Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра твердотельной электроники

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВ РАДИОТЕХНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») всех форм обучения



Воронеж 2023

УДК 621.396.6(075.8) ББК 3844-02я73

Составитель канд. техн. наук Т. В. Свистова

Физические основы устройств радиотехники и микроэлектроники: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т. В. Свистова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. 47 с.

Методические указания содержат описание лабораторных работ по дисциплине «Физические основы устройств радиотехники и микроэлектроники» с применением электронной лаборатории Electronics Workbench. К каждой работе приведены подробные методические указания по проведению виртуальных экспериментальных исследований устройств радиотехники и микроэлектроники на основе их имитационного моделирования. Приведены вопросы для самопроверки и библиографический список.

Предназначены для студентов третьего курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Свистова_ФОУРТиМЭ_Му_лаб_раб.pdf.

Ил. 52. Табл. 8. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.396.6(075.8) ББК 3844-02я73

Рецензент – Н. Н. Кошелева, канд. техн. наук, доц. кафедры твердотельной электроники ВГТУ

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

КРАТКОЕ ЗНАКОМСТВО С ПРОГРАММОЙ ELEKTRONICS WORKBENCH

Цель работы: изучить правила работы с электронной лабораторией Elektronics Workbench (EWB).

Краткие теоретические сведения

Программа электронной лаборатории Elektronics Workbench (EWB) предназначена для схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых устройств различного назначения с возможностью расчета различного рода параметров и характеристик смоделированных схем.

Знакомство с программой следует начать с изучения рабочего окна. Для этого откройте в вашем компьютере файл с программой Elektronics Workbench. На экране монитора появится рабочее диалоговое окно программы.

Вверху, под строкой названия программы расположена строка меню программы: File, Edit, Circuit, Analysis, Window, Help (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Строка меню программы

Ниже расположена стандартная панель инструментов (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Панель инструментов

Под стандартной панелью расположена строка - панель компонентов, которая содержит 14 кнопок (в данной версии программы) (рис. 1.3). Каждая кнопка представляет собой библиотеку компонентов (элементов) схем, контрольно-измерительных приборов, инструментов и т.д. Например, кнопка **Basic** - основные пассивные элементы.

В правом верхнем углу на уровне двух последних строк находятся кнопки 0, 1 и Pause. Кнопки 0, 1 предназначены для запуска модели электрической схемы. Под запуском модели понимается включение источников сигналов и контрольно-измерительных приборов. Кнопка Pause служит для временной остановки моделирования.

Основную часть экрана занимает рабочее поле, на котором собираются исследуемые схемы.



Рис. 1.3. Панель компонентов

Интерфейс EWB подобен реальному рабочему месту разработчика электронных схем. Самая большая центральная область - рабочее пространство (Workspace) - место для сборки и тестирования схем. Над рабочим пространством находятся меню программы и панель компонентов, включающая в себя иконки приборов и переключатель питания.

Итак, для операций с компонентами на общем поле EWB выделены две области: панель компонентов и поле компонентов.

Панель компонентов состоит из пиктограмм полей компонентов, поле компонентов - из условных изображений компонентов.

В библиотеки элементов программы EWB входят аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые компоненты.

Все компоненты можно условно разбить на следующие группы:

- базовые компоненты;
- источники;
- линейные компоненты;
- ключи;
- нелинейные компоненты;
- индикаторы;
- логические компоненты;
- узлы комбинационного типа;
- узлы последовательного типа;
- гибридные компоненты.

1. Знакомство с библиотеками некоторых компонентов, изображенных на рис. 1.4 – 1.7.

Нажмите курсором мыши на кнопку **Sources** - источники тока и напряжения. Откроется библиотека источников тока и напряжения (рис. 1.4).

Откройте библиотеку **Basic** - основные пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивностей и т.д.) (рис. 1.5). На каждой кнопке показано условное изображение элемента схемы.

Откройте библиотеку Indicators – индикаторные приборы (рис. 1.6).

Откройте библиотеку Instruments – измерительные приборы (рис. 1.7).

Кратко сформулируйте и запишите в отчет правила нахождения нужных для создания модели пассивных элементов, индикаторных приборов, измерительных приборов.



Рис. 1.4. Библиотека Sources источников тока и напряжения



Рис. 1.5. Библиотека **Basic** основных пассивных элементов



Рис. 1.6. Библиотека Indicators индикаторных приборов



Рис. 1.7. Библиотека Instruments измерительных приборов

2. Создание принципиальной схемы цепи.

