связанного с его шириной. Ширину канала можно изменять, включив между затвором 3 и истоком И источник управляющего напряжения E_3 отрицательным полюсом к затвору.

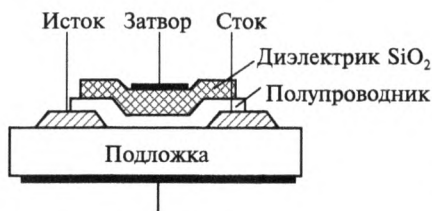


Рис. 11.2. Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

Утечки затвора пренебрежимо мал. Полупроводниковый канал может быть обеднён носителями заряда или обогащён ими. При обеднённом канале электрическое поле затвора создаёт канал и повышает его проводимость, поэтому канал называется *индуцированным*. Если канал обогащён носителями и существует без электрического поля затвора, то он называется *встроенным*. Электрическое поле в этом случае в зависимости от полярности напряжения $U_{зи}$ может приводить либо к обеднению канала носителями зарядов, либо к обогащению его. В результате изменяется проводимость канала.

Проводимость канала может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то он называется *n*-каналом. Каналы с дырочной проводимостью называются *p*-каналами. Подложка Π является полупроводником, отличающимся по проводимости от канала. Как правило, подложку соединяют с истоком.

Схематические изображения полевых транзисторов показаны на рис. 11.3.

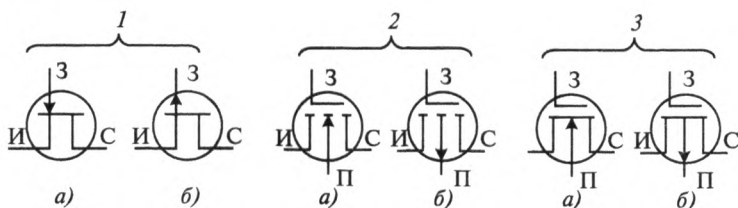


Рис. 11.3. Схематические изображения полевых транзисторов: 1 — с управляющим *p-n*-переходом; 2 — с индуцированным каналом; 3 — со встроенным каналом; а — для канала *n*-типа; б — для канала *p*-типа

Важное значение имеют передаточные характеристики полевых транзисторов, которые выражают зависимость тока стока от напряжения затвор-исток $I_C(U_{зи})$ и позволяют определить полярность управляющего напряжения, направление тока в канале и диапазон изменения управляющего напряжения (рис. 11.4).

Полевые транзисторы с каналом n -типа имеют положительный ток и работают при положительном напряжении на стоке, а полевые транзисторы с каналом p -типа имеют отрицательный ток и работают при отрицательном напряжении на стоке. Характеристики полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом при нулевом напряжении $U_{зи}$ имеют максимальное значение тока $I_{C \text{ нач.}}$. При увеличении запирающего напряжения ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

Характеристики транзисторов с индуцированным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют нулевой ток. Ток стока появляется при напряжении на затворе больше порогового и увеличивается с ростом напряжения $U_{зи}$.

Характеристики транзисторов со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют начальное значение тока $I_{C \text{ нач.}}$. Эти транзисторы работают как при положительных, так и при отрицательных напряжениях на затворе.

Выходные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа показаны на рис. 11.5.

В линейной области полевой транзистор используется как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения — как усилительный элемент. Усилительные свойства определяются крутизной вольтамперной характеристики:

$$S = \left| \frac{di_C}{dU_{зи}} \right|.$$

Упрощённая схема усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком показана на рис. 11.6,а. Источник напряжения E_3 создаёт требуемое напряжение смещение на затворе, а

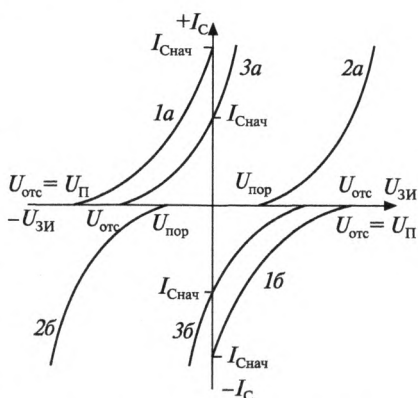


Рис. 11.4. Передаточные характеристики полевых транзисторов разных типов. Обозначения кривых соответствуют рис. 11.3



Рис. 11.5. Выходные характеристики полевого транзистора КП902

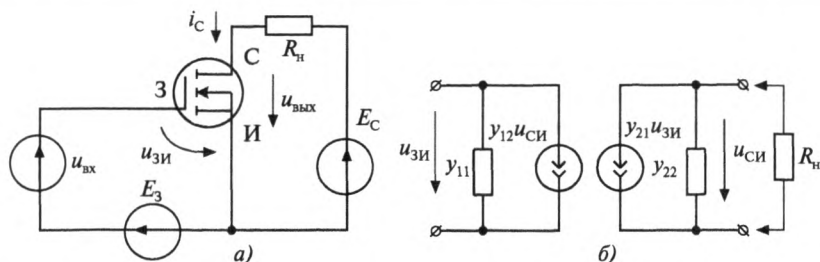


Рис. 11.6. Схема усилителя на полевом транзисторе (а) и схема замещения в Y-параметрах (б)

источник напряжения E_C создаёт напряжение питания цепи стока. Источник переменного сигнала u_C подключён между затвором и истоком. На рис. 11.6,б показана схема замещения усилительного каскада на полевом транзисторе в области низких частот для малых сигналов. Переменное входное напряжение $u_{зи}$ преобразуется управляемым источником тока в переменный ток стока i_C , который создаёт в нагрузке выходное напряжение $u_{си}$.

Этой схеме замещения (без учёта нагрузки) соответствуют уравнения полевого транзистора в Y-параметрах:

$$i_3 = y_{11}u_{зи} + y_{12}u_{си};$$

$$i_c = y_{21}u_{зи} + y_{22}u_{си}.$$

В этих уравнениях y_{11} — проводимость утечки затвора транзистора; y_{22} — выходная проводимость; $y_{21} = S$ — крутизна полевого транзистора (или проводимость прямой передачи); y_{12} — проводимость обратной передачи. Как правило, считают $y_{11} = y_{12} = 0$. Выходная проводимость $y_{22} = 1/R_{вых}$, причём $R_{вых}$ составляет 30 кОм и более.

Схема усилительного каскада с общим истоком, которая исследуется в аналоговой лаборатории, показана на рис. 11.7.

Источник постоянного напряжения E_1 задаёт режим по постоянному току в цепи стока. Источник E_2 создаёт смещение на затворе, которое регулируется делителем из R_1 и R_2 . Усилительный каскад может работать как резистивный усилитель. В этом случае индуктивность L_1 следует замкнуть перемычкой и нагрузкой транзистора в цепи стока будет сопротивление R_C . Для уменьшения искажений в резистивном усилителе напряжение смещения затвора выбирают таким, чтобы $U_{си} \approx E_1/2$.

Входное сопротивление каскада без учёта разделительной ёмкости C_1

$$R_{вх} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (11.1)$$

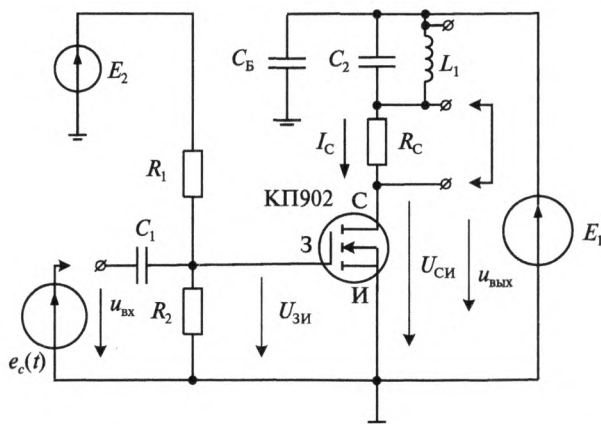


Рис. 11.7. Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

Коэффициент усиления каскада по напряжению для малого переменного сигнала в режиме холостого хода без учёта C_1 равен $K'_{Ux} = -SR_C$ (выходное сопротивление полевого транзистора $R_{\text{вых}} \approx 30 \text{ кОм}$ много больше, чем R_C и не учитывается в резистивном усилителе). С учётом коэффициента передачи входной цепи коэффициент усиления по напряжению составит

$$K_{Ux} = SR_C K_{\text{вц}} = SR_C \frac{R_{\text{вх}} \omega C_1}{\sqrt{1 + (R_{\text{вх}} \omega C_1)^2}}. \quad (11.2)$$

В резонансном усилителе на полевом транзисторе в цепи стока включён параллельный колебательный контур, образованный индуктивностью L_1 и ёмкостью C_2 . Конденсатор $C_б$ является блокировочным и шунтирует на высокой частоте источник напряжения E_1 .

В резонансном усилителе на полевом транзисторе на средних частотах нагрузкой усилительного каскада является параллельное соединение комплексного сопротивления параллельного контура и выходного сопротивления полевого транзистора:

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_K R_{\text{вых}}}{\underline{Z}_K + R_{\text{вых}}}.$$

По схеме замещения полевого транзистора вычислим выходное напряжение на контуре

$$u_{\text{вых}}(f) = \frac{\frac{-S u_{\text{вх}} R_{\text{рез}} R_{\text{вых}}}{R_{\text{рез}} + R_{\text{вых}}}}{\sqrt{1 + Q_{\text{экв}}^2 \left(\frac{f}{f_{\text{рез}}} - \frac{f_{\text{рез}}}{f} \right)^2}}, \quad (11.3)$$

где $R_{\text{рез}} = \rho^2 / R_k$ — резонансное сопротивление контура; $f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ — резонансная частота контура; $\rho = \sqrt{L/C}$ — характеристическое сопротивление контура; R_k — сопротивление потерь в контуре ($R_k \approx 10 \text{ Ом}$); $Q = \rho / R_k$; $Q_{\text{экв}} = \frac{Q}{1 + R_{\text{рез}} / R_{\text{вых}}}$ — эквивалентная добротность контура с учётом потерь в катушках и внутреннего сопротивления источника сигнала $R_{\text{вых}}$.

11.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Устройство и принцип действия полевого транзистора.
2. Перечислите типы затворов полевых транзисторов и нарисуйте схематические изображения полевых транзисторов разных типов.
3. Методы измерения передаточных характеристик полевых транзисторов.
4. Как выглядят передаточные характеристики полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом?
5. Как выглядят передаточные характеристики полевых транзисторов с индуцированным каналом?
6. Как выглядят передаточные характеристики полевых транзисторов со встроенным каналом?
7. Методы измерения и вид выходных характеристик полевых транзисторов.
8. Схема замещения и уравнения полевого транзистора в Y -параметрах.
9. Физический смысл и методы определения Y -параметров полевых транзисторов.
10. Схема резистивного усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком.
11. Выбор рабочей точки транзисторного усилителя для малых сигналов.
12. Схема резонансного усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком.
13. Как рассчитать коэффициент усиления резистивного усилителя?
14. Как рассчитать коэффициент усиления резонансного усилителя?

11.3. Лабораторная работа № 11. Исследование характеристик полевого транзистора и усилителей на полевом транзисторе

А. Исследование передаточной характеристики полевого транзистора с общим истоком

1. Выбрать *N*-канальный полевой транзистор с *p-n*-переходом по указанию преподавателя. Открыть *Свойства транзистора*, *Тип* — *Подробности* и выписать в протокол основные параметры: *пороговое напряжение*, *максимальное напряжение исток-сток*, *максимальное напряжение исток-затвор*, *максимальное обратное напряжение затвор-исток*, *максимальный ток истока*, *максимальный прямой ток затвора*, *максимальная мощность рассеяния*.

2. Собрать схему рис. 11.8. В этой схеме переменным параметром сделать напряжение на стоке VS2. *Начальное значение* = 5 В, *Конечное значение* = 15 В, *Количество случаев* = 3. Провести *Анализ* — *Анализ постоянного тока* — *Передаточная характеристика постоянного тока*. Установить *Ввод* VS1. Параметры *Начальное значение* и *Конечное значение* выбрать с учётом типа транзистора и передаточных характеристик (см. рис. 11.4).

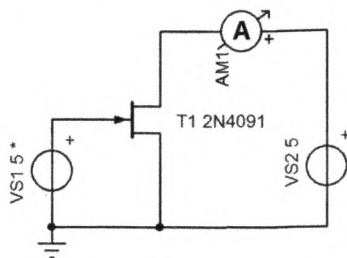


Рис. 11.8. Схема исследования полевого транзистора

Б. Исследование выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

3. В схеме рис. 11.8 переменным параметром выбрать напряжение затвор-исток VS1. Установить *Начальное значение* и *Конечное значение* VS1 в соответствии с типом транзистора. *Количество случаев* = 6. Провести *Анализ* — *Анализ постоянного тока* — *Передаточная характеристика постоянного тока* (рис. 11.9). Установить: *Ввод* VS2. *Начальное значение* = 0 В, *Конечное значение* по заданному напряжению питания стока.

Семейство выходных характеристик (рис. 11.10) в программе TINA Cloud легко получить для широкой номенклатуры транзисторов, имеющейся в каталоге программы. В отличие от программ Electronics Workbench и Multisim эти характеристики получаются очень быстро.

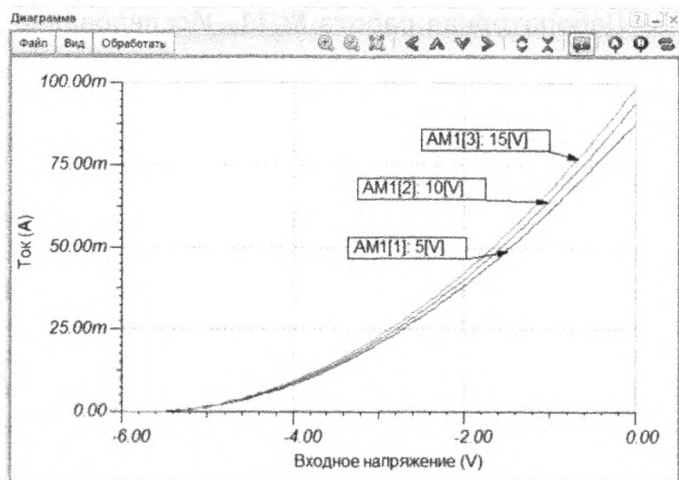


Рис. 11.9. Передаточные характеристики полевого транзистора

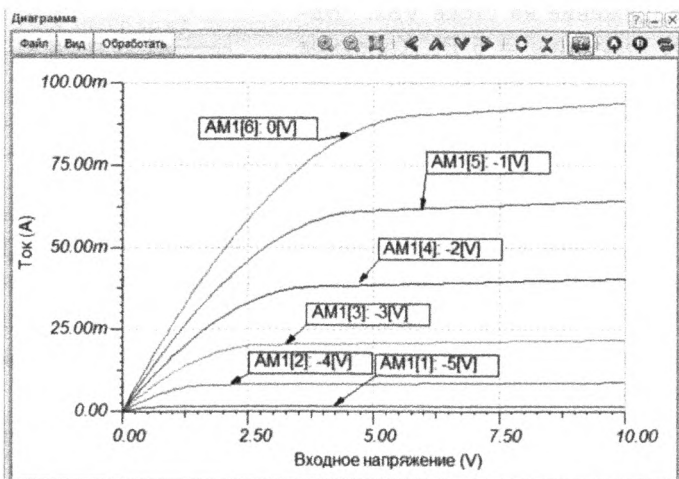


Рис. 11.10. Выходные характеристики полевого транзистора

В. Исследование работы резистивного транзисторного усилителя с общим истоком в режиме малого сигнала

4. Исследовать резистивный усилитель (рис. 11.11). Для этого замкнуть ключ SW2 и разомкнуть ключ SW1. Амплитуду источника гармонического сигнала установить 200 мВ, частоту 0,2 кГц, форма сигнала — синусоидальный.

5. Проведём оптимизацию напряжения на затворе VS1, при котором напряжение на стоке составит половину от напряжения пи-

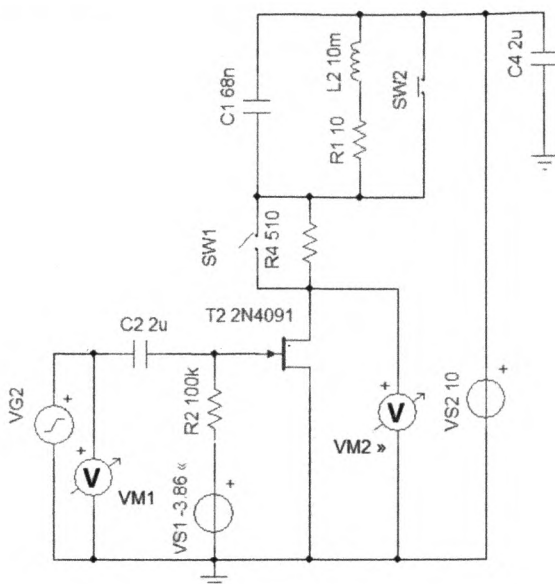


Рис. 11.11. Схема усилителя на полевом транзисторе

тания стока VS2. Для этого выделяем вольтметр VM2. В окне *Свойства* установим *Оптимизация/цель* (Да) — *Подробности* устанавливаем требуемое значение 5 В (рис. 11.12).

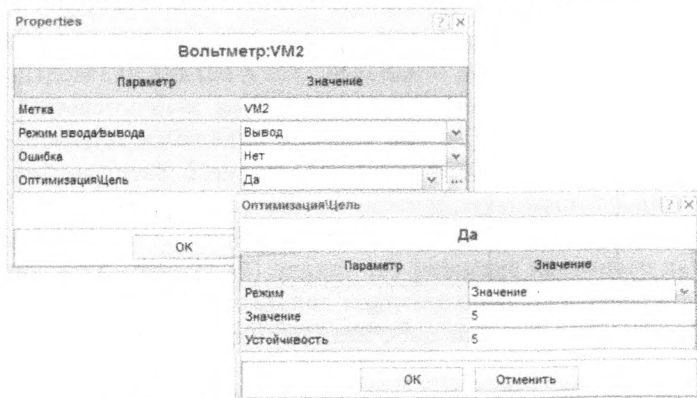


Рис. 11.12. Установка цели оптимизации

Выделяем источник VS1. В окне *Свойства* (рис. 11.13) выделяем *Подробности*, устанавливаем *Оптимизация/Объект* и пределы от -5 В до 0 В. Далее выполняем *Анализ — Оптимизация — Обычный поиск — Запустить* и получаем требуемое напряжение на затворе $VS1 = -3,86$ В.

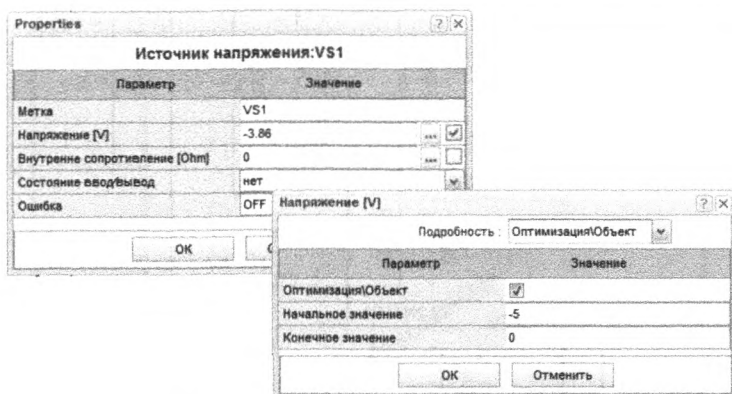


Рис. 11.13. Установка объекта оптимизации

Есть ещё один способ подбора напряжения на затворе. Делаем *Анализ — Анализ на постоянном токе — Передаточная характеристика постоянного тока — Ввод VS1*. Начальное значение VS1 = -5 В, конечное значение 0 В. Получаем график напряжения на стоке VM2 (рис. 11.14). На графике с помощью курсора находим значение VM2 = 5 В и получаем VS1 = -3,86 В.

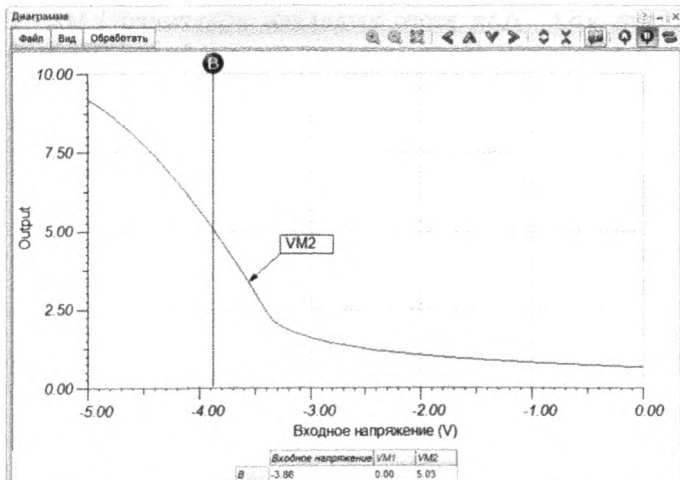


Рис. 11.14. Определение напряжения смещения по передаточной характеристике

Г. Исследование работы резистивного транзисторного усилителя с общим истоком в режиме малого сигнала

6. Исследуем выходной сигнал в режиме *Анализ — Переходный процесс*. Устанавливаем: *Начальное значение* = 0 с, *Конечное значение* = 20 мс.

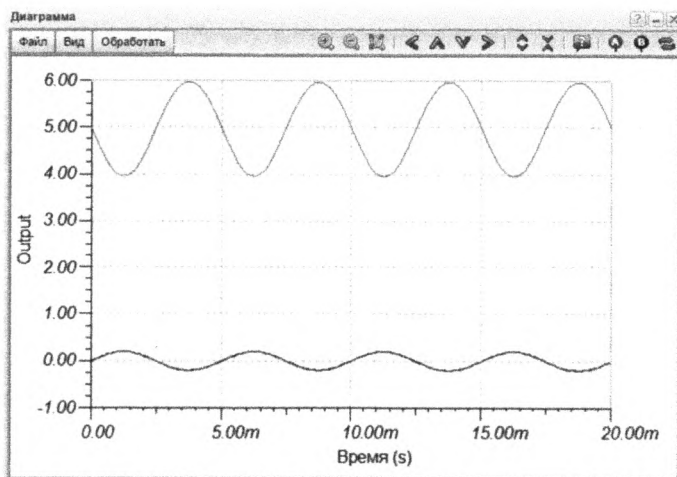


Рис. 11.15. Осциллограммы входного и выходного сигналов

По графикам (рис. 11.15) видно, что усиление составляет около 5, выходной сигнал инвертирован относительно входного сигнала.

7. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению $K_{Ux} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$.

Д. Исследование работы резонансного транзисторного усилителя с общим истоком в режиме малого сигнала

8. Замкнём ключ SW1 и разомкнём ключ SW2. Установим амплитуду генератора 50 мВ и частоту 1 кГц.

9. Проведём анализ АЧХ: Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока. Установим пределы изменения частоты от 1 кГц до 10 кГц и логарифмический масштаб. Получим графики АЧХ и ФЧХ (рис. 11.16).

10. Более точно определим резонансную частоту. Для этого пределы установим от 5 до 7 кГц и выберем линейную шкалу. По графику АЧХ (рис. 11.17) видно, что резонанс наступает на частоте 6,1 кГц. Линейное усиление составляет на резонансе примерно 36. Сдвиг фаз выходного сигнала относительно входного сигнала равен 180° .

11. Установим в генераторе частоту 6,1 кГц. Проведём анализ постоянных напряжений и токов в схеме. Как видно (рис. 11.18), при смещении на затворе $-3,86$ В в режиме резонансного усилителя за счёт малого сопротивления потерь $R_3 = 10$ Ом напряжение на истоке увеличивается до 9,9 В.

Установим амплитуду генератора 200 мВ. Исследуем выходной сигнал с помощью двух вольтметров. Проводим Анализ — Пере-

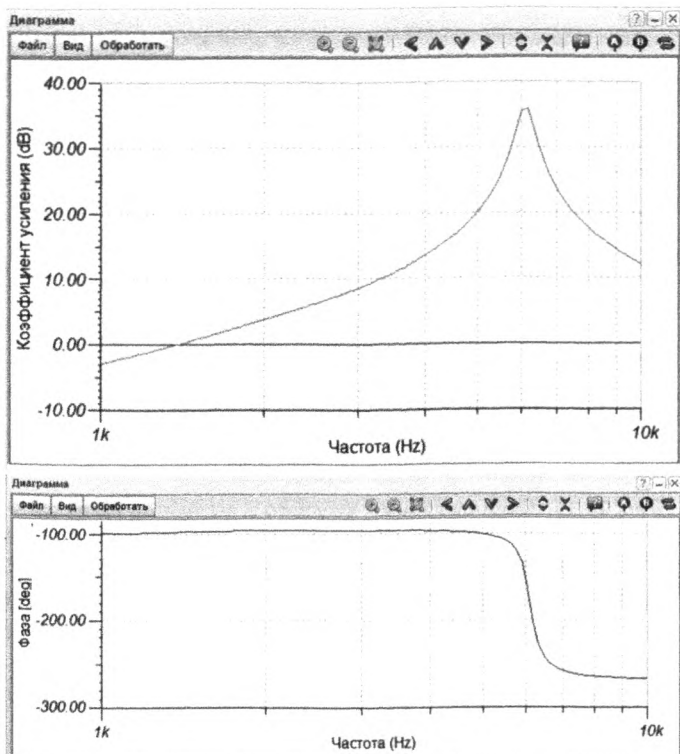


Рис. 11.16. АХЧ и ФЧХ транзисторного резонансного усилителя с ОИ

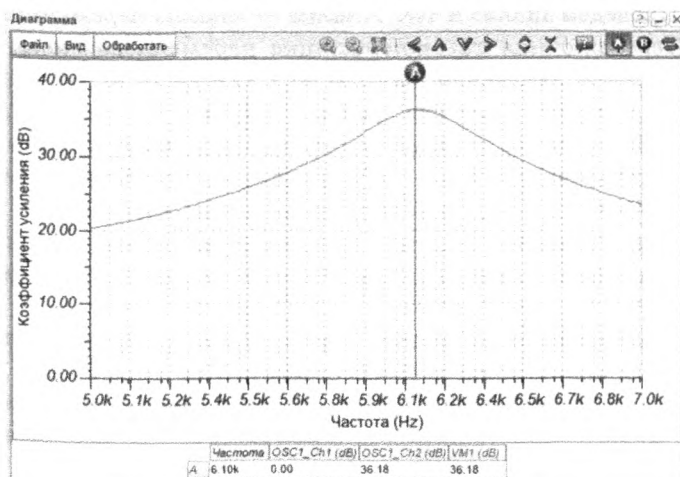


Рис. 11.17. Определение резонансной частоты

ходный процесс. Выбираем Нулевые начальные условия, время от 0 до 1000 мкс, Запустить (рис. 11.19). На графике от нуля сначала идёт нарастающий переходный процесс. Поэтому для исследования установившегося процесса надо выбирать Запуск по-каза 500 мкс...1 мс (рис. 11.20).

12. Расчёт амплитуды напряжения на контуре в резонансном режиме:

$$U_2 = U_{\text{ген}} R_{\text{рез}} S = \frac{U_{\text{ген}} L S}{C R},$$

где S — крутизна ВАХ. Для значений $L = 10^{-2}$ Гн, $C = 68$ нФ, $R = 10$ Ом, $S = 2,66 \cdot 10^{-3}$ мА/В получим $U_2 = 7,824$ В.

Как видно из графиков, амплитуда выходного сигнала около 8 В. Входной сигнал имеет амплитуду 200 мВ. Таким образом, усиление в резонансном режиме составляет 40.

DC Results

Устройства	Напряжения/Токи
VP_1	-3.86V
VP_2	10V
VP_3	-3.86V
VP_4	0V
VP_5	9.9V
VP_6	9.9V
VP_7	10V
I_L1[7,2]	-10.31mA
I_R1[3,1]	-18.03pA
I_R2[6,7]	-10.31mA
I_R3[5,6]	0A
I_VG1[4,0]	0A
I_VS1[3,0]	18.03pA
I_VS2[2,0]	-10.31mA
VM1	9.9V

☒ Узловые напряжения ☐ Другие напряжения
☒ Токи ☒ Выводы

Закреть

Рис. 11.18. Таблица постоянных напряжений и токов в схеме

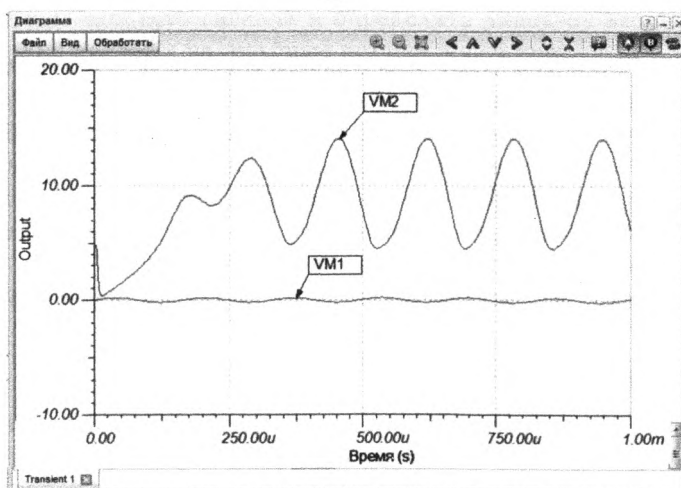


Рис. 11.19. Графики переходного процесса характеристики

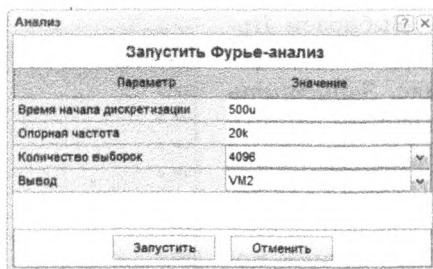


Рис. 11.20. Анализ установившегося режима для амплитуды 200 мВ

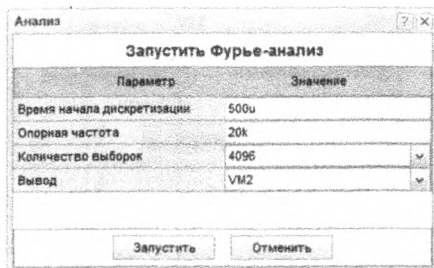


Рис. 11.21. Установка параметров анализа Фурье

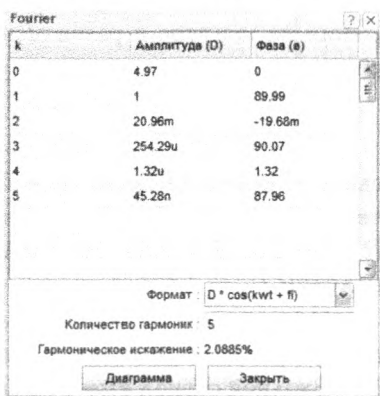


Рис. 11.22. Результаты анализа Фурье для амплитуды 200 мВ

Г. Исследование искажений выходного сигнала в резистивном усилителе

13. Восстановим схему резистивного усилителя. Установим частоту входного сигнала 20 кГц. Амплитуда входного сигнала 200 мВ. Проведём *Фурье-анализ* выходного сигнала. Для этого выбираем *Анализ — Фурье Анализ — Ряды Фурье* для действующих значений выходного сигнала VM1. *Опорная частота* 20 кГц. *Время начала дискретизации* должно быть 500 мкс, чтобы переходные процессы успели закончиться (рис. 11.21, 11.22).

14. Повторить исследования по п. 13 для амплитуды 500 мВ и 1 В.

Домашнее задание

1. По результатам экспериментов построить графики передаточной характеристики, семейство выходных характеристик полевого транзистора и найти крутизну характеристики S при напряжении на стоке и токе стока, соответствующим рабочей точке.

2. Построить для схемы транзисторного усилителя (см. рис. 11.11) на выходных характеристиках линию нагрузки по постоянному току и отметить положение рабочей точки по п. 6.

3. Построить график амплитудно-частотной характеристики резистивного усилителя. По формулам (11.1) и (11.2) рассчитать коэффициенты усиления транзисторного каскада на частотах 200 Гц, 5 кГц и 20 кГц. Сравнить результаты расчётов с экспериментальными данными.

4. Построить график амплитудно-частотной характеристики резонансного транзисторного усилителя. По графику АЧХ определить резонансную частоту и полосу пропускания усилителя. Рассчитать экспериментальное значение эквивалентной добротности $Q_{\text{экв}} = f_{\text{рез}}/\Pi$, добротность параллельного контура $Q = \rho/R_k$ и его резонансное сопротивление $R_{\text{рез}} = \rho^2/R_k$. Из формулы для эквивалентной добротности $Q_{\text{экв}} = \frac{Q}{1 + R_{\text{рез}}/R_{\text{вых}}}$ вычислить выходное сопротивление транзистора $R_{\text{вых}}$. Из формулы (11.3) вычислить значение крутизны транзистора S .

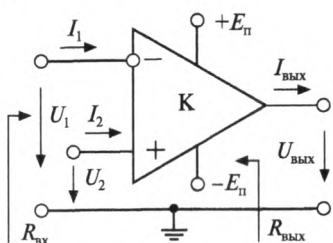
5. По графикам передаточной характеристики и выходных характеристик проиллюстрировать причины возникновения нелинейных искажений выходного сигнала, которые наблюдались в п. 14 и 15. Отметить на нагрузочной прямой по постоянному току перемещение рабочей точки, соответствующей максимальному входному сигналу.

6. Построить график зависимости нелинейных искажений от амплитуды входного сигнала и определить диапазон входных сигналов, для которых нелинейные искажения не превышают 5 %.

12 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ОПЕРАЦИОННЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

12.1. Теоретическое введение. Операционные усилители в цепях постоянного и переменного тока

Операционные усилители (ОУ) выполняются в виде интегральных микросхем и имеют в полосе частот от 0 до десятков килогерц (современные ОУ до сотен мегагерц) собственный коэффициент усиления K'_U не менее нескольких тысяч. Обозначение ОУ на схемах показано на рис. 12.1. Вход 1, обозначенный знаком (-), называют инвертирующим. Вход 2, обозначенный знаком (+), называют неинвертирующим. Входы питания $+E_{\Pi}$ и $-E_{\Pi}$ на схемах электрических цепей часто не обозначают. Выходное напряжение $\underline{U}_{\text{вых}} = K'_U(\underline{U}_2 - \underline{U}_1)$ в области низких частот совпадает по фазе с разностью $\underline{U}_2 - \underline{U}_1$. Поскольку K'_U весьма велик, а $\underline{U}_{\text{вых}}$ ограничено ($|\underline{U}_{\text{вых}}| < |E_{\Pi}|$), то разность $\underline{U}_2 - \underline{U}_1 = \underline{U}_\gamma \rightarrow 0$. Эту разность называют дифференциальным входным напряжением или виртуальным нулем.



$$\begin{aligned} K'_U &= \infty; \quad \underline{U}_2 - \underline{U}_1 = 0; \\ I_{\text{вх}1} &= 0; \quad I_{\text{вх}2} = 0; \\ R'_{\text{вх}} &= \infty; \quad R'_{\text{вых}} = 0 \end{aligned}$$

Рис. 12.1. Обозначение и свойства идеального ОУ

Свойства идеального ОУ без внешних обратных связей представлены на рис. 12.1. Эти свойства используют при расчетах схем с ОУ.

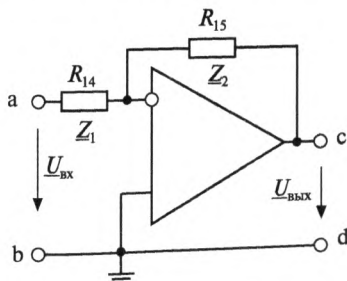
Технические характеристики реальных ОУ отличаются от идеальных. Дифференциальный коэффициент усиления $K'_U = \frac{U_{\text{вых}}}{(U_2 - U_1)}$ имеет конечное значение, которое лежит в пределах $10^3 \dots 10^5$. Входное сопротивление $R'_{\text{вх}}$ составляет от единиц кОм до 1000 МОм. Выходное сопротивление $R'_{\text{вых}}$ лежит в пределах от единиц до

сотен Ом. Частота единичного усиления от сотен килогерц до сотен мегагерц. Скорость нарастания напряжения, В/мкс, определяющая переходные характеристики ОУ, может составлять от десятков мВ/мкс до сотен В/мкс. Внешние элементы образуют внешние

обратные связи (ОС) операционного усилителя. ОУ с ОС имеет передаточную функцию, которая определяется параметрами элементов и схемой включения ОС.

При соответствующем выборе ОС операционный усилитель можно использовать для сложения, вычитания, дифференцирования, интегрирования сигналов, а также для получения различных функциональных зависимостей. За способность выполнять различные математические функции ОУ и получил название «операционный усилитель».

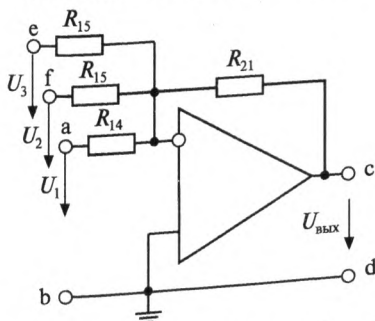
На рис. 12.1–12.14 показаны примеры схем с ОУ, которые исследуются в лабораторной работе, и основные расчетные формулы. Нумерация пассивных элементов обратных связей соответствует аналоговому стенду МЭЛ, на котором данную работу можно выполнить в аналоговой лаборатории.



$$K'_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_{15}}{R_{14}};$$

$$K'_U(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}$$

Рис. 12.2. Инвертирующий ОУ



$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{R_{21}}{R_{15}}U_1 + \frac{R_{21}}{R_{14}}U_2 + \frac{R_{21}}{R_{16}}U_3\right)$$

Рис. 12.4. Инвертирующий сумматор

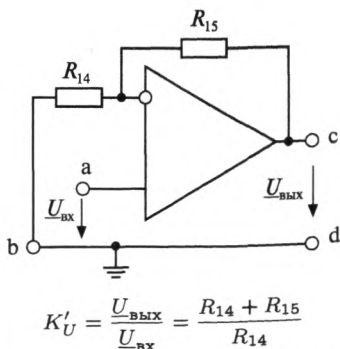
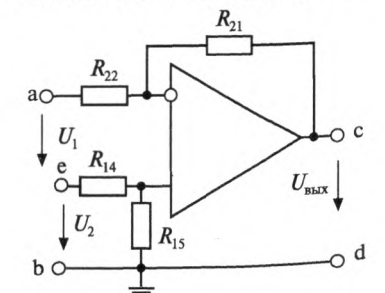


Рис. 12.3. Неинвертирующий ОУ



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1 + R_{21}/R_{22}}{1 + R_{15}/R_{14}}U_2 - \frac{R_{21}}{R_{22}}U_1$$

При равных $R_{14} = R_{15} = R_{21} = R_{22}$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_2 - U_1$$

Рис. 12.5. Вычитающий ОУ

Частотно-зависимые звенья с операционными усилителями

Простейшие частотно-зависимые звенья с операционными усилителями показаны на рис. 12.6–12.11.