Прежде чем создавать чертеж схемы средствами данной программы, необходимо на бумаге подготовить его эскиз с примерным расположением компонентов (элементов или приборов) и их буквенными обозначениями. Технологию процесса создания схемы можно разбить на ряд этапов.

2.1. Размещение изображений элементов и приборов на рабочем поле. Проведение различных действий с компонентами.

Чтобы разместить на рабочем поле нужные для работы компоненты, необходимо развернуть соответствующую панель, щелкнув по ее кнопке левой клавишей мыши, после чего зацепить курсором нужный компонент и переместить его на рабочее поле. При этом он может быть активным (красного цвета).

При формировании электрической схемы возникает необходимость в проведении различных действий над элементами и приборами, например, перемещение их по полю, поворот изображения на 90 ° и т. д.

В этом случае нужно перевести изображение в активную форму щелчком мыши по значку элемента. При этом оно станет красным. В таком состоянии можно проводить различные действия с элементом.

Перемещение производится нажатием левой клавиши мыши на изображении компонента и перемещении значка по полю при нажатой клавише. Поворот элемента на 90 ° производится щелчком мыши по кнопке **Rotate**, находящейся на панели инструментов (см. рис. 1.2).

Удаление элемента производится стандартным способом - нажатием кнопки «ножницы» на панели инструментов (рис. 1.2).

Разместите на поле элементы и приборы, показанные на рис. 1.8. Удалите изображения источника переменного тока, емкости и индуктивности, разверните два сопротивления на 90 ° и разместите элементы так, как показано на рис. 1.9.



Рис. 1.8. Элементы и приборы схемы



Рис. 1.9. Пример подготовки элементов для создания модели

2.2. Установка параметров элемента и технических характеристик измерительного прибора. Установка нужного параметра элемента или технических характеристик прибора производится в диалоговом окне, которое открывается двойным щелчком по значку компонента. В раскрывшемся окне устанавливают требуемые параметры (сопротивление резистора, емкость конденсатора, эдс источника, режимы работы прибора и т.д.). Выбор параметра элемента нужно подтвердить нажатием кнопки **ОК**, находящейся обычно внизу в диалоговом окне.

Задайте численные значения сопротивлений элементов и эдс источника напряжения: R1 = 1 k Ω (кОм), R2 = 1 k Ω (кОм), R3 = 500 Ω (Ом), E = 2 V (B). Результат выполнения этого упражнения показан на рис 1.10.



Рис. 1.10. Пример задания параметров элементов

Вольтметр и амперметр, размещенные на рабочем поле, характеризуются двумя параметрами: видом, напряжения и тока (Mode - режим, работы) и входным сопротивлением (Resistance R). В режиме DC они позволяют измерять постоянные напряжение и ток. В режиме AC - действующие значения гармонических напряжения и тока. Отрицательная клемма для подключения этих приборов обозначена широкой черной полосой и может быть размещена на любой грани изображения прибора (рис. 1.11) при вращении изображения компонента (вращение может быть выполнено также нажатием комбинации клавиш Ctrl+R.



Рис. 1.11. Полярность выводов амперметра и вольтметра

Входное сопротивление вольтметра обычно выбирают значительно больше сопротивления, к которому подключают вольтметр. Например, если точность измерения достаточна в 1 %, то в 100 раз больше. Входное сопротивление амперметра обычно выбирают значительно меньше сопротивления ветви, в которую включают амперметр, например, в 100 раз с точностью измерения в 1 %.

Для установки параметров приборов надо открыть окно установки параметров прибора - щелкнуть дважды на его изображении. В открывшемся окне установить нужные параметры и нажать **ОК**.

Установите параметры вольтметра и амперметра: режим **DC** входные сопротивления $R_V = 10$ MOM, $R_I = 1$ нОм.

Сформулируйте и запишите правила установки параметров элементов схемы и технических характеристик индикаторных приборов.

2.3. Соединение элементов между собой линиями - проводниками.

Соединение компонентов между собой проводниками (соединительными линиями) производится в соответствии с заданным эскизом схемы. Курсор мыши подвести к выводу компонента и, после появления круглой площадки черного цвета («узла»), нажать левую кнопку мыши. Курсор мыши переместить к выводу другого компонента, не отпуская клавиши. При этом появится линия

(проводник). Если соединение произошло, то на этом выводе также появится «узел». Отпустить клавишу мыши, площадка исчезнет.