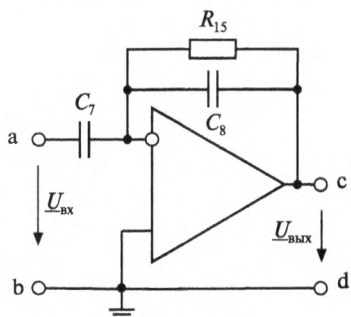


Рис. 12.6. Дифференцирующее звено с коррекцией

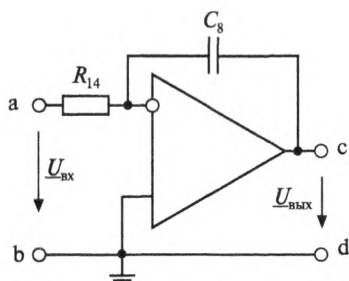


Рис. 12.7. Интегрирующее звено

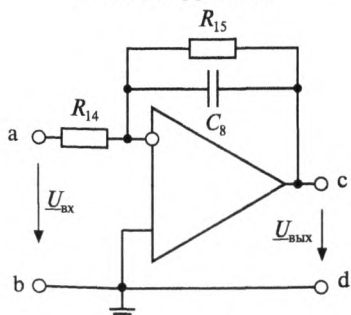


Рис. 12.8. Активный фильтр низких частот первого порядка

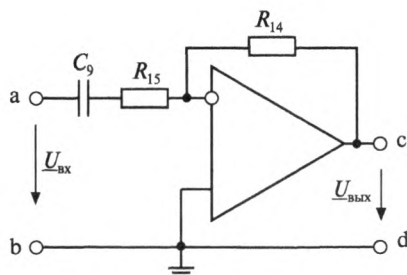
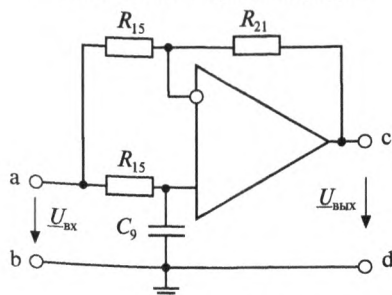


Рис. 12.9. Активный фильтр высоких частот первого порядка



$$K'_U(j\omega) = \frac{1 - j\omega RC_9}{1 + j\omega RC_9};$$

$$|K'_U(j\omega)| = 1; \quad \varphi = -2 \arctg(\omega RC_9)$$

Рис. 12.10. Фазовращатель

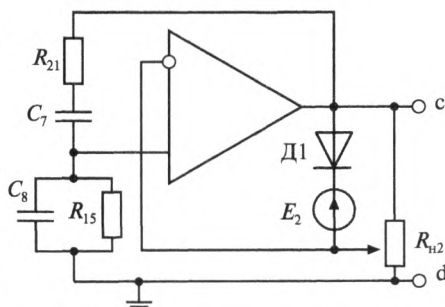


Рис. 12.11. Генератор Вина

Четыре первые схемы соответствуют обобщенному инвертирующему усилителю (см. рис. 12.2) с операторным коэффициентом передачи

$$K'_U(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}. \quad (12.1)$$

Подставляя в (12.1) комплексные сопротивления $Z_1(j\omega)$ и $Z_2(j\omega)$, можно вычислить амплитудно-частотную характеристику звена ($|K'_U(j\omega)|$) и фазочастотную характеристику звена ($\text{Arg}(K'_U(j\omega))$).

Так, например, для активного ФНЧ первого порядка (см. рис. 12.7) АЧХ будет определяться формулой

$$K'_U(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_p)^2}},$$

где $K = R_{15}/R_{14}$, $\omega_p = \frac{1}{R_{15}C_8}$.

Для фазовращателя (см. рис. 12.10) составим уравнения с учетом свойств идеального ОУ:

$$U_1(p) = \frac{(U_{\text{вх}}(p) - U_{\text{вых}}(p))R_{21}}{R_{14} + R_{21}} = U_2(p) = \frac{U_{\text{вх}}(p) \frac{1}{pC_9}}{R_{14} + \frac{1}{pC_9}}.$$

Отсюда при равных резисторах получим

$$\frac{U_{\text{вх}}(p) - U_{\text{вых}}(p)}{2U_{\text{вх}}(p)} = \frac{1}{1 + pRC_9}$$

и

$$\frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{1 - pRC_9}{1 + pRC_9}.$$

Для комплексной частотной характеристики модуль является постоянным и равным 1, а фаза $\varphi = 2 \arctg(\omega RC_9)$. Изменяя сопротивление R или емкость C_9 , можно установить фазовый сдвиг в диапазоне от 0° до -180° .

В генераторе Вина (рис. 12.11) при равных сопротивлениях $R_{21} = R_{15} = R$ и емкостях $C_7 = C_8$ на квазирезонансной частоте $f_k = \frac{1}{2\pi RC_8}$ фазовый сдвиг в цепи обратной связи равен нулю, а петлевой коэффициент передачи $\beta = 1/3$. Для самовозбуждения коэффициент усиления усилителя K должен быть больше 3. Это достигается регулировкой резистора R_{H2} . Дiod и источник напряжения E_2 требуются для стабилизации режима генерации.

Активные фильтры второго порядка

Активные фильтры второго порядка содержат один или несколько ОУ с частотно-зависимыми обратными связями. В цепях ОС применяют резисторы и конденсаторы. Поэтому такие фильтры называют активные RC -цепи (ARC -цепи). Активные фильтры позволяют получить разнообразные частотные характеристики коэффициента передачи в диапазоне частот от нуля до нескольких мегагерц. Они более компактны и технологичны по сравнению с LC -фильтрами, не требуют применения индуктивностей.

Порядок активного фильтра определяется наибольшей степенью переменной p в знаменателе его передаточной функции. Фильтры высокого порядка имеют лучшие частотные характеристики.

Передаточные функции активных фильтров рассчитывают по уравнениям для операторной схемы замещения с учетом свойств операционного усилителя. Комплексную частотную характеристику получают заменой p на $j\omega$ в передаточной функции. Амплитудно-частотные характеристики равны модулю комплексной частотной характеристики.

В лабораторной работе исследуются активные фильтры второго порядка с одним ОУ. Схемы фильтров и расчетные формулы показаны на рис. 12.7–12.15.

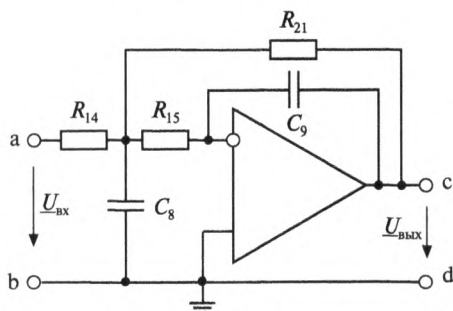


Рис. 12.12. Активный фильтр низких частот

$$K(\omega) = \frac{K\omega_0^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2(\omega_0/q)^2}};$$

$$K = \frac{R_{21}}{R_{14}}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{R_{15}R_{21}C_8C_9};$$

$$q = \sqrt{\frac{R_{15}C_8}{R_{21}C_9}} \frac{1}{1 + R_{15}/R_{14}}$$

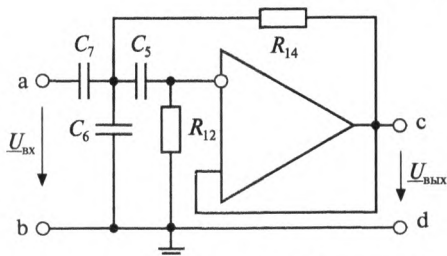


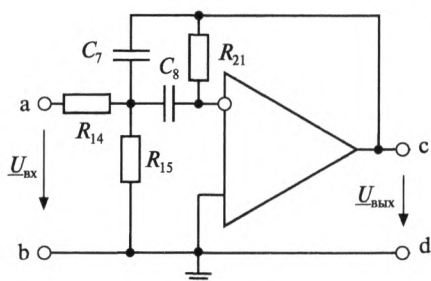
Рис. 12.13. Активный фильтр высоких частот

$$K(\omega) = \frac{K\omega^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2(\omega_0/q)^2}};$$

$$K = \frac{C_7}{C_7 + C_6}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{R_{14}R_{12}C_0C_5};$$

$$C_0 = C_6 + C_7;$$

$$q = \frac{1}{1 + C_0/C_5} \sqrt{\frac{R_{12}C_0}{R_{14}C_5}}$$



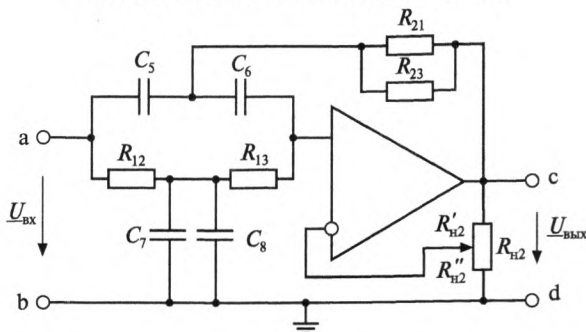
$$K(\omega) = \frac{K\omega(\omega_0/q)}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2(\omega_0/q)^2}};$$

$$K = \frac{R_{15}K_0}{R_{15} + R_{14}}; \quad K_0 = q^2 \left(1 + \frac{C_8}{C_7}\right);$$

$$R_0 = \frac{R_{14}R_{15}}{R_{14} + R_{15}}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{R_0 R_{21} C_7 C_8};$$

$$q = \sqrt{\frac{R_{21} C_7}{R_0 C_8} \frac{1}{1 + C_7/C_8}}$$

Рис. 12.14. Активный полосовой фильтр



$$K(\omega) = \frac{K|\omega^2 - \omega_0^2|}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\omega^2\omega_0^2(2 - K)^2}}; \quad \omega_0 = \frac{1}{R_{12}C_5}; \quad K = 1 + \frac{R'_{н2}}{R''_{н2}}$$

Рис. 12.15. Активный заграждающий фильтр

12.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Нарисуйте схему операционного усилителя, объясните назначение выводов.
2. Какими свойствами обладает идеальный операционный усилитель?
3. Какие параметры входят в технические характеристики реальных операционных усилителей?
4. Что такое «обратная связь» и как она влияет на свойства операционного усилителя?
5. Выведите формулу дифференциального коэффициента усиления инвертирующего ОУ (см. рис. 12.2).
6. Выведите формулу дифференциального коэффициента усиления неинвертирующего ОУ (см. рис. 12.3).
7. Выведите формулу для операторного коэффициента передачи интегрирующего звена с ОУ (см. рис. 12.7).

8. Нарисуйте схему фазовращателя с ОУ. Определить, на какой частоте фазовращатель даст сдвиг фазы -90° , если все сопротивления равны 10 кОм, а емкость равна 22 нФ.

9. Для чего применяют генератор Вина? Какие условия должны выполняться для самовозбуждения этого генератора?

10. Чем обусловлено название «активные фильтры»? Поясните их достоинства и недостатки по сравнению с реактивными LC-фильтрами.

11. Чем определяется порядок активного фильтра и как влияет порядок на частотные свойства фильтра?

12. Изобразите ожидаемые графики АЧХ четырех активных фильтров, которые показаны на рис. 12.12–12.15.

12.3. Лабораторная работа № 12.

Электрические цепи с операционными усилителями

Цель работы — изучение типовых схем включения операционных усилителей (ОУ) и изучение их свойств, изучение типовых частотно-зависимых звеньев с ОУ, первого и второго порядка.

Лабораторное задание

А. Исследование операционных усилителей в цепях постоянного и переменного тока

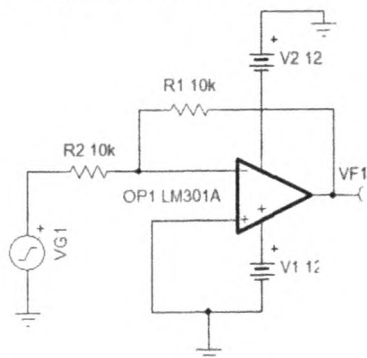


Рис. 12.16. Схема инвертирующего ОУ

1. Собрать схему инвертирующего ОУ (рис. 12.16), выбрав по указанию преподавателя операционный усилитель из панели *Полупроводники — Операционный усилитель*. Открыть меню *Properties — Tun — Редактор каталога* и выписать основные параметры усилителя: *Усиление разомкнутого цикла*, *Входное сопротивление*, *Выходное сопротивление*, *Максимальная скорость прогона*, *Максимальное подаваемое напряжение*, *Максимальный входной ток*, *Максимальный выходной ток*.

2. Установить в генераторе VG1 амплитуду 1 В и частоту 100 Гц. Исследовать амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики инвертирующего ОУ в режиме *Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока*

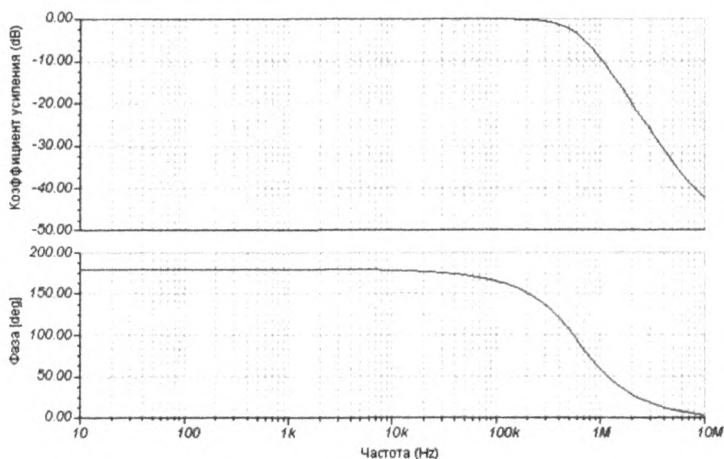


Рис. 12.17. АЧХ и ФЧХ усилителя на ОУ

(Стартовая частота 10 Гц, Конечная частота 10 МГц, Тип свип-сигнала — логарифмический). Результаты исследования показаны на рис. 12.17.

3. Собрать схему инвертирующего сумматора рис. 12.18.

В схеме рис. 12.18 обозначить ключи К1, К2, К3, разомкнуть К2 и подключить к инвертирующему входу ОУ источник напряжения V3, равный 2В. Используя режим Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока, найти и записать напряжение на выходе VF1.

4. Замкнуть ключ К2, подключить к инвертирующему входу источник напряжения V4, равный 1 В. Измерить и записать напряжение на выходе VF1.

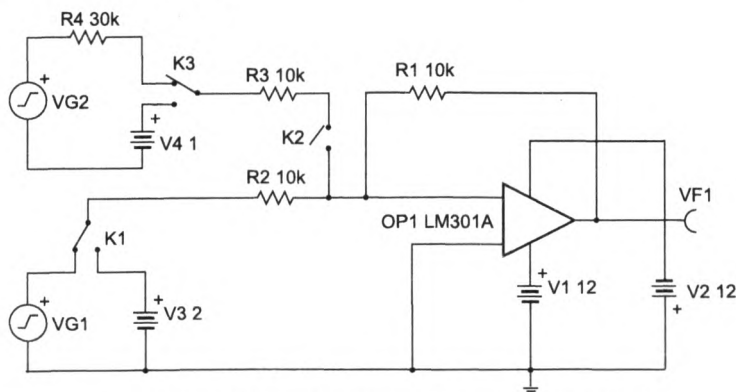


Рис. 12.18. Схема инвертирующего сумматора на ОУ

5. Установить в генераторе VG1 амплитуду 1 В, частоту 100 Гц. В генераторе VG2 установить амплитуду 1 В, частоту 1 кГц. Ключ K2 замкнуть и подключить к входу ОУ генераторы VG1 и VG2. В режиме *Анализ — Переходной процесс* получить графики входных напряжений и напряжения на выходе VF1 (рис. 12.19). Объяснить форму выходного напряжения.

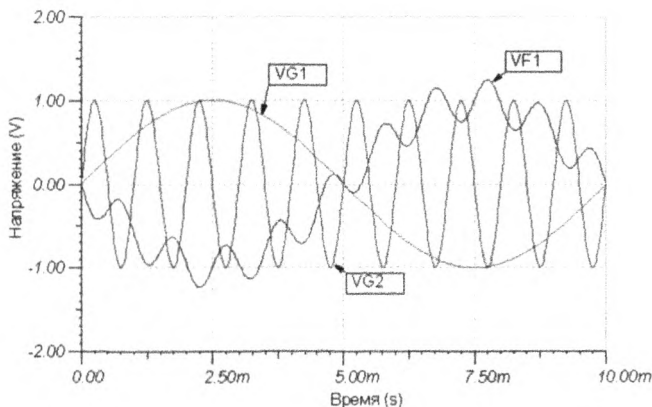


Рис. 12.19. Графики сигналов в инвертирующем ОУ

6. Собрать схему неинвертирующего ОУ (рис. 12.20). Установить в генераторе VG1 синусоидальный сигнал с амплитудой 1 В и частотой 100 Гц. В режиме *Анализ — Переходной процесс* получить графики сигналов на входе и выходе ОУ (рис. 12.21). Объяснить характер графиков.

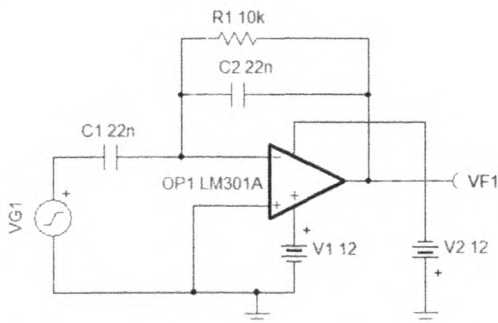


Рис. 12.20. Схема неинвертирующего ОУ

7. Собрать схему вычитающего ОУ (рис. 12.22). Установить VG1: 1V, 100 Hz; VG2: 500 mV, 100 Hz. Провести *Анализ — Пе-*

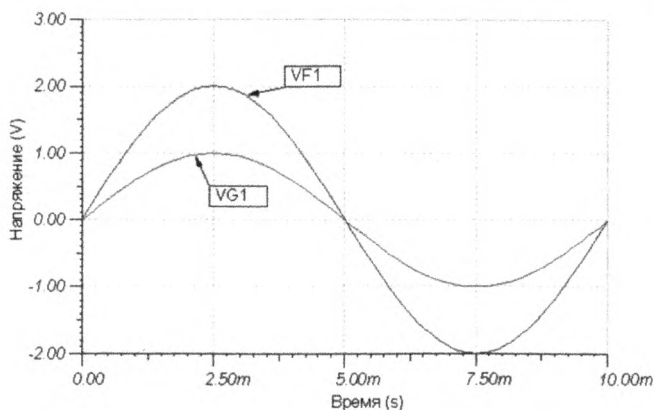


Рис. 12.21. Графики сигналов в неинвертирующем ОУ

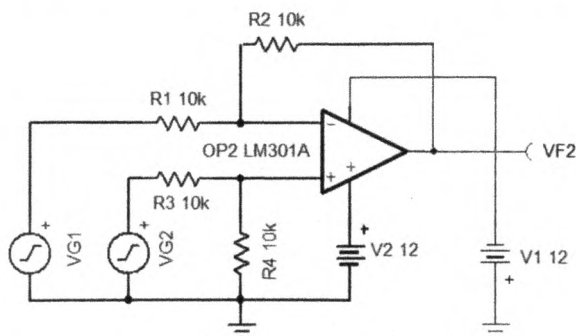


Рис. 12.22. Вычитающий ОУ

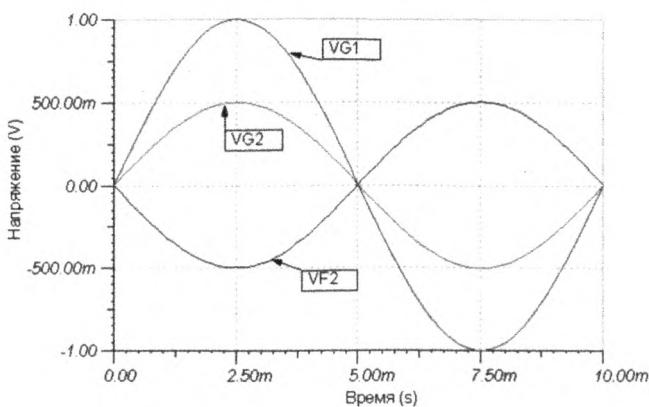


Рис. 12.23. Графики сигналов в вычитающем усилителе

переходной процесс и получить графики сигналов на входе и выходе ОУ (рис. 12.23). Объяснить характер графиков.

Б. Исследование частотно-зависимых звеньев с операционными усилителями

8. Собрать схему дифференцирующего звена (рис. 12.24). Провести Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц (рис. 12.25).

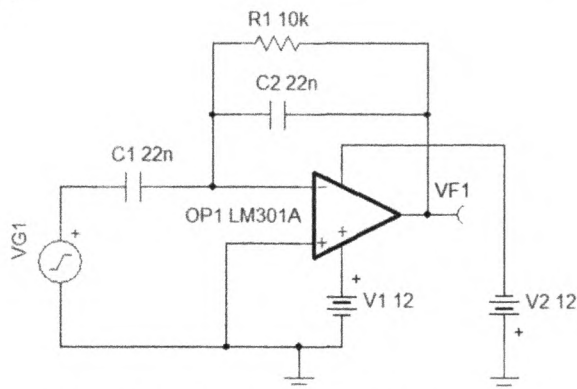


Рис. 12.24. Дифференцирующий усилитель

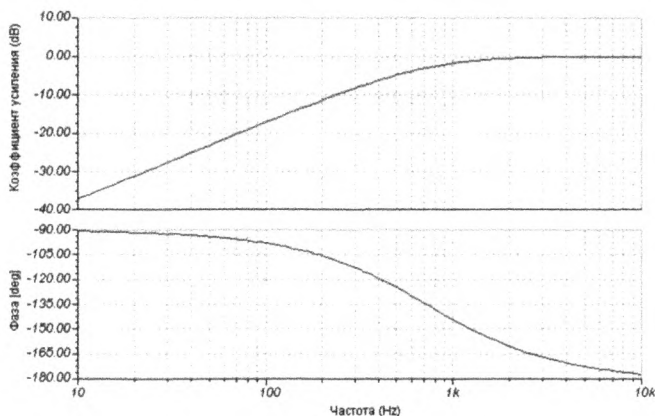


Рис. 12.25. Частотные характеристики дифференцирующего усилителя

9. Установить в генераторе VG1 сигнал прямоугольной формы с амплитудой 100 мВ и частотой 50 Гц. В режиме *Переходный процесс* исследовать выходной сигнал VF1 (рис. 12.26). Пояснить форму графиков.

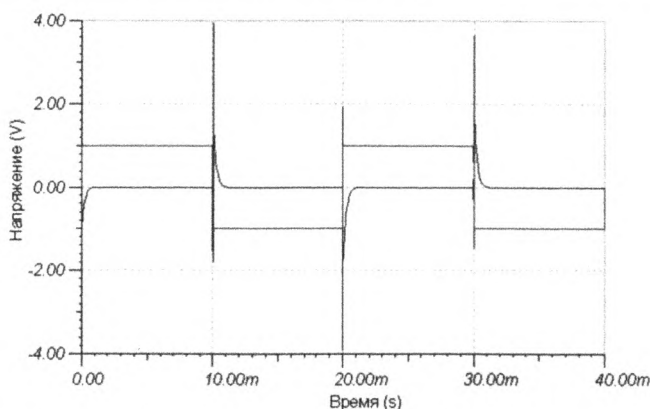


Рис. 12.26. Входной и выходной сигналы дифференцирующего усилителя

10. Собрать схему интегрирующего звена рис. 12.27.

Провести Анализ — Анализ переменного тока — Передаточная характеристика переменного тока в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц (рис. 12.28).

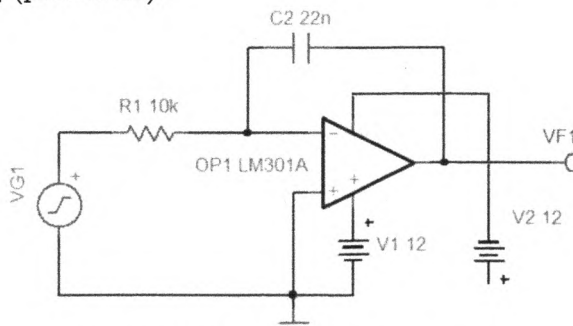


Рис. 12.27. Схема интегрирующего звена

В соответствии с (12.1) комплексная частотная характеристика интегрирующего звена

$$K(j\omega) = -\frac{j}{\omega C_2} = j \frac{1}{\omega R_1 C_2} = j \frac{1}{2\pi f \cdot 10^4 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = j \frac{723}{f}.$$

Амплитудно-частотная характеристика на частоте 4 кГц

$$K(\omega) = |K(j\omega)| = \frac{723}{4000} = 0,18.$$

Фазочастотная характеристика на всех частотах равна $+90^\circ$.

Частотные характеристики в логарифмическом масштабе показаны на рис. 12.29.

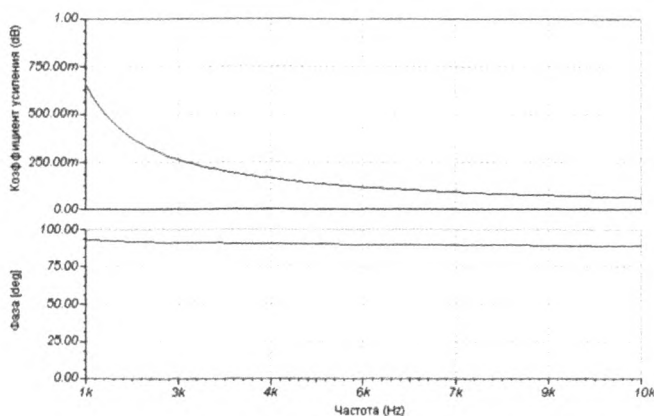


Рис. 12.28. Частотные характеристики интегрирующего звена в линейном масштабе

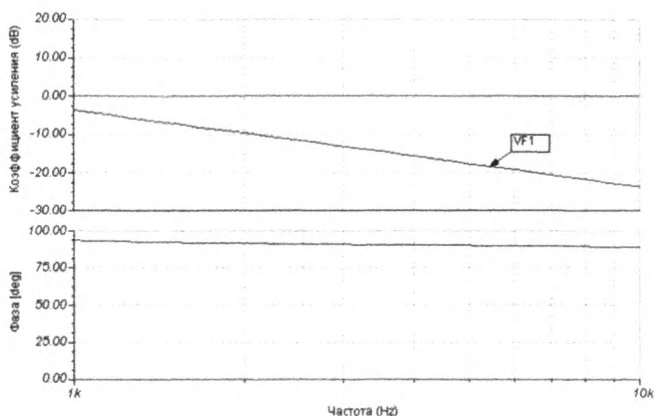


Рис. 12.29. Частотные характеристики интегрирующего звена в логарифмическом масштабе

11. Установить в генераторе VG1 сигнал прямоугольной формы с амплитудой 100 мВ и частотой 50 Гц. Для заданного ОУ типа LM301A в меню *Properties* установить *Смещение входного напряжения* = -1mV. Это смещение компенсирует «уход нуля» ОУ в интеграторе. Для других типов ОУ требуется подбор напряжения смещения. В режиме *Переходный процесс* исследовать выходной сигнал VF1 (рис. 12.30). Пояснить форму графиков.

12. Собрать схему активного фильтра нижних частот первого порядка (рис. 12.31).

Провести *Анализ на переменном токе* — *Передаточная характеристика переменного тока* в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц

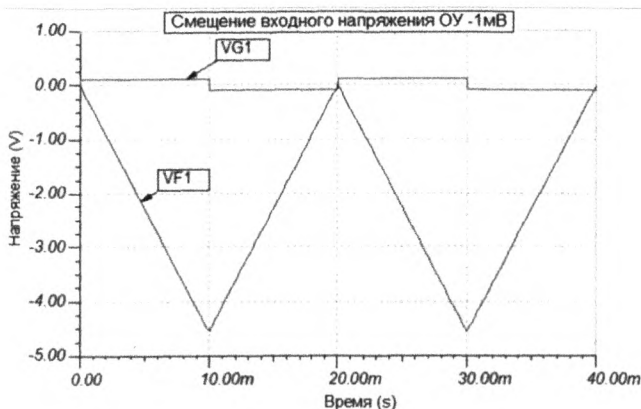


Рис. 12.30. Выходной сигнал интегратора

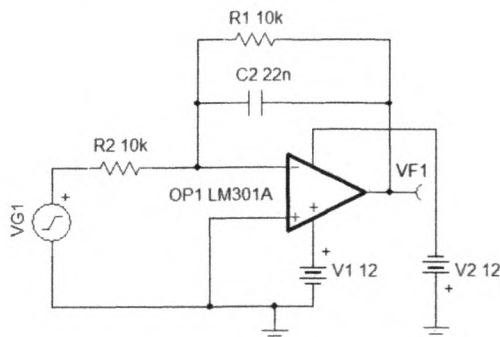


Рис. 12.31. Активный ФНЧ первого порядка

(рис. 12.32).

13. Установить в генераторе VG1 сигнал прямоугольной формы с амплитудой 100 мВ и частотой 50 Гц. В режиме *Переходный процесс* исследовать выходной сигнал VF1 (рис. 12.33). Пояснить форму графиков.

14. Собрать схему (рис. 12.34) активного фильтра высоких частот.

Исследовать частотные характеристики активного ФВЧ и пояснить их форму (рис. 12.35).

15. Установить в генераторе VG1 сигнал прямоугольной формы с амплитудой 100 мВ и частотой 50 Гц. В режиме *Переходный процесс* исследовать выходной сигнал VF1. Пояснить форму графиков (рис. 12.36).

16. Собрать схему фазовращателя (рис. 12.37). Исследовать

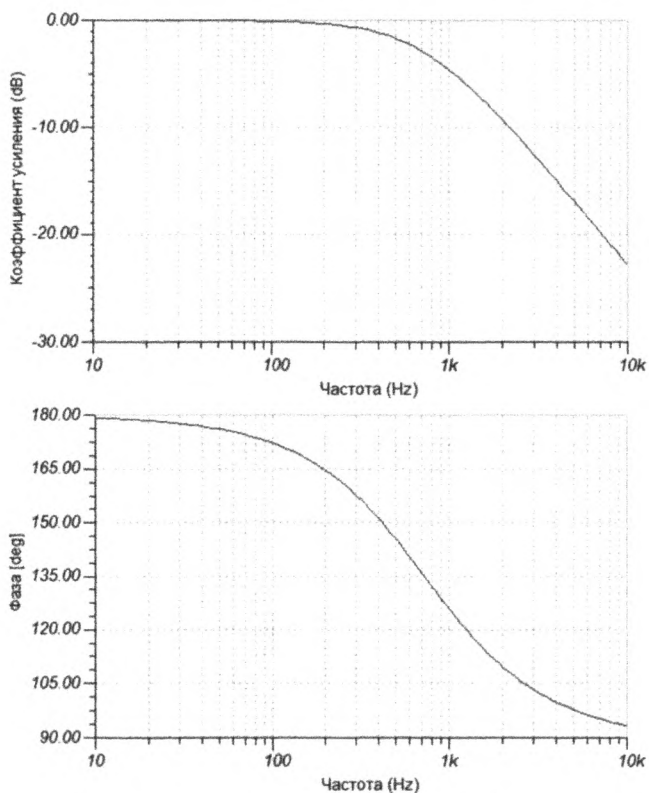


Рис. 12.32. Частотные характеристики активного ФНЧ первого порядка

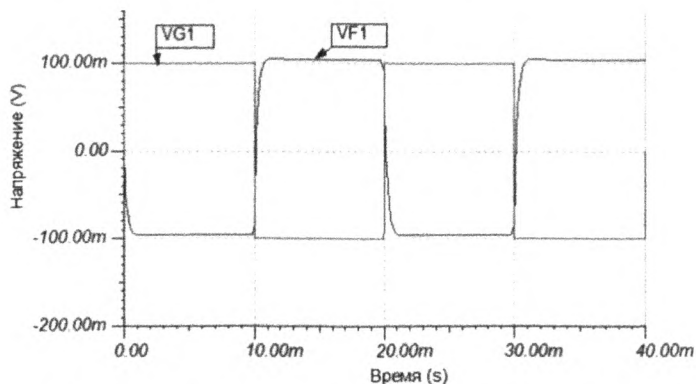


Рис. 12.33. Прохождение прямоугольных импульсов через активный ФНЧ первого порядка

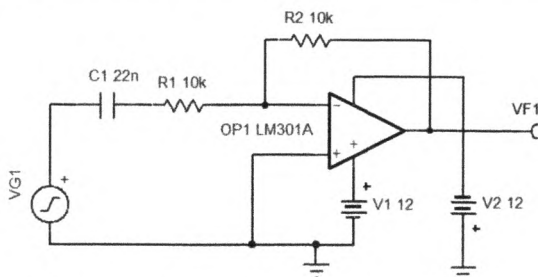


Рис. 12.34. Активный ФВЧ первого порядка

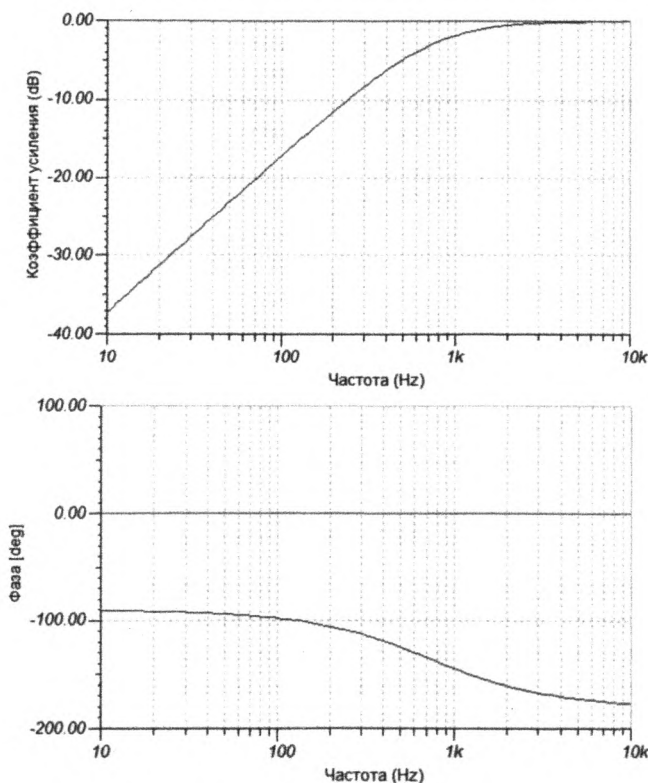


Рис. 12.35. Частотные характеристики активного ФВЧ

частотные характеристики (рис. 12.38). Убедиться в том, что АЧХ фазовращателя постоянна и равна 1, а ФЧХ изменяется от 0° до -180° .

17. Собрать схему генератору Вина (рис. 12.39). Установить значения источников напряжений, показанные на схеме. Для зна-

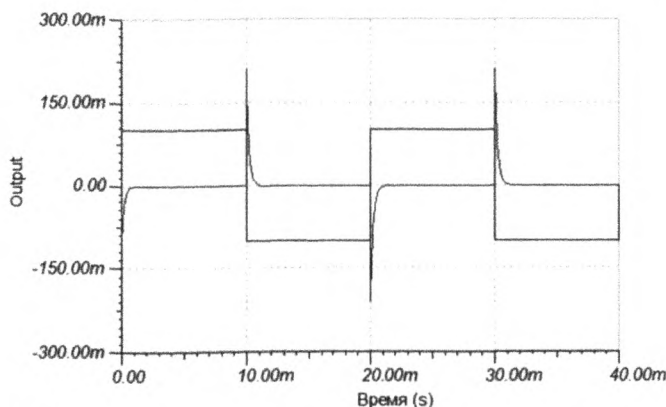


Рис. 12.36. Прохождение прямоугольных импульсов через активный ФВЧ первого порядка

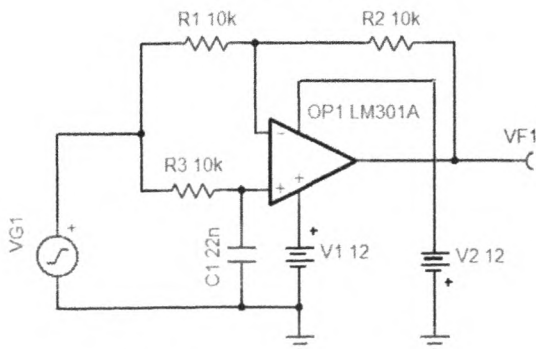


Рис. 12.37. Фазовращатель

чений установки переменного резистора, равных 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, провести Анализ — Переходной процесс. Установите нулевые начальные условия и время от нуля до 20 мс. Зарегистрируйте и объясните диаграммы выходного напряжения (рис. 12.40).

18. Собрать схему ФНЧ второго порядка (рис. 12.41). Провести Анализ на переменном токе — Передаточная характеристика на переменном токе в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц. Объяснить вид АЧХ и ФЧХ (рис. 12.42). Сравнить частотные характеристики ФНЧ первого и второго порядка.

19. Собрать схему ФВЧ второго порядка (рис. 12.43). Провести Анализ переменного тока — Передаточная характеристика на переменном токе в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц. Объяснить вид АЧХ и ФЧХ (рис. 12.44). Сравнить частотные характеристики ФВЧ первого и второго порядка.