При соединении компонентов между собой соединительная линия может приобрести ступенчатую форму и, кроме того, могут появиться лишние пересечения. Это можно исправить: подвести курсор к проводнику, нажать клавишу мыши и после появления двойной стрелки переместить его в нужном направлении. Можно исправлять форму проводников, перемещая узел, находящийся в активном состоянии, клавишами управления курсором. Эту операцию можно проводить многократно. При коррекции изображения схемы можно перемещать не только проводники, но и компоненты. Коррекцию следует проводить до тех пор, пока не исчезнут лишние изломы и пересечения проводников. Если коррекция не удается, то можно удалить узел и сделать соединение снова.

Для удаления соединительной линии (проводника), нужно подвести курсор к выводу одного из элементов так, чтобы появилась круглая площадка. Захватить ее мышью и отвести в сторону от элемента. Отпустить клавишу, и линия исчезнет.

Соедините компоненты схемы проводниками и откорректируйте конфигурацию проводников, как показано на рис. 1.12.

Подведите курсор к верхнему выводу источника эдс и щелкните мышью. Не отпуская клавиши, переместите курсор к левому выводу резистора R1 и осуществите соединение.

Соедините остальные элементы между собой Нанесите внешние клеммы – «узлы» источника сигнала и вольтметра. Измените (если это необходимо конфигурацию проводников и расположение компонентов в соответствии с рис. 1.12.

Запишите правила соединения элементов проводниками и правила изменения конфигурации проводников.



Рис. 1.12. Пример электрической схемы

2.4. Запуск модели.

Включение измерительных приборов и процесса измерения производится щелчком по кнопке запуска моделирования (0 или 1).

Произведите измерение величин тока через резистор R1 и напряжения на R3. Амперметр должен показать величину тока I = 1,5 мA, а вольтметр и напряжение U = 500 мB.

Измените значение сопротивления резистора: R1 = 4 кОм и повторите измерения I и U. Для этого остановите процесс измерения кнопкой **Pause** - временная остановка моделирования. Откройте диалоговое окно резистора R1 и измените величину сопротивления. Запустите модель вторичным нажатием кнопки **Pause.** Результаты измерений изменятся: I = - 461,5 мкA, U = 153,8 мВ. Запишите правила запуска модели и измерения токов и напряжений по показаниям индикаторных приборов.

3. Работа с осциллографм.

Перевести на рабочий стол осциллограф, для чего зацепить мышью его изображение в библиотеке **Instruments** измерительных приборов (рис. 1.7) и не отпуская левую клавишу мыши переместить изображение осциллографа в нужное место рабочего стола.

Развернуть переднюю панель осциллографа (рис. 1.13) на рабочем столе. Для этого дважды щелкнуть мышью на изображении осциллографа.



Рис. 1.13. Вид нормальной панели осциллографа Electronics Workbench

Осциллограф имеет два канала (Channel) А и В с раздельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5 кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения изображения по вертикали (Y Postion). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок AC, 0, DC. Режим AC предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (этот режим еще называют режимом «закрытого входа», поскольку в этом режиме на входе усилителя включается разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую). В режиме 0 входной зажим замыкается на землю. В режиме DC (включен по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим называют также режимом "открытого входа", поскольку входной сигнал поступает на вход вертикального усилителя непосредственно. С правой стороны от кнопки DC расположен входной зажим. Режим развертки выбирается кнопками У/Т, В/А и А/В. В режиме Ү/Т (обычный режим, включен по умолчанию) реализуется по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время. Остальные режимы в работе не используются, и они не рассматриваются здесь.

В режиме развертки Y/T длительность развертки (**Time base**) может быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел (ns/div) до 1 с/дел (s/div) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т.е. по оси X (**X Position**).

Предусмотрены четыре режима запуска развертки (**Edge**) кнопками AU-TO - от канала A или B, A - от канала A, B – от канала B и EXT – от внешнего источника по переднему или заднему фронту запускающего сигнала – кнопки *✓* и *✓* при регулируемом уровне запуска (**Level**). Внешний источник для синхронизации развертки подключается к зажиму в блоке (**Trigger**).

Заземление осциллографа осуществляется с помощью клеммы **Ground** в правом верхнем углу прибора.

При нажатии кнопки **Expand** лицевая панель осциллографа существенно меняется – увеличивается размер экрана, появляется возможность прокрутки изображения по горизонтали и его сканирования с помощью вертикальных визирных линий (синего и красного цвета), которые за треугольные ушки (они также обозначены цифрами 1 и 2) могут быть курсором установлены в любое место экрана. При этом в индикаторных окошках под экраном приводятся результаты измерения напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями). Так, в левом окошке получаем T1, VA1 и VB1 – результаты измерений в точке, где находится красная визирная линия, в среднем окошке соответственно имеем T2, VA2 и VB2 – результаты измерений в точке нахождения синей визирной линии и, наконец, в правом окошке – T2-T1, VA2-VA1 и VB2-VB1. Вид расширенной панели осциллографа показан на рис. 1.14.