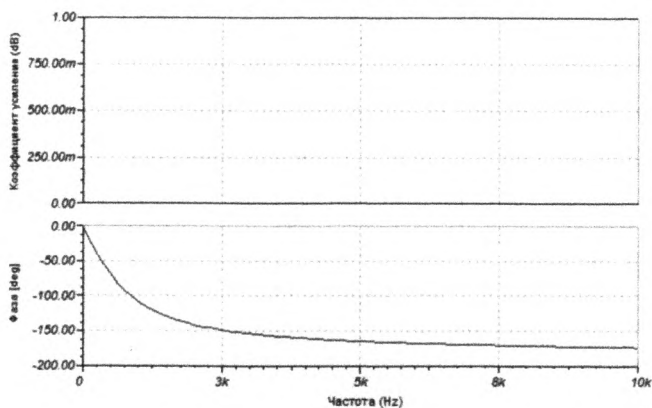


Рис. 12.38. Частотные характеристики фазовращателя

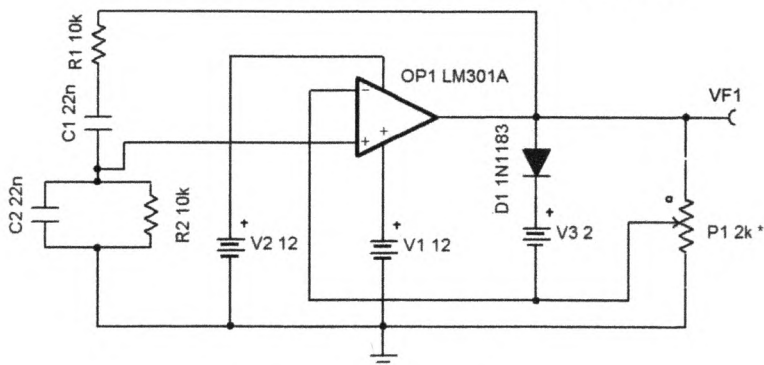


Рис. 12.39. Генератор Вина

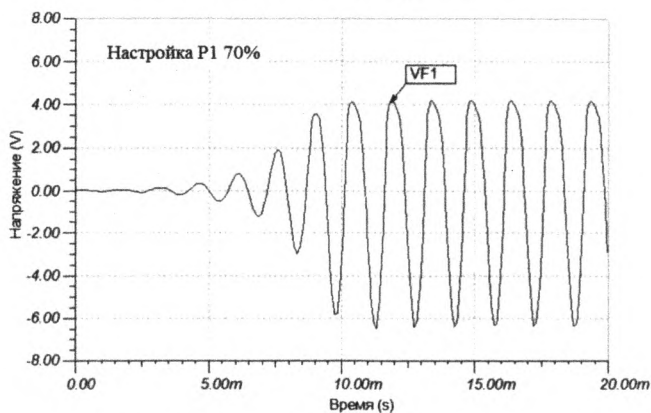


Рис. 12.40. Колебания в генераторе Вина

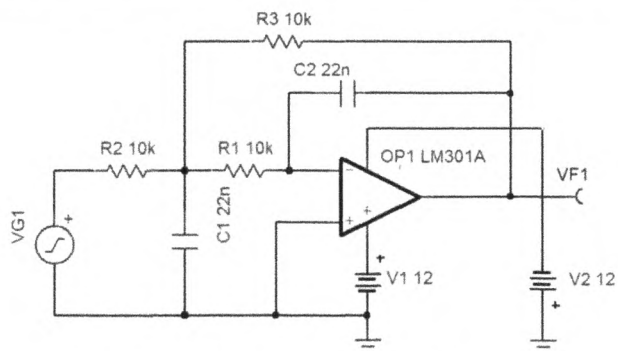


Рис. 12.41. Активный ФНЧ второго порядка

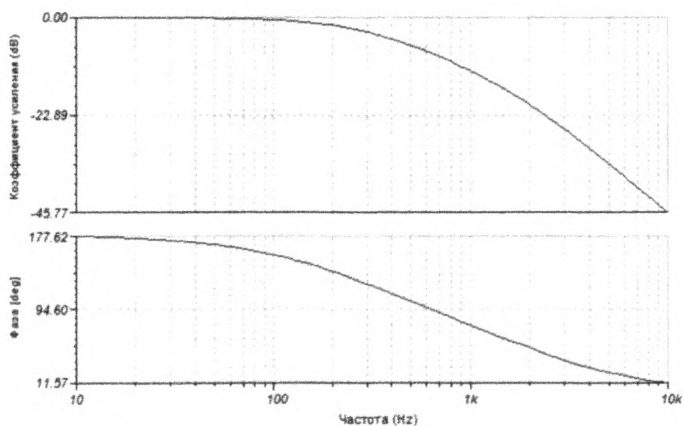


Рис. 12.42. АЧХ и ФЧХ активного ФНЧ второго порядка

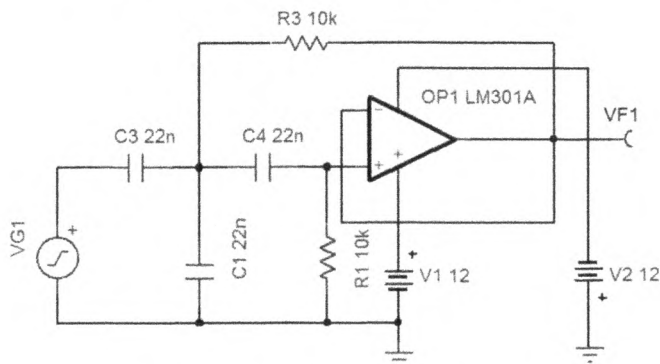


Рис. 12.43. Активный ФВЧ второго порядка

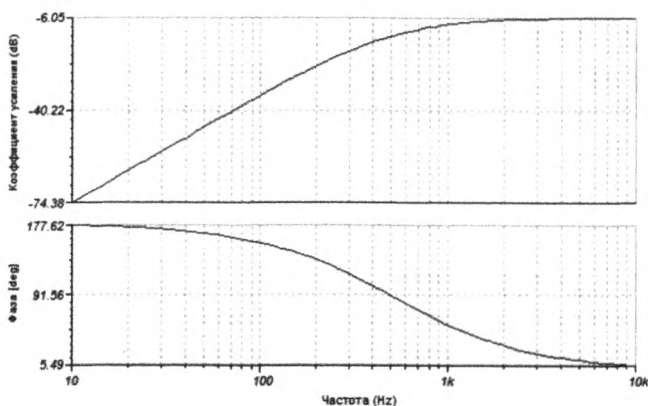


Рис. 12.44. АЧХ и ФЧХ активного ФВЧ второго порядка

Домашнее задание

1. По экспериментальным данным построить амплитудно-частотные характеристики инвертирующего ОУ и неинвертирующего ОУ и определить полосу пропускания при слабом сигнале по уровню -3 дБ.

2. Рассчитать предельную полосу усиления гармонического сигнала с амплитудой 200 мВ для ОУ со скоростью нарастания 50 мВ/мкс.

3. Для неинвертирующего ОУ с сопротивлением $R_{15} = 10$ кОм рассчитать сопротивление R_{14} , при котором усиление составит 3 .

4. Все входы инвертирующего сумматора (см. рис. 12.4) объединены и подключены к напряжению 1 В. Рассчитать выходное напряжение ОУ.

5. Для вычитающего ОУ найти соотношения сопротивлений, при которых выходной сигнал $U_{\text{вых}} = \frac{1}{2}U_2 - 2U_1$.

6. Вывести теоретические выражения для комплексных коэффициентов передачи, амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик звеньев рис. 12.5–12.9.

7. Рассчитать и построить теоретические АЧХ и ФЧХ звеньев рис. 12.6–12.9.

8. Построить экспериментальные графики АЧХ и ФЧХ звеньев рис. 12.6–12.9 и сравнить с соответствующими теоретическими зависимостями.

9. Для активных фильтров второго порядка по экспериментальным АЧХ найти частоту среза.

10. По формулам АЧХ определить, какие элементы определяют частоту среза активных ФНЧ и ФВЧ второго порядка.

13 АУТОГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

13.1. Теоретическое введение

Автогенератором называют устройство, которое преобразует энергию источника постоянного напряжения или тока в энергию гармонических колебаний. Автогенератор гармонических колебаний является нелинейным устройством с положительной обратной связью и содержит, как правило, колебательный контур. Обобщенная структурная схема автогенератора с внешней обратной связью

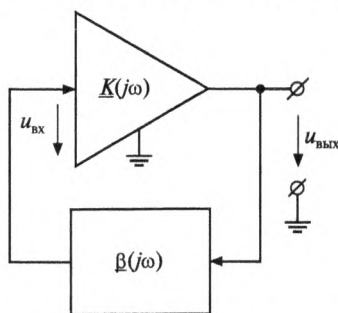


Рис. 13.1. Структурная схема автогенератора с обратной связью

показана на рис. 13.1. Она содержит усилитель с комплексным коэффициентом усиления $K(j\omega)$ и частотно-избирательную цепь положительной обратной связи с комплексным коэффициентом передачи $\beta(j\omega)$.

Работу автогенератора можно разделить на два этапа: этап возбуждения колебаний и этап стационарного режима. На этапе возбуждения в автогенераторе вследствие начальных флуктуаций входного напряжения в усилителе и наличия частотно-зависимой положительной обратной связи возникают колебания и их амплитуда постепенно нарастает. По мере нарастания амплитуды уменьшается коэффициент усиления усилителя, амплитуда колебаний стабилизируется и автогенератор переходит в стационарный режим.

Рассмотрим условие возникновения колебаний. На входе усилителя (см. рис. 13.1) действует сигнал с комплексным действующим значением $\underline{U}_{вх}$. При этом на выходе усилителя будет сигнал $\underline{U}_{вых} = \underline{U}_{вх} K(j\omega)$. С выхода усилителя колебания через цепь положительной обратной связи вновь поступают на вход усилителя, поэтому

$$\underline{U}_{вх} = \underline{U}_{вых} \beta(j\omega) \quad \text{и} \quad \underline{U}_{вых} (1 - K(j\omega) \beta(j\omega)) = 0. \quad (13.1)$$

Из уравнения (13.1) следует, что напряжение на выходе усилителя $\underline{U}_{вых}$ может быть отличным от нуля только при выполнении

условия

$$1 - \underline{K}(j\omega)\underline{\beta}(j\omega) = 0.$$

Отсюда получаем условие возникновения колебаний

$$\underline{K}(j\omega)\underline{\beta}(j\omega) = 1, \quad (13.2)$$

где $\underline{K}(j\omega)\underline{\beta}(j\omega)$ называют петлевым усилением усилителя с обратной связью.

Условие возникновения колебаний (13.2) распадается на два условия, которые называют условиями баланса амплитуд и фаз:

$$\begin{cases} |\underline{K}(j\omega)\underline{\beta}(j\omega)| = 1; \\ \arg(\underline{K}(j\omega)\underline{\beta}(j\omega)) = \varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi n, \end{cases} \quad (13.3)$$

где n — любое целое число.

Первое условие (13.3) баланса амплитуд означает, что в стационарном режиме полное петлевое усиление на рабочей частоте автогенератора должно быть равно единице. В качестве элементов, регулирующих петлевое усиление, используют или пассивные нелинейные элементы (термисторы, варисторы и др.), или транзисторы в режиме регулируемого усиления.

Второе условие (13.3) баланса фаз означает, что полный фазовый сдвиг в замкнутом контуре автогенератора должен быть равен $2\pi n$, где n — любое целое число. Условие баланса фаз позволяет определить частоту генерируемых автоколебаний. Если условие баланса фаз выполняется только на одной частоте, то колебания будут гармоническими.

Наиболее распространенными автогенераторами гармонических колебаний являются генераторы, в которых цепь положительной обратной связи выполнена на последовательных или параллельных резонансных контурах. Применяют автогенераторы с трансформаторной обратной связью, трехточечные генераторы с индуктивной и емкостной обратной связью. В данной работе исследуется автогенератор на полевом транзисторе с резонансным контуром в цепи стока и трансформаторной обратной связью. Упрощенная схема генератора на полевом транзисторе и его схема замещения показаны на рис. 13.2.

Режим работы схемы автогенератора по постоянному току устанавливается с помощью источника питания стока E_C и источника смещения затвора E_3 . В схеме использован параллельный колебательный контур $L_k C_k$. Сопротивление потерь R_k учитывает потери на элементах контура в индуктивности и емкости. Усилитель

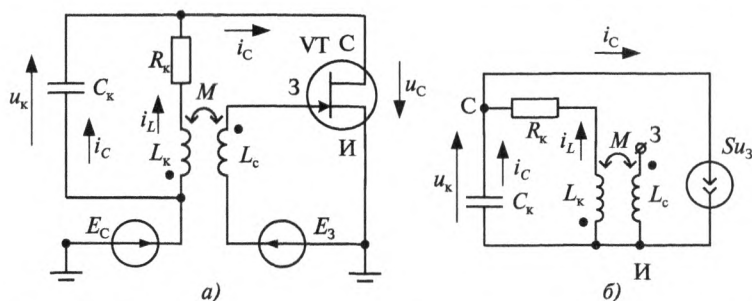


Рис. 13.2. Схема автогенератора на полевом транзисторе (а) и его схема замещения (б)

генератора выполнен на полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа. Положительная обратная связь в цепь затвора осуществляется через обмотку связи L_c , индуктивно связанную с катушкой L_k контура. При этом важное значение имеет правильное включение катушки связи, которая должна обеспечивать поворот фазы примерно на π и выполнение условия баланса фаз. Схема замещения автогенератора (рис. 13.2, б) составлена для малого переменного сигнала, и источники постоянного питания и смещения в ней не учитываются.

По схеме замещения (рис. 13.2, б) составим основные уравнения автогенератора:

$$i_C = Su_3; \quad u_X = M \frac{di_L}{dt}; \quad i_C = SM \frac{di_L}{dt},$$

где i_C — ток стока; S — крутизна полевого транзистора; u_3 — напряжение на затворе; M — взаимная индуктивность.

Далее выразим:

- напряжение на конденсаторе контура

$$u_C = R_k i_L + L_k \frac{di_L}{dt};$$

- ток в конденсаторе

$$i_C = C_k \frac{du_C}{dt} = R_k C_k \frac{di_L}{dt} + L_k C_k \frac{d^2 i_L}{dt^2};$$

- ток стока

$$i_C = i_L + i_C = i_L + R_k C_k \frac{di_L}{dt} + L_k C_k \frac{d^2 i_L}{dt^2} = SM \frac{di_L}{dt}.$$

Преобразуем последнее уравнение к виду

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \left(\frac{R_k}{L_k} - \frac{SM}{L_k C_k} \right) \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{L_k C_k} i_L = 0. \quad (13.4)$$

Введем обозначения: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\kappa}C_{\kappa}}}$ — резонансная частота контура без потерь; $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{\kappa}}{L_{\kappa}} - \frac{SM}{L_{\kappa}C_{\kappa}} \right)$ — коэффициент затухания контура.

Преобразуем уравнение (13.4) к виду

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_L}{dt} + \omega_0^2 i_L = 0. \quad (13.5)$$

Решение уравнения (13.5) имеет вид

$$i_L = I_{mL} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (13.6)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ — частота колебаний в контуре.

Из уравнения (13.6) следует, что при $\alpha > 0$ колебания в контуре затухают, при $\alpha < 0$ нарастают. При $\alpha = 0$ в контуре устанавливается режим стационарных колебаний, определяемый формулой $i_{L \text{ уст}} = I_{mL} \sin \omega t$.

Таким образом, условие возбуждения колебаний в контуре можно записать в виде

$$S > \frac{R_{\kappa}C_{\kappa}}{M} = S_{\text{кр}}.$$

Коэффициент затухания можно записать в виде

$$\alpha = \frac{1}{2L_{\kappa}} \left(R_{\kappa} - \frac{SM}{C_{\kappa}} \right) = \frac{1}{2L_{\kappa}} (R_{\kappa} - R_{\text{вн}}),$$

где $R_{\text{вн}} = SM/C_{\kappa}$ — отрицательное вносимое сопротивление.

Таким образом, положительная обратная связь приводит к созданию отрицательного вносимого сопротивления, которое может компенсировать сопротивление потерь контура и создавать незатухающие колебания. Регулировать отрицательное вносимое сопротивление можно изменением магнитной связи M и изменением крутизны полевого транзистора путем изменения напряжения на затворе полевого транзистора E_3 . При более отрицательном напряжении на затворе крутизна S уменьшается.

В стационарном режиме работы автогенератора установление амплитуды колебаний происходит за счет изменения крутизны транзистора с ростом амплитуды колебаний. Приближенная зависимость крутизны от напряжения колебаний на затворе транзистора имеет вид

$$S(u_3) = S_0 - bu_3^2, \quad (13.7)$$

где S_0 — крутизна при нулевом напряжении на затворе.

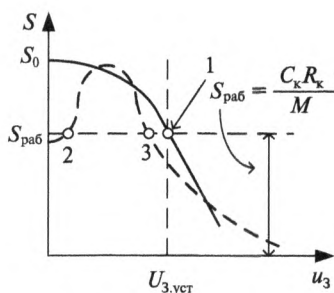


Рис. 13.3. Зависимость крутизны от напряжения колебаний на затворе транзистора

График изменения крутизны по приближенной формуле (13.7) показан на рис. 13.3 сплошной линией. С ростом напряжения колебаний на затворе крутизна снижается до значения $S_{\text{раб}}$, которое определяет напряжение колебаний на затворе в стационарном режиме: $u_{3,\text{уст}} = \sqrt{\frac{S_0 - S_{\text{раб}}}{b}}$. Напряжение на контуре найдем с учетом коэффициента трансформации $n = L_k/M$:

$$u_k \approx \frac{L_k}{M} u_{3,\text{уст}}.$$

В автогенераторе происходит мягкий режим возбуждения с плавным увеличением амплитуды колебаний и с одним устойчивым состоянием в точке 1.

Если крутизна транзистора изменяется немонотонно (пунктирная кривая на рис. 13.3), происходит жесткий режим возбуждения, выходные колебания возникают резко, скачком и соответствуют устойчивой точке 3. Точка 2 является неустойчивой.

Расчёт автогенератора в Mathcad

Подставим в уравнение (13.7) $u_3 = M \frac{di_L}{dt}$. Тогда получим

$$S(u_3) = S_0 - bM^2 \left(\frac{di_L}{dt} \right)^2.$$

В уравнении (13.4) обозначим

$$y_1 = i_L(t); \quad \frac{dy_1}{dt} = y_2.$$

Запишем уравнение (13.7) в виде уравнений состояния:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= y_2; \\ \frac{dy_2}{dt} &= \omega_0^2 [(S_0 - bM^2 y_2^2) M y_2 - R_k C_k y_2 - y_1]. \end{aligned} \quad (13.8)$$

Нелинейные дифференциальные уравнения (13.8) решаются в Mathcad с использованием функции $\text{rkfixed}(y, x1, x2, m, F)$, которая реализует метод Рунге–Кутты четвертого порядка. Аргументами функции являются: y — вектор начальных условий размерности n (n — порядок дифференциального уравнения); $x1$ и $x2$ —

граничные точки интервала, на котором ищется решение дифференциального уравнения (начальные условия, заданные в векторе y соответствуют значению решения в точке x_1 ; m — число точек, в которых ищется приближенное решение; F — вектор, которым заданы производные дифференциального уравнения.

Программа расчета

ORIGIN := 1

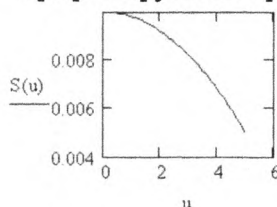
$$L = 10^{-2} \quad C = 68 \cdot 10^{-9} \quad R = 10 \quad M = 5 \times 10^{-4}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega = 3.835 \times 10^4$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad T = 1.638 \times 10^{-4}$$

$$SO = 10^{-2} \quad b = 2 \cdot 10^{-4} \quad u = 0, 0.1, 0.5 \quad S(u) = SO - b u^2$$

График крутизны транзистора

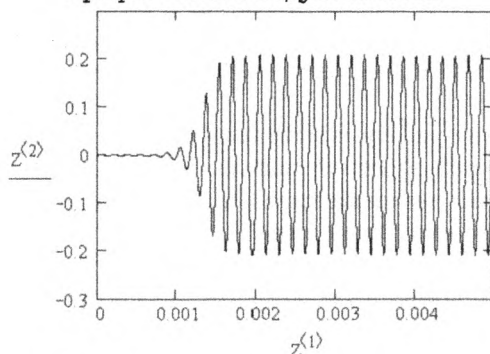


$$y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ \omega^2 \left[\left[SO - b M^2 (y_2)^2 \right] M y_2 - R C y_2 - y_1 \right] \end{bmatrix}$$

$$Z = \text{rkfixed}(y, 0, 5 \cdot 10^{-3}, 1001, F)$$

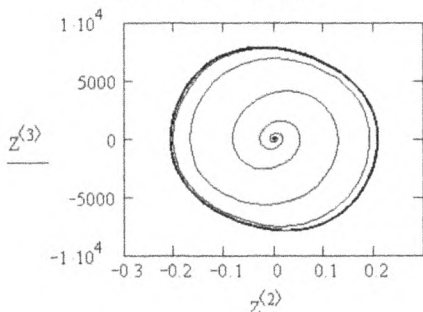
График тока в индуктивности



В результате расчётов в Mathcad получен график тока в индуктивности $i_L(t) = Z^{(2)}$, показывающий процесс возникновения

колебаний и переход в установившийся режим с амплитудой тока в индуктивности контура 0,2 А. По оси абсцисс отложено время $t = Z^{<1>}$. На фазовом портрете по оси абсцисс отложен ток в индуктивности $i_L(t) = Z^{<2>}$, а по оси ординат отложена производная тока $\frac{di_L}{dt} = Z^{<3>}$. В исследованном автогенераторе наблюдается мягкий режим самовозбуждения, фазовый портрет имеет вид раскручивающейся спирали с устойчивым предельным циклом.

Фазовый портрет



13.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Определение и назначение автогенераторов гармонических колебаний.
2. Обобщенная схема и принцип функционирования автогенератора с обратной связью.
3. Что такое петлевое усиление?
4. Какие условия должны выполняться для возникновения колебаний в автогенераторе?
5. Что означает баланс амплитуд и баланс фаз в автогенераторе?
6. Нарисуйте схемы автогенераторов с колебательными контурами.
7. Объясните работу автогенератора с резонансным контуром и трансформаторной обратной связью.
8. При каком значении крутизны полевого транзистора в автогенераторе возникают колебания?
9. Как найти отрицательное вносимое сопротивление в автогенераторе на полевом транзисторе с трансформаторной обратной связью?
10. Что такое мягкий и жесткий режим возбуждения колебаний?
11. Что такое фазовый портрет автоколебаний?

13.3. Лабораторная работа № 13. Исследование автогенератора гармонических колебаний

Цель работы — исследование условий возникновения колебаний и режимов генерации в автогенераторе на полевом транзисторе с трансформаторной связью.

Лабораторное задание

1. Собрать схему компьютерного моделирования рис. 13.4. В модели автогенератора использован полевой транзистор с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа. Выбирать надо такие транзисторы, у которых напряжение отсечки (*Пороговое напряжение*) между затвором и истоком составляет от -6 до -4 В. К таким транзисторам в библиотеке программы TINACloud относятся, например, 2N3970, 2N4091, 2N4391, 2N4392, 2N4856, 2N4859, 2N4861. Индуктивно связанные катушки M1 из меню *Базовые* имеют индуктивности L1's и L2's по 10 мГн (могут быть заданы преподавателем). Взаимную индуктивность M установить равной 1 мГн (рис. 13.5). Резисторы R2 и R3 моделируют потери в катушках. Индуктивность L2 и емкость C2 образуют параллельный колебательный контур. Источник напряжения E1 (VS1) создает отрицательное смещение на затворе транзистора. Источник напряжения E2 (VS2) создает напряжение питания стока. Первый вольтметр VM1 измеряет напряжение на затворе транзистора, второй вольтметр VM2 измеряет напряжение на стоке.

2. Рассчитать резонансную частоту колебательного контура генератора по формуле $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$.

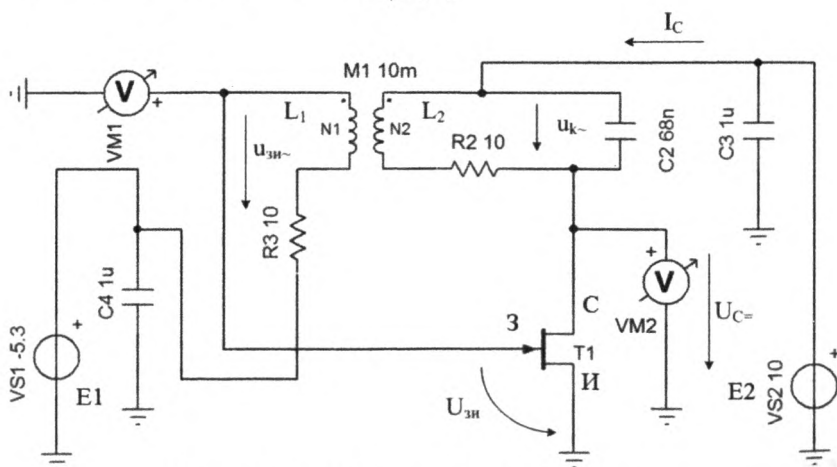


Рис. 13.4. Схема моделирования автогенератора

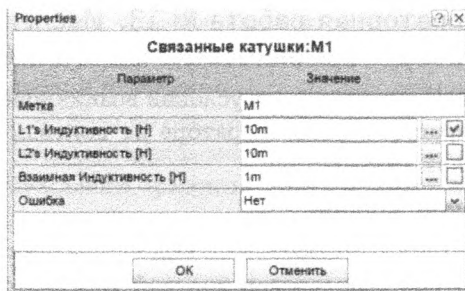
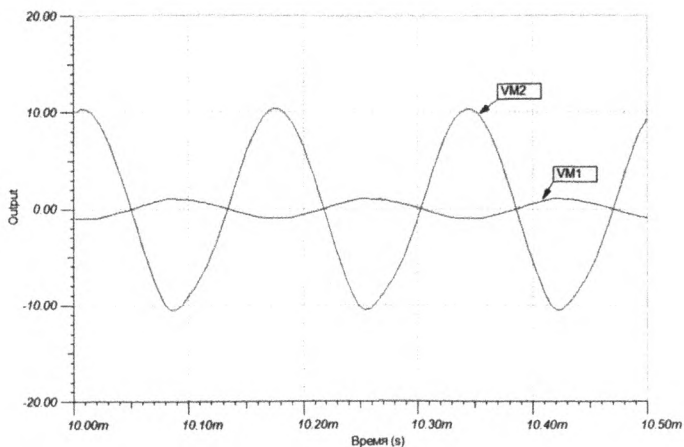


Рис. 13.5. Окно установки параметров катушек

Исследование зависимости параметров автогенератора от напряжения затвор исток

3. В таблице параметров транзистора определить напряжение отсечки (*Пороговое напряжение*) и установить напряжение на затворе $U_{ЗИ} = U_{отс}$. Установить напряжение на затворе $U_{ЗИ} = U_{отс} + 0,5$ В и, используя Анализ — Переходный процесс (от 10m до 10,5m; Нулевые начальные условия), зарегистрировать графики колебаний (рис. 13.6).

Рис. 13.6. Графики колебаний при $U_{ЗИ} = -5$ В, $M = 1$ мГн

4. Измерить $u_{к\sim}$; $u_{зи}$. С помощью курсора измерить период колебаний T . Ток I_C и $U_{ЗИ}$ измерить в режиме Анализ — Анализ постоянного тока — Таблица результатов постоянного тока. Записать эти измерения в табл. 13.1. Рассчитать частоту колебаний f и записать в табл. 13.1.

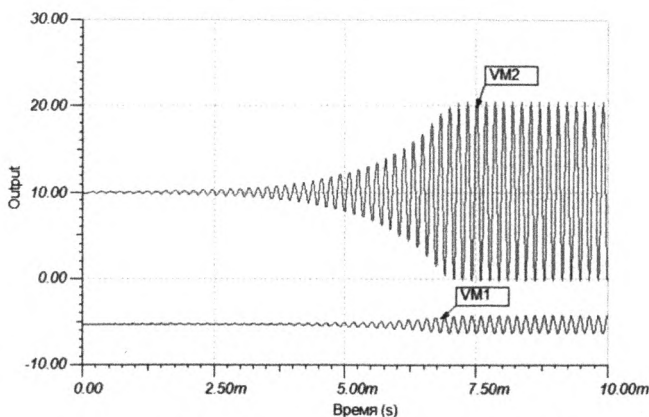


Рис. 13.7. Графики возникновения колебаний

5. Исследовать переходной процесс возникновения колебаний. Для этого выбрать режим *Анализ — Переходный процесс*, установить *Запустить показ = 0*, *Окончить показ = 10m*. Получить графики напряжений на затворе и на стоке автогенератора (рис. 13.7). Записать в табл. 13.1 время установления колебаний ($t_{уст}$) до уровня $0,9U_{max}$.

6. Исследовать установившийся процесс колебаний. В режиме *Анализ — Переходный процесс*, установить *Запустить показ = 10m*, *Окончить показ = 15m*. Зарегистрировать графики колебаний (рис. 13.8).

7. Исследовать нелинейные искажения колебаний. В режиме *Анализ — Фурье анализ — Ряды Фурье* установить *время начала дискретизации = 10 мс*, *опорную частоту*, равную частоте колебаний, *количество выборок 4096*, *вывод VM2*. Выполнить *Запустить* и зарегистрировать *Гармоническое искажение* (рис. 13.9).

8. Увеличивая напряжение $U_{зи}$ на 0,5 В, повторять исследования по п. 7 до тех пор, пока нелинейные искажения не превысят 30 %. Зарегистрировать форму колебаний при максимальных искажениях.

Исследование зависимости параметров автогенератора от коэффициента обратной связи

9. По данным табл. 13.1 найти $U_{зи(min)}$, при котором возникают

Таблица 13.1

$$E_1 = 10 \text{ В}, M = 1 \text{ мГн}, \\ L_1 = L_2 = 10 \text{ мГн}$$

$U_{зи}$, В	
$u_k \sim$, В	
$u_{зи} \sim$, мВ	
I_C , мА	
$i_C \sim$, мкА	
$t_{уст}$, мс	
T , мкс	
f , кГц	
K , %	
$\beta = u_{зи} \sim / u_k \sim$	
$M = \beta L_k$	
$S_{раб} = C_k R_k / M$	

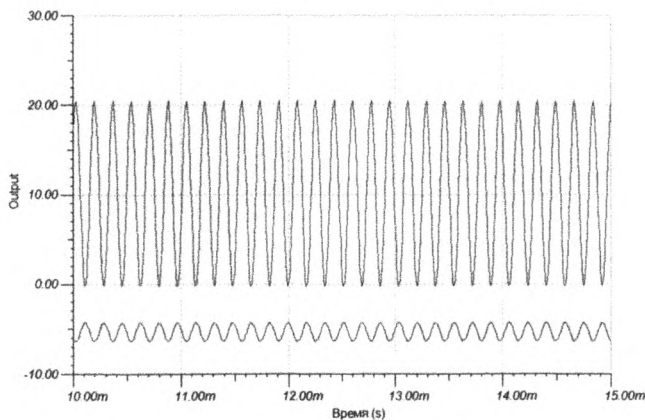


Рис. 13.8. Графики установившихся колебаний

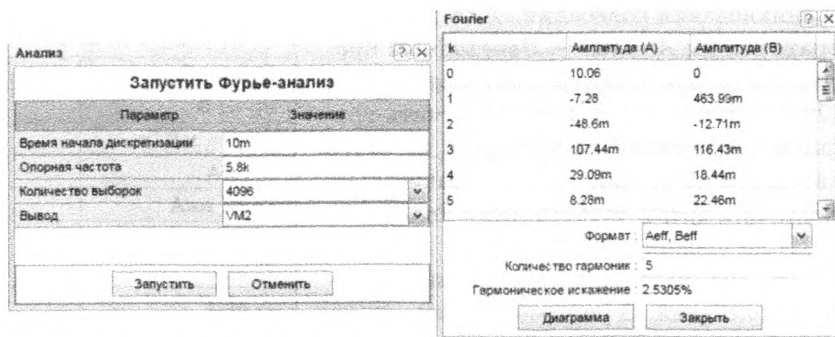


Рис. 13.9. Установки Фурье-анализа нелинейных искажений

автоколебания, и $U_{\text{ЗИ}}=(\max)$, при котором коэффициент нелинейных искажений превышает 30 %. Вычислить

$$U_{\text{ЗИ}}=(\text{ср}) = \frac{U_{\text{ЗИ}}=(\max) + U_{\text{ЗИ}}=(\min)}{2}$$

и установить это напряжение на затворе транзистора.

Провести исследование автогенератора по пп. 4–7 для значений взаимной индуктивности M из табл. 13.2. Результаты записать в табл. 13.2.

Исследование зависимости параметров автогенератора от напряжения на стоке

10. Установить на затворе транзистора напряжение $U_{\text{ЗИ}}=(\text{ср})$. Значение взаимной индуктивности установить равным 1 мГн.

Провести исследования зависимости параметров автогенератора

Таблица 13.2

$$E_1 = 10 \text{ В}, U_{\text{ЗИ}} = U_{\text{ЗИ(ср)}}, L_1 = L_2 = 10 \text{ мГн}$$

$M, \text{ мГн}$	2	1	0,8	0,6	0,4	0,2
$u_{\text{к}\sim}, \text{ В}$						
$u_{\text{ЗИ}\sim}, \text{ мВ}$						
$I_{\text{с}}, \text{ мА}$						
$i_{\text{с}\sim}, \text{ мкА}$						
$T, \text{ мкс}$						
$f, \text{ кГц}$						
$t_{\text{уст}}, \text{ мс}$						
$K\%$						
$\beta = u_{\text{ЗИ}\sim} u_{\text{к}\sim}$						
$M = \beta L_{\text{к}}$						
$S_{\text{раб}} = C_{\text{к}} R'_{\text{к}} / M$						

ра от постоянного напряжения на стоке $U_{\text{с}} =$ для значений, указанных в табл. 13.3. Результаты записать в табл. 13.3.

11. Рассчитать в табл. 13.3 значения $I_{\text{с}}, \beta, M, S_{\text{раб}}$.

Таблица 13.3

$$E_1 = 10 \text{ В}, U_{\text{ЗИ}} = U_{\text{ЗИ(ср)}}, L_1 = L_2 = 10 \text{ мГн}, M = 1 \text{ мГн}$$

$U_{\text{с}}, \text{ В}$	10	8	6	4	2	0
$u_{\text{к}\sim}, \text{ В}$						
$u_{\text{ЗИ}\sim}, \text{ мВ}$						
$I_{\text{с}}, \text{ мА}$						
$i_{\text{с}\sim}, \text{ мкА}$						
$T, \text{ мкс}$						
$f, \text{ кГц}$						
$t_{\text{уст}}, \text{ мс}$						
$K\%$						
$\beta = u_{\text{ЗИ}\sim} u_{\text{к}\sim}$						
$M = \beta L_{\text{к}}$						
$S_{\text{раб}} = C_{\text{к}} R'_{\text{к}} / M$						

Домашнее задание

1. Используя параметры контура, рассчитать его резонансную частоту $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{к}}C_{\text{к}}}}$ и сравнить с экспериментальными значениями, определенными в лабораторной работе. Объяснить отличие частоты колебаний от резонансной.

2. Рассчитать с учетом выходного сопротивления транзистора $R_{\text{вых}} \approx 30 \text{ кОм}$ полное сопротивление потерь в контуре $R'_{\text{к}} = R_{\text{к}} + R_{\text{доб}}$, где $R_{\text{доб}} = L_{\text{к}} / C_{\text{к}} R_{\text{вых}}$.

3. Рассчитать эквивалентное резонансное сопротивление контура с учетом выходного сопротивления транзистора $R_{\text{вых}} \approx 30 \text{ кОм}$ по формуле $R_{\text{эк}} = \frac{L_{\text{к}}/C_{\text{к}}}{R'_{\text{к}}}$. На частоте параллельного резонанса сопротивление контура активно и равно эквивалентному резонансному сопротивлению.

4. По данным табл. 13.1 рассчитать и занести в табл. 13.3 значения $\beta = u_{\text{зи}}/u_{\text{к}} \sim$, $M = \beta L_{\text{к}}$, $S_{\text{раб}} = C_{\text{к}} R'_{\text{к}}/M$ и $i_{\text{с}} \sim = u_{\text{к}} \sim / R_{\text{эк}}$. Построить графики зависимостей от напряжения затвор-исток $U_{\text{зи}} =$ для $u_{\text{к}} \sim$, $u_{\text{зи}} \sim$, $t_{\text{уст}}$, f , $K\%$, β , M , $S_{\text{раб}}$.

5. По данным табл. 13.2 построить графики зависимостей от взаимной индуктивности M для $u_{\text{к}} \sim$, $u_{\text{зи}} \sim$, $t_{\text{уст}}$, f , $K\%$, β , M , $S_{\text{раб}}$.

6. По данным табл. 13.3 построить графики зависимостей от напряжения питания стока E_2 для $u_{\text{к}} \sim$, $u_{\text{зи}} \sim$, $I_{\text{с}}$, β , M , $S_{\text{раб}}$.

7. На основании полученных данных подтвердить выполнение условия баланса амплитуд и условия баланса фаз в автогенераторе. Сформулировать выводы по работе в целом.

14 ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ

14.1. Краткие теоретические сведения.

Цифровые логические элементы

Цифровые логические элементы, выполненные на интегральных микросхемах (ИМС), предназначены для преобразования и обработки дискретных сигналов и выполняют основные логические функции, представленные в табл. 14.1.

В табл. 14.1 использованы обозначения: \bar{X} — отрицание значения X ; $X_1 \cdot X_2$ — логическое умножение (конъюнкция); $X_1 + X_2 = X_1 \vee X_2$ — логическое сложение (дизъюнкция).

Наибольшее применение получили серии логических ИМС, выполненные по ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика), ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и КМОП (комплементарная МОП-логика) технологиям.

В ИМС, выполненных по технологии ТТЛ, в качестве базового элемента используется многоэмиттерный транзистор. Упрощенная схема логического элемента И-НЕ с многоэмиттерным транзистором VT1 приведена на рис. 14.1. Если хотя бы на один эмиттер VT1 подан низкий уровень, VT1 будет открыт, а второй транзистор VT2, работающий инвертором сигнала и выполняющий функцию НЕ, будет закрыт. На выходе базового элемента будет высокий уровень сигнала. Для того чтобы напряжение на выходе имело низкий уровень, на все эмиттеры VT1 надо подать высокий уровень. Таким образом, реализуется функция И-НЕ.

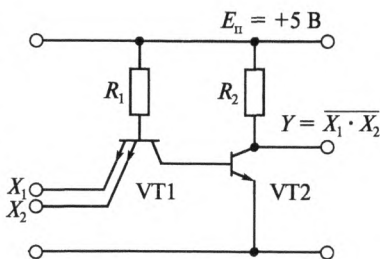

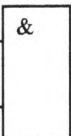
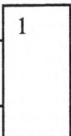
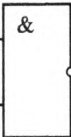

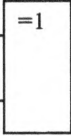


Рис. 14.1. Упрощенная схема логического элемента 2И-НЕ (ТТЛ)

В ИМС, выполненных по технологии КМОП, в качестве базового элемента используются ключевые схемы, построенные на комплементарных МОП-транзисторах. На рис. 14.2 приведена схема логического элемента 2И-НЕ, выполненного по технологии КМОП. Схема состоит из двух групп ключей на полевых транзисторах VT1,

Таблица 14.1

Элемент	Обозначение	Выполняемая функция и схема
НЕ (отрицание)	ЛН	 X — вход, $Y = \bar{X}$ — выход
И (логическое умножение)	ЛИ	 X_1, X_2 — входы, $Y = X_1 \cdot X_2$ — выход
ИЛИ (логическое сложение)	ЛЛ	 X_1, X_2 — входы, $Y = X_1 + X_2 = X_1 \vee X_2$ — выход
И-НЕ (логическое умножение с отрицанием)	ЛА	 X_1, X_2 — входы, $Y = \overline{X_1 \cdot X_2}$ — выход
ИЛИ-НЕ (логическое сложение с отрицанием)	ЛЕ	 X_1, X_2 — входы, $Y = \overline{X_1 + X_2}$ — выход
Исключающее ИЛИ	ЛП	 X_1, X_2 — входы, $Y = \bar{X}_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot \bar{X}_2 = X_1 \oplus X_2$ — выход

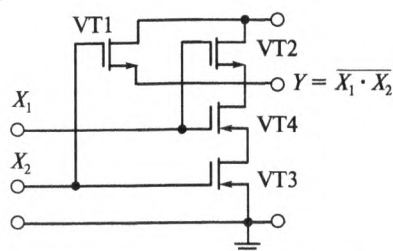


Рис. 14.2. Упрощенная схема логического элемента 2И-НЕ (КМОП)

VT3 и VT2, VT4. Каждая группа управляется одним сигналом X_1 или X_2 . При подаче сигналов $X_1 = X_2 = 1$ ключи на транзисторах VT1, VT2 размыкаются, а ключи на транзисторах VT3, VT4 замыкаются. В результате на выходе будет сигнал низкого уровня $Y = \overline{X_1 \cdot X_2}$.

Применение полевых транзисторов с изолированным затвором обеспечивает большое входное со-

противление микросхем КМОП. Однако микросхемы КМОП чувствительны к статическому электричеству и требуют специальной защиты. Питание таких ИМС производится от источника напряжения $+5...+15$ В.