Возврат осциллографа к исходному состоянию осуществляется нажатием кнопки **Reduce**.



Рис. 1.14. Расширенная панель осциллографа

4. Моделирование интегрирующей RC – цепи

Для начала разработки необходимо загрузить файл-схему в среду Electronics Workbench, если этот файл уже создан и находится на одном из накопителей компьютера. Это делается посредством выполнения команды меню File/Open либо нажатием на соответствующей «горячей кнопке» на панели инструментов и дальнейшим выбором накопителя, каталога, и имени файла. Если же файл еще не создан необходимо создать его посредством выполнения команды **File/New** и команды **File/Save as**. При выполнении первой команды будет создан новый файл-схема и в случае если какая-либо схема уже загружена в Electronics Workbench, пользователю будет предложено сохранить предыдущую схему. Вторая команда предназначена для записи файла на накопитель и установки каталога и имени, под которым будет храниться данная схема.

Далее нужно нанести на рабочую область Electronics Workbench модели деталей необходимые для моделирования данной схемы. В данном случае необходимы: источник импульсов (Function Generator), резистор (Resistor), конденсатор (Capacitor), осциллограф (Oscilloscope) и заземление (Ground). Резистор и конденсатор находятся в наборе Basics, заземление - в наборе Sources, осциллограф и генератор импульсов - в наборе Instruments.

Каждый элемент имеет точки соединения, которые нужно соединить для получения нужной схемы. Это делается выбором контакта левой кнопкой мыши и переносом ее к другому контакту, при этом создается провод, соединяющий их. При необходимости на провод можно нанести узел (Connector в наборе **Basics**). Затем для наглядности можно перенести элементы в необходимые места рабочей области. Это действие также осуществляется нажатием на элементе левой кнопкой мыши и переносом при удержанной в нажатом состоянии кнопке. При этом соединительные провода будут перемещены автоматически. При необходимости провода можно также перемещать. На рис. 1.15 представлен вид интерфейса Electronics Workbench после сборки RC – цепи.



Рис. 1.15. RC-цепь в Electronics Workbench

Когда схема создана и готова к работе для начала имитации процесса работы необходимо выполнить команду меню щелкнуть кнопку включения питания на панели инструментов. Данное действие приведет в рабочее состояние схему и в одном из окон строки состояния будет показываться время работы схемы, которое не соответствует реальному и зависит от скорости процессора и системы персонального компьютера.

Прервать имитацию можно двумя способами. Если вы закончили работу и просмотр результатов имитации можно повторно щелкнуть переключатель питания. Если же нужно временно прервать работу схемы, например, для детального рассмотрения осциллограммы, а затем продолжить работу можно воспользоваться кнопкой Pause, которая также расположена на панели инструментов. Возможность приостановки процесса также является большим достоинством по сравнению с традиционным тестированием радиоэлектронных устройств.

Теперь, для произведения анализа имитации можно изменять номиналы элементов, выводить и настраивать терминалы приборов. В данном случае можно просмотреть осциллограмму на выходе RC-цепи. Для этого нужно вывести окно терминала осциллографа двойным нажатием на компоненте Oscilloscope. Вид панели осциллографа представлен на рис. 1.13. При использовании осциллографа в Electronics Workbench есть возможность просмотра сигнала на протяжении всего времени имитации. Для этого можно воспользоваться кнопкой Expand и воспользоваться полосами прокрутки изображения, чтобы перевести панель в нормальный режим используется кнопка Reduce.

Теперь для изучения свойств RC-цепи можно изменить сигнал на ее входе. Для этого нужно вывести при помощи двойного нажатия кнопкой мыши на компоненте на экран панель генератора импульсов. Ее вид представлен на рис. 1.16.

\sim	\sim	
Frequency	10	Hz 🖨
Duty cycle	50	%
Amplitude	10	V
Offset	0	
	Common	-





Рис. 1.17. Сигнал на выходе интегрирующей RC – цепи

При помощи генератора импульсов можно формировать три вида сигналов: синусоидальный, пилообразный и прямоугольный. В данном случае для анализа нужен прямоугольный импульс. Для перевода генератора в нужный режим требуется нажать соответствующую кнопку на панели. Также можно изменить другие параметры – частоту и амплитуду сигнала.

Перед изменением каких-либо параметров следует отключать источники питания схемы, иначе возможно получение неверных результатов.

Выходной сигнал интегрирующей цепи показан на рис. 1.17.

Для того, чтобы изменить какие-либо параметры