Уровни выходных сигналов зависят от напряжения питания. Уровень логической единицы равен примерно $0,8E_{\max}$, а уровень логического нуля составляет от 0,3 до 2,5 В.

Мультиплексоры и демультиплексоры

Мультиплексором называют функциональный узел, который обеспечивает передачу цифровой информации, поступающей по нескольким входным линиям связи на одну выходную линию. Мультиплексор можно представить в виде коммутатора, управляемого входной логической схемой. Входные логические сигналы X_i поступают на входы коммутатора и через коммутатор передаются на выход Y . На вход логической схемы поступают адресные сигналы A_k , определяющие, какой входной сигнал в данный момент передается на выход. Некоторые мультиплексоры могут иметь выход с тремя состояниями: два состояния 0 и 1 и третье состояние — отключенный выход (выходное сопротивление равно бесконечности).

На рис. 14.3 показана схема мультиплексора (4→1), выполненная на элементах И и ИЛИ. Работа мультиплексора отображается таблицей истинности 14.2.

Таблица 14.2

A_0	A_1	Y
0	0	X_0
0	1	X_1
1	0	X_2
1	1	X_3

Используя таблицу истинности, запишем выражение для выходной функции мультиплексора:

$$Y = X_0(\bar{A}_0\bar{A}_1) + X_1(\bar{A}_0A_1) + X_2(A_0\bar{A}_1) + X_3(A_0A_1).$$

Графическое изображение мультиплексора (8→1) показано на рис. 14.4. Входами являются выводы микросхемы D_0-D_7 , выходами Q и \bar{Q} , адресные входы A_0, A_1, A_2 , вход разрешения работы E .

Демультиплексор (DMX) выполняет преобразование, обратное мультиплексированию: входной сигнал X поступает на вход демультиплексора и передается на выходы $Y_1, Y_2, ..., Y_n$. Адресные сигналы $A_0, ..., A_k$ имеют такое же значение, как и у мультиплексора. Графическое изображение демультиплексора (1→4) показано на рис. 14.5.

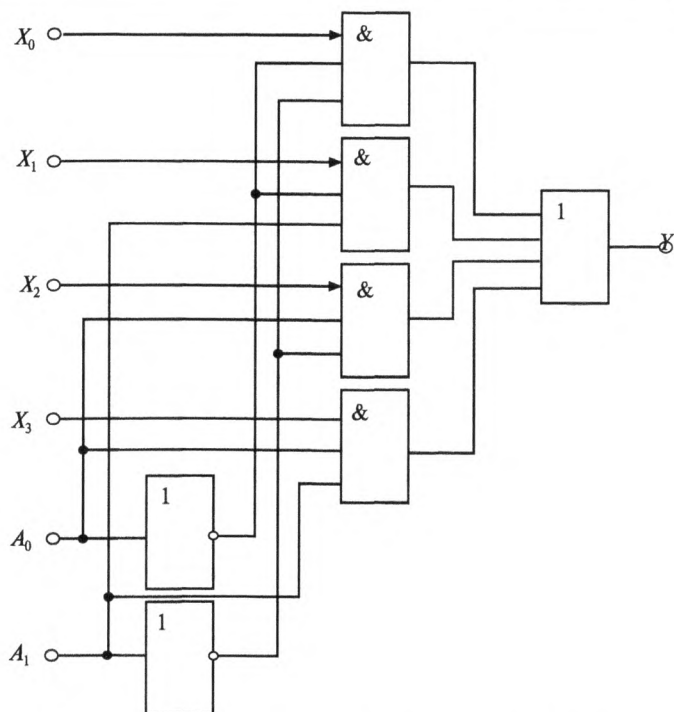


Рис. 14.3. Мультиплексор (4→1) на элементах И-НЕ

На схеме обозначены: D — информационный вход, A_0, A_1 — адресные входы, E — вход разрешения, $Q_0, \bar{Q}_0, \dots, Q_3, \bar{Q}_3$ — прямые и инверсные выходы.

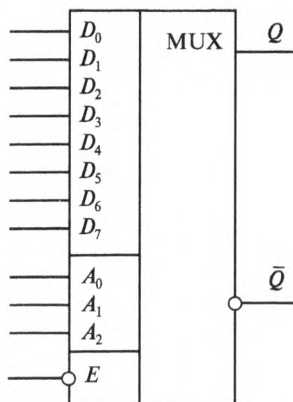


Рис. 14.4. Условное графическое изображение мультиплексора (8→1)

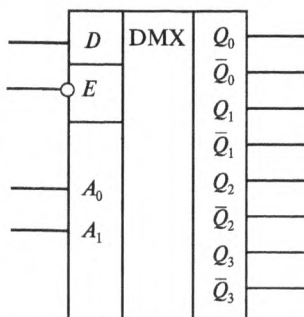


Рис. 14.5. Условное графическое изображение демультиплексора (1→4)

Дешифраторы

Дешифратором называют преобразователь двоичного n -разрядного кода в унитарный 2^n -разрядный код, все разряды которого за исключением одного равны нулю. Дешифраторы бывают полные и неполные. Для полного дешифратора выполняется условие $N = 2^n$, где n — число входов, N — число выходов. В неполных дешифраторах имеется n входов, но выходов $N < 2^n$.

На рис. 14.6 показана схема дешифратора 3×8 , преобразующего двоичный трехразрядный код в унитарный восьмиразрядный, в котором, например, входное двоичное число 100 соответствует выходному коду 00010000.

В цифровой технике применяют также преобразователи кодов для управления сегментными и матричными индикаторами, шифраторы, преобразующие, например, 8-разрядный единичный код в двоичный код, и другие комбинационные устройства, построенные на цифровых логических элементах. Особенностью комбинационных устройств является то, что их выходные сигналы однозначно определяются только действующей в настоящий момент на входе комбинацией переменных и не зависят от значений переменных, действовавших на входе ранее.

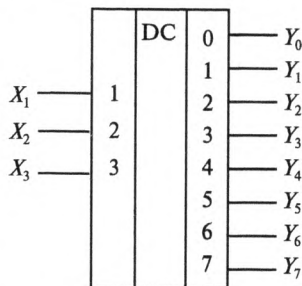


Рис. 14.6. Условное графическое изображение дешифратора 3×8

Триггеры

Триггером называется устройство, способное формировать два устойчивых значения выходного сигнала и скачкообразно изменять эти значения под действием внешнего управляющего сигнала.

Триггеры относятся к цифровым схемам последовательного типа. Состояние выхода последовательной схемы (цифрового автомата) зависит от текущего состояния входа X и от внутреннего состояния схемы Q : $Y = F(X, Q)$.

Таким образом, триггер является хранителем предшествующей и источником текущей информации. Триггер называют бистабильной схемой, он является элементарной ячейкой памяти. Два устойчивых состояния триггера обозначаются: $Q = 1$ и $Q = 0$.

Основные типы триггеров в интегральном исполнении получили следующие названия: RS -триггер, JK -триггер, D -триггер, T -триггер.

Асинхронный RS -триггер содержит одну ячейку памяти, может быть выполнен на двух элементах ИЛИ-НЕ (рис. 14.7) и имеет два прямых информационных входа:

R — раздельный вход сброса триггера ($Q = 0$);

S — раздельный вход установки триггера ($Q = 1$).

Триггер называется асинхронным, если переключение его происходит сразу при изменении информационных сигналов. Работа асинхронного RS -триггера на элементах ИЛИ-НЕ отображается таблицей переходов 14.3.

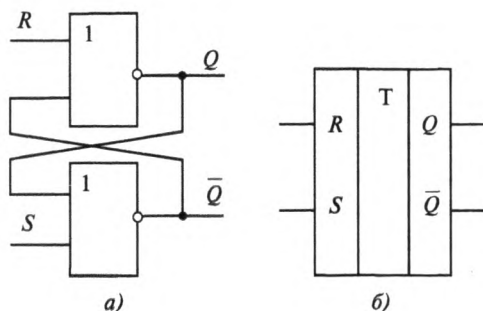


Таблица 14.3

R	S	Q_{n+1}
0	0	Q_n
0	1	1
1	0	0
1	1	—

← Рис. 14.7. Асинхронный RS -триггер (а) и его условное графическое изображение (б)

Функциональное состояние RS -триггера определяется уравнением

$$Q_{n+1} = \bar{R}_n S_n + \bar{R}_n Q_n,$$

где Q_n и Q_{n+1} — предыдущее и новое состояние триггера соответственно.

В синхронных триггерах имеется синхронизирующий вход C и переключение происходит при поступлении на этот вход синхронизирующего импульса. Причем момент переключения может соответствовать переднему или заднему фронту синхроимпульса.

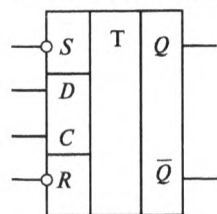


Рис. 14.8. Синхронный D -триггер

D -триггер (рис. 14.8) имеет информационный вход D (data — данные). Информация со входа D заносится в триггер по положительному перепаду на счетном входе C триггера. Помимо счетного C и информационного D входов, триггер имеет асинхронные установочные \bar{R} и \bar{S} входы. Установочные входы приоритетны. Они управляют триггером независимо от сигналов на входах C и D . Уравнение D -триггера имеет вид

$$Q_{n+1} = [\bar{C}Q_n + CD + \bar{S}]R.$$

JK-триггер (рис. 14.9) является наиболее универсальным, так как на его основе могут быть построены любые из рассмотренных выше триггеров. *JK*-триггер имеет: входы *J* и *K* установки триггера в состояния $Q = 1$ и $Q = 0$ соответственно; синхронизирующий вход *C*; раздельный вход *S* асинхронной установки триггера ($Q = 1$); раздельный вход *R* асинхронного сброса триггера ($Q = 0$). В схеме (рис. 14.10) входы *S* и *R* имеют низкий активный уровень. При этом входы *S* и *R* имеют приоритетное значение.

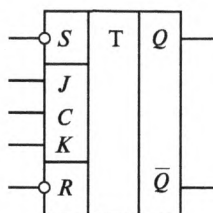


Рис. 14.9.
JK-триггер

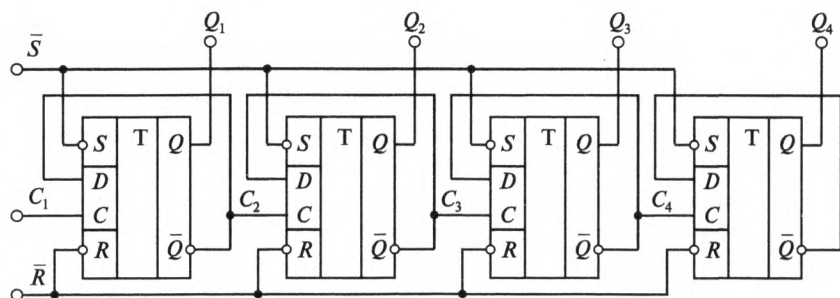
Функциональное состояние *JK*-триггера определяется уравнением

$$Q_{n+1} = [C(J\bar{Q}_n + \bar{K}Q_n) + \bar{C}Q_n + \bar{S}]R.$$

Счетчики импульсов и регистры

Счетчиком называют цифровое устройство, предназначенное для подсчета числа импульсов. С поступлением каждого импульса на вход *C* счетчик меняет свое состояние на единицу. Счетчик можно реализовать на нескольких триггерах, при этом состояние счетчика будет определяться состоянием его триггеров. В суммирующих счетчиках каждый входной импульс увеличивает его состояние на единицу. В вычитающих счетчиках состояние уменьшается на единицу каждым входным импульсом.

Наиболее простыми являются двоичные счетчики, в которых состояние счетчика определяется двоичным кодом на его выходах. Схема асинхронного четырехразрядного суммирующего счетчика на *D*-триггерах показана на рис. 14.10.



$C_1 - C_4$ — счетные импульсы; \bar{R} — установка нуля

Рис. 14.10. Асинхронный счетчик на *D*-триггерах

по фронту счетных импульсов); с комбинированным переносом; кольцевые (на основе сдвиговых регистров).

Регистром называется устройство цифровой техники, предназначенное для записи, хранения и (или) сдвига информации, представленной в виде многоразрядного двоичного кода.

По способу приема информации регистры подразделяют на:

- последовательные (сдвигающие), в которых информация записывается и считывается только в последовательной форме;
- параллельные (статические), в которых информация записывается и считывается только в параллельной форме;
- последовательно-параллельные, в которых информация записывается или считывается как в последовательной, так и в параллельной формах.

Простейшие регистры выполняют на триггерах. Схема последовательного сдвигающего регистра на JK -триггерах показана на рис. 14.12.

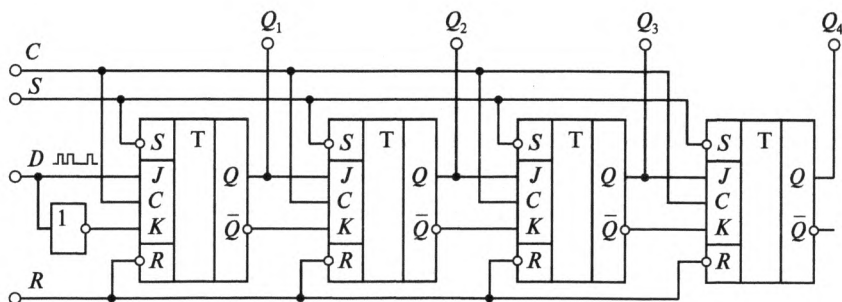


Рис. 14.12. Четырехразрядный сдвигающий регистр с последовательным вводом

Сдвигающий регистр работает следующим образом. В начале работы управляющими сигналами S и R все триггеры устанавливаются в нулевое состояние, активный уровень сигналов S и R снимается, на вход D (данные) подается первый импульс цифрового кода (например, единица кода 1101 на рис. 14.12). С первым тактовым импульсом, поступающим на вход C , в первый триггер будет записана единица младшего разряда. Со следующим тактовым импульсом эта единица будет записана во второй триггер и окажется на его выходе. Одновременно в первый триггер поступит нуль (следующий разряд кода). После четырех тактовых импульсов код на выходах Q_4 – Q_1 будет соответствовать входному коду и может

быть считан внешним устройством. Таким образом, регистр преобразует последовательный код в параллельный. В современных микроэлектронных устройствах отображения и регистрации информации количество параллельных выходов регистров может достигать нескольких тысяч.

14.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе

1. Перечислите основные цифровые элементы и поясните выполняемые ими логические операции.
2. Поясните работу базового логического элемента интегральных микросхем ТТЛ.
3. Поясните работу базового логического элемента микросхем КМОП.
4. Какие цифровые устройства называются комбинационными и в чем принцип их работы?
5. Каковы назначение и структурная схема мультиплексора и демультиплексора?
6. Каковы назначение и принцип работы дешифратора?
7. Назначение и принцип работы цифровых триггеров.
8. Поясните по таблице переходов и схеме принцип работы асинхронного *RS*-триггера на элементах ИЛИ-НЕ.
9. В чем отличие синхронных триггеров от асинхронных?
10. Поясните принцип работы *D*-триггера и составьте для него таблицу переходов.
11. Поясните принцип работы *JK*- триггера и составьте для него таблицу переходов.
12. Каковы назначение и классификация цифровых счетчиков?
13. Поясните принцип работы асинхронного счетчика на *D*-триггерах.
14. Что называют модулем счета и как его можно изменить в цифровых счетчиках?
15. Каковы назначение и классификация регистров?
16. Поясните принцип работы последовательного сдвигающего регистра на *JK*-триггерах.

14.3. Лабораторная работа № 14. Исследование цифровых микросхем

Цель работы — изучение основных классов цифровых микросхем и методов их исследования с использованием программы TINACloud.

Лабораторное задание

А. Исследование логических элементов и комбинационных микросхем

1. Логические элементы обозначены по европейскому стандарту DIN и имеют графические изображения, показанные в табл. 14.4.

Таблица 14.4

2И	2ИЛИ	НЕ	2И-НЕ	2ИЛИ-НЕ

2. Собрать схему компьютерного моделирования логических элементов, показанную на рис. 14.13. Элемент 2И находится во вкладке *Затворы*. На вкладке *Источники* выбрать цифровые источники высокого (H) и низкого (L) уровня.

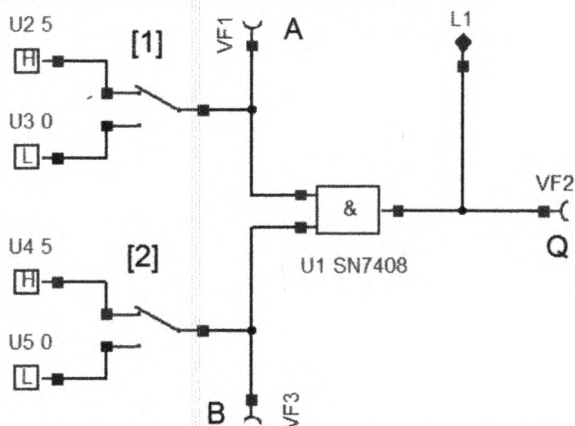


Рис. 14.13. Схема моделирования элемента 2И

Выбрать в режиме интерактивного анализа — DC. Изменяя положения ключей [1] и [2], создавать на входах А и В состояния в соответствии с табл. 14.5. Состояние на выходе Q записать в таблицу истинности 14.5. После окончания опытов нажать *Off*.

Таблица 14.5

A	B	Q
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

3. Выполнить аналогичные исследования и заполнить таблицы истинности для других логических элементов из табл. 14.4.

4. Собрать комбинационную схему с двумя логическими элементами, соединёнными в соответствии с рис. 14.14. Для каждой бригады логические элементы DD1 и DD2 заданы в табл. 14.6.

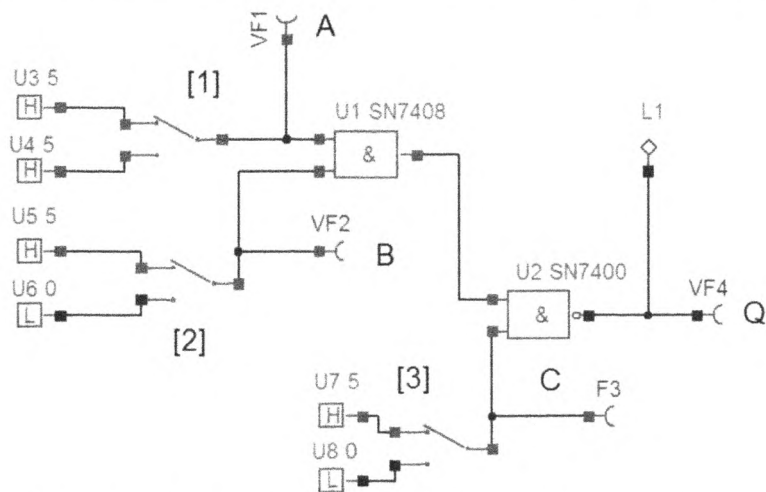


Рис. 14.14. Комбинаторная схема с двумя логическими элементами

Таблица 14.6

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8
DD1	2ИЛИ-НЕ	2И	2И	2И-НЕ	2И-НЕ	2ИЛИ	2ИЛИ	2ИЛИ-НЕ
DD2	2ИЛИ	2ИЛИ	2И-	2ИЛИ	2ИЛИ	2И-НЕ	2И	2И-НЕ

Таблица 14.7

A	B	C	Q
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

5. Создавая все возможные комбинации входных сигналов, в режиме интерактивного анализа — DC регистрировать выходной сигнал и заполнить таблицу истинности комбинаторной схемы (табл. 14.7). Комбинации входных сигналов соответствует значениям трёхзначного двоичного кода.

6. Исследовать дешифратор на микросхеме 74159 (отечественный К155ИД3). Схема эксперимента показана на рис. 14.15. Дешифратор имеет адресные входы A, B, C, D, два входа разрешения G1, G2 и шестнадцать выходов 0–15. На адресные входы подается код в диапазоне 0000–1111.

Создавая все возможные комбинации входных сигналов, в режиме интерактивного анализа (DC) регистрировать выходной сигнал и заполнить таблицу истинности комбинаторной схемы (табл. 14.8) для значений от 0000 до 1111. Комбинации входных сигналов соответствует значениям четырёхзначного двоичного кода.

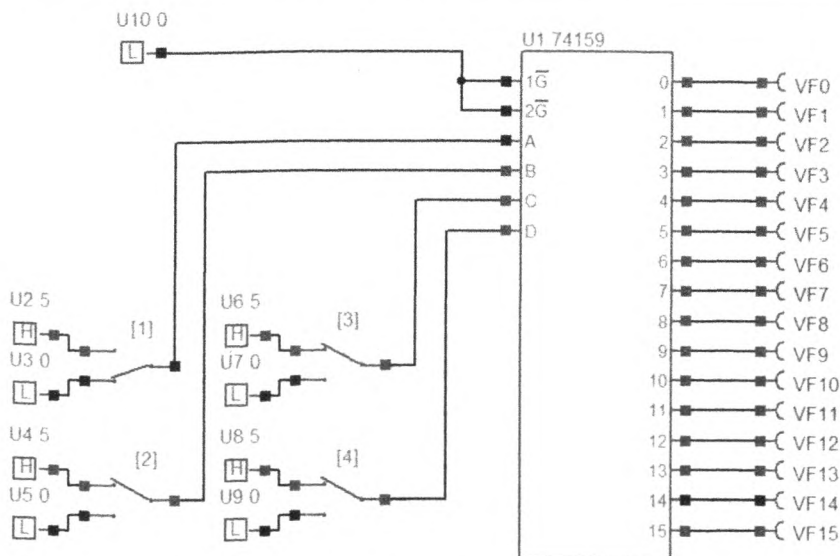


Рис. 14.15. Схема исследования дешифратора

Таблица 14.8

ABCD	Q0	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q14	Q15
0000	0	1	1	1	1	1	1	1			1	1
...												
1111												

Б. Исследование триггерных схем

8. Собрать схему RS-триггера на логических элементах 2ИЛИ-НЕ (рис. 14.16). Ко входам триггера подключаются *High-Low Switches*.

9. Для исследования цифровых схем в интерактивном режиме нажать на кнопку *Digital*. Переключая сигналы на входах R и

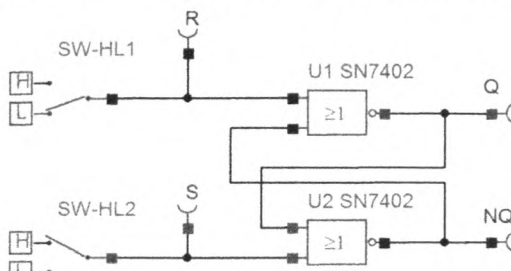


Рис. 14.16. RS-триггер на элементах 2ИЛИ-НЕ

S в соответствии с таблицей переходов RS-триггера 14.9, записать полученные состояния выходных сигналов.

Таблица 14.9

R	S	Q_n	Q_{n+1}
—	0	0	0
0	1		
1	0		
0	—		

Примечание: знаком (—) обозначены безразличные значения входных сигналов.

10. Собрать схему D-триггера (рис. 14.17). Использовать модель триггера D-триггера из панели *Триггеры*.

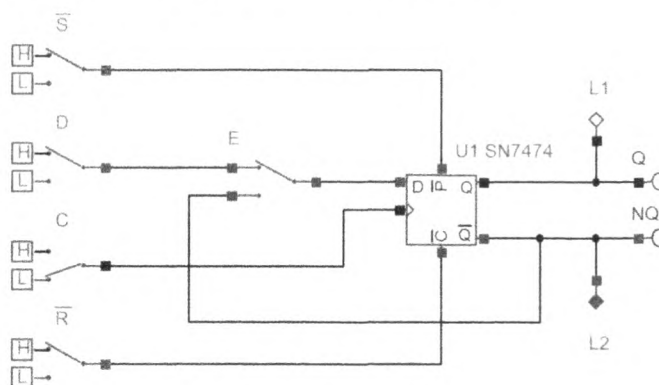


Рис. 14.17. Схема D-триггера

11. Запустить интерактивный режим *Digital*. Поставить ключ E в верхнее положение. Изменяя сигналы на входах \bar{R} , \bar{S} , D и C в соответствии с таблицей переходов 14.10, записать полученные состояния выходных сигналов.

Таблица 14.10

\bar{R}	\bar{S}	D	C	Q_n	Q_{n+1}
1	0	—	—	0	1
0	1	—	—		
1	1	0	⌋		
1	1	1	⌋		

Если входы \bar{R} и \bar{S} находятся в неактивном состоянии ($\bar{R} = \bar{S} = 1$), то по переднему фронту тактовых импульсов на входе C происходит запись в триггер сигнала с входа данных D .

12. Переключить ключ Е в нижнее положение. При этом на вход D -триггера поступает инверсный сигнал с выхода. Установить $\bar{R} = \bar{S} = 1$. Переключая ключ С, убедиться в том, что каждый тактовый импульс передним фронтом переключает триггер в противоположное состояние. При этом D -триггер выполняет деление тактовых импульсов на 2. Такой режим работы D -триггера называют счетным.

13. Собрать схему JK-триггера (рис. 14.18).

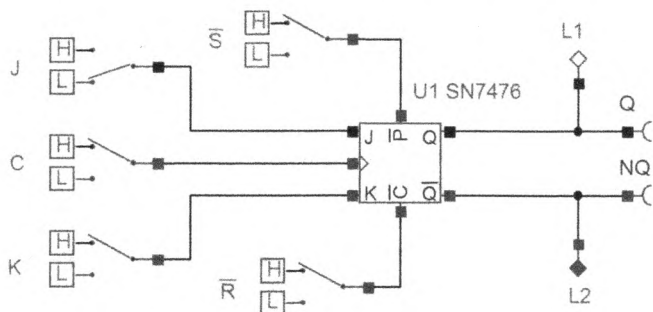


Рис. 14.18. Схема JK-триггера

Изменяя положение ключей, заполнить таблицу переходов JK-триггера 14.11.

Таблица 14.11

\bar{R}	\bar{S}	J	K	C	Q_n	Q_{n+1}
1	0	—	—	—		
0	1	—	—	—		
1	1	1	0]		
1	1	0	1]		
1	1	1	1]		

Обратите внимание на то, что при $\bar{R} = \bar{S} = J = K = 1$ задний фронт каждого тактового импульса переключает JK-триггер в противоположное состояние и триггер работает в счетном режиме. Это основное отличие JK-триггера от RS-триггера.

В. Исследование двоичного счетчика

14. Собрать схему двоичного счетчика на D-триггерах, приведенную на рис. 14.19. На счетный вход можно подавать импульсы от ключа С.

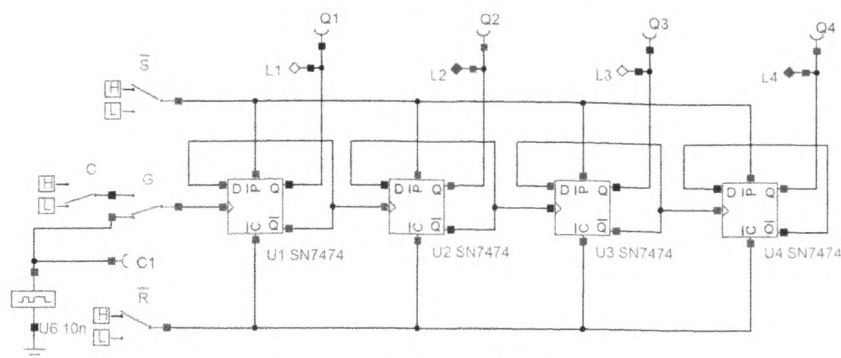


Рис. 14.19. Схема двоичного счетчика на D-триггерах

Запустить интерактивный режим *Digital*. Переключить ключ С в верхнее положение. Ключами \bar{S} и \bar{R} установить нулевые состояния на всех выходах триггеров. После этого переключить ключи \bar{S} и \bar{R} к уровню Н. Многократно переключать ключ С, формируя входные счетные импульсы, регистрировать состояние выходов триггеров. Заполнить табл. 14.12.

Таблица 14.12

N имп.	Q1	Q2	Q3	Q4
0	0	0	0	0
...				
15				

Проверить соответствие двоичных кодов на выходах триггеров номеру счетных импульсов.

16. Ключом G соединить счетный вход счетчика с источником импульсов *Pulse source*. Установить *Время нарастания/спада* =

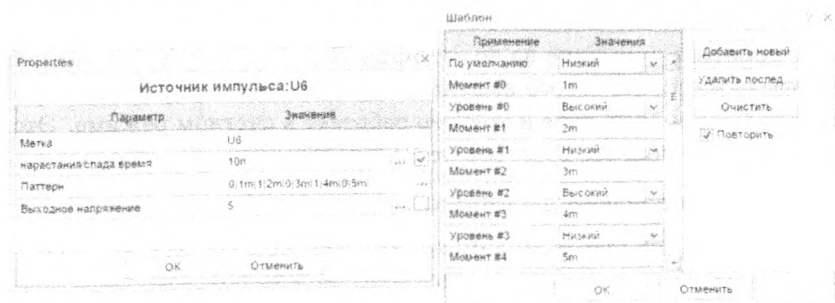


Рис. 14.20. Окна установки параметров источника импульсов

= 10п, Выходное напряжение = 5. Открыть окно *Паттерн* и установить уровни и моменты переключения импульсов в последовательности 1 мс, 2 мс и т.д. до 16 мс (рис. 14.20). Этот шаблон импульсной последовательности можно сохранять и загружать из памяти компьютера.

Выбрать режим *Цифровой*, установить *Время окончания* = 40 м и получить временные диаграммы входных импульсов и сигналов на выходах счетчика (рис. 14.21).

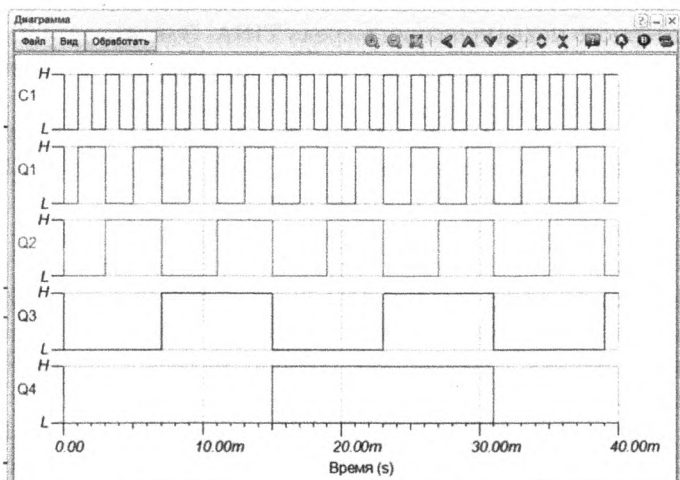


Рис. 14.21. Временные диаграммы двоичного счетчика

Домашнее задание

1. Нарисовать все схемы исследованных логических элементов. Записать логические выражения, таблицы истинности, полученные экспериментально, и проверить их взаимное соответствие.
2. Нарисовать исследованную в пп. 4 и 5 комбинационную схему, записать табл. истинности и логическое выражение.
3. Описать принцип работы и методику исследования дешифратора на микросхеме 74159.
4. Нарисовать все исследованные схемы триггеров, объяснить назначение входов, принцип работы, составить логические уравнения функционирования, построить экспериментальные таблицы переходов и проверить их соответствие уравнениям функционирования.
5. Нарисовать схему исследованного двоичного счетчика, описать принцип работы и методику исследования, построить осциллограммы выходных сигналов.

Литература

1. Алехин В.А. Электротехника и электроника. Компьютерный лабораторный практикум в программной среде TINA-8. Учебное пособие. — М.: Горячая линия — Телеком, 2014. — 208 с.
2. Алехин В.А. Электротехника. Курс лекций с использованием компьютерного моделирования в среде TINA. Электронное издание. Номер гос. регистрации 0321401007. 2014. — 300 с. <http://www.toe-mirea.ru/disc.html>
3. Алехин В.А. Электроника и схемотехника. Курс лекций с использованием моделирования в среде TINA. — М: МИРЭА, 2016. — 338 с. <http://www.toe-mirea.ru/disc.html>
4. TINACloud. URL: <http://www.tinacloud.com>
5. Алехин В.А., Колтаи М. Применение облачной среды схемотехнического проектирования TINACloud в образовании // Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в жизни современного общества», сборник научных трудов. — Тамбов, 31 марта 2016.
6. Алехин В.А., Вебик А.О., Бондарев Д.А., Волосных Г.В., Салов К.С. Создание и испытание компьютерного лабораторного практикума по электротехнике в облачной среде TINACloud // Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в жизни современного общества», сборник научных трудов. — Тамбов, 31 марта 2016.
7. Алехин В.А., Вебик А.О., Бондарев Д. А., Волосных Г.В., Салов К.С. Применение облачной среды TINACloud для моделирования электронных схем // Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в жизни современного общества», сборник научных трудов. — Тамбов, 31 марта 2016.
8. Алехин В.А. Расчёт электрических цепей в MATHCAD. — М.: МИРЭА, 2006. — 48 с.

Содержание

Введение	3
В.1. Облачная технология TINACloud в электротехническом образовании	3
В.2. Указания по выполнению и защите лабораторных работ	5
В.3. Основные сведения о программе TINACloud	6
В.3.1. Общая характеристика среды	6
В.3.2. Требования к аппаратным и программным средствам для работы с TINACloud	7
В.3.3. Интерфейс программы	8
В.3.4. Размещение компонентов	10
В.3.5. Соединение компонентов	11
В.3.6. Входы и выходы	12
В.3.7. Основные режимы работы TINACloud	12
Часть I. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	15
Глава 1. Линейные электрические цепи	15
1.1. Элементы, структура и основные законы электрических цепей	15
1.2. Расчёт цепи методом контурных токов (МКТ)	17
1.3. Расчёт методом узловых напряжений (МУН)	18
1.4. Делитель напряжения	20
1.5. Делитель токов	21
1.6. Баланс мощности	21
1.7. Метод эквивалентного генератора, согласование нагрузки с генератором	21
1.8. Вопросы для самопроверки и задания для подготовки к лабораторной работе	26
1.9. Лабораторная работа № 1. Исследование линейной электрической цепи постоянного тока	27
Глава 2. Электрические цепи переменного тока	31
2.1. Символический метод расчёта	31
2.2. Мощность в цепи гармонического тока	32
2.3. Расчёт цепи методом двух узлов	33
2.4. Расчёт спектра Фурье	39
2.5. Вопросы для самопроверки и подготовки	41

2.6. Лабораторная работа № 2. Исследование цепей переменного тока	42
Глава 3. Электрические цепи с магнитно-связанными катушками	49
3.1. Краткие теоретические сведения и расчёт неразветвленных цепей	49
3.2. Составление уравнений для сложных цепей с магнитными связями	51
3.3. Развязка магнитно-связанных цепей	53
3.4. Линейный трансформатор	55
3.5. Энергетические соотношения в трансформаторе	57
3.6. Определение параметров магнитно-связанных катушек	58
3.7. Измерение сопротивления магнитной связи	58
3.8. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	59
3.9. Лабораторная работа № 3. Исследование электрических цепей, содержащих магнитно-связанные катушки	59
Глава 4. Линейные пассивные четырёхполюсники	63
4.1. Краткие теоретические сведения	63
4.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	67
4.3. Лабораторная работа № 4. Исследование четырёхполюсника	68
Глава 5. Переходные процессы в линейных электрических цепях	73
5.1. Законы коммутации	73
5.2. Классический метод расчёта переходных процессов	75
5.3. Операторный метод расчёта переходных процессов	78
5.4. Включение гармонической ЭДС в RLC -цепь	82
5.5. Дифференцирующие и интегрирующие цепи	84
5.6. Переходные и импульсные характеристики	85
5.7. Вопросы для самопроверки и задания для подготовки к лабораторной работе	86
5.8. Лабораторная работа №5 Исследование переходных процессов в цепях с сосредоточенными параметрами R, L, C	86
Глава 6. Трёхфазные электрические цепи	92
6.1. Краткие теоретические сведения и методы расчёта	92
6.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	94
6.3. Лабораторная работа № 6. Исследование трёхфазных электрических цепей	95

Часть II. ЭЛЕКТРОНИКА.....	100
Глава 7. Исследование полупроводниковых диодов, стабилитронов и тиристоров.....	100
7.1. Теоретические сведения	100
7.2. Лабораторная работа № 7. Исследование полупроводниковых диодов, стабилитронов и тиристоров.....	104
Глава 8. Нелинейные цепи постоянного тока.....	112
8.1. Краткие теоретические сведения и методы расчёта нелинейных цепей постоянного тока	112
8.2. Вопросы для самопроверки и задания для подготовки к лабораторной работе	116
8.3. Лабораторная работа № 8. Исследование нелинейных электрических цепей постоянного тока	116
Глава 9. Выпрямители на полупроводниковых диодах	122
9.1. Краткое теоретическое введение. Выпрямление переменного тока	122
9.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	126
9.3. Лабораторная работа № 9. Исследование выпрямителей на полупроводниковых диодах.....	126
Глава 10. Исследование характеристик биполярного транзистора и усилителя на биполярном транзисторе	132
10.1. Теоретические сведения	132
10.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе.....	137
10.3. Лабораторная работа №10 Исследование характеристик биполярного транзистора и усилителя на биполярном транзисторе	138
Глава 11. Исследование характеристик полевого транзистора и усилителя на полевом транзисторе	147
11.1. Теоретическое введение	147
11.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	152
11.3. Лабораторная работа №11. Исследование характеристик полевого транзистора и усилителей на полевом транзисторе	153
Глава 12. Электрические цепи с операционными усилителями .	162
12.1. Теоретическое введение Операционные усилители в цепях постоянного и переменного тока	162

12.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	167
12.3. Лабораторная работа № 12. Электрические цепи с операционными усилителями	168
<i>Глава 13. Автогенераторы гармонических колебаний</i>	<i>182</i>
13.1. Теоретическое введение	182
13.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	188
13.3. Лабораторная работа № 13. Исследование автогенератора гармонических колебаний	189
<i>Глава 14. Цифровые микросхемы</i>	<i>195</i>
14.1. Краткие теоретические сведения. Цифровые логические элементы	195
14.2. Вопросы для самопроверки и подготовки к лабораторной работе	204
14.3. Лабораторная работа № 14. Исследование цифровых микросхем	204
Литература	212



Алехин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Московского технологического университета (МИРЭА). Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации. Автор более 150 научных работ и 70 учебных и учебно-методических пособий по электротехнике и электронике, 55 изобретений, имеет 4 патента.

Область научных и профессиональных интересов – электрооптические системы отображения и регистрации информации, термопечатающие устройства, видеопринтеры; разработка нового учебно-лабораторного оборудования.

Изложены основные разделы дисциплины «Электротехника, электроника и схемотехника». Приведено описание четырнадцати лабораторных работ. Каждая работа сопровождается теоретическим материалом в форме конспективного изложения основных разделов лекций, примерами расчетов и моделирования электрических цепей и электронных схем, расчетными домашними заданиями по обработке экспериментальных результатов. Компьютерный лабораторный практикум построен на базе новой облачной среды схемотехнического проектирования TINACloud компании DesignSoft, подключение пользователя к которой происходит через Интернет в любом месте и в любое время без установки программы на собственном устройстве с использованием как настольного компьютера, так и различных мобильных устройств (ноутбуков, планшетов, смартфонов). Практикум предназначен для формирования навыков, умений и компетенций в расчетах и экспериментальных исследованиях электрических цепей и электронных схем. Пособие может быть использовано как при традиционных, так и дистанционных технологиях обучения студентов.

Сайт издательства:

www.techbook.ru

ISBN 978-5-9912-0631-0



9 785991 206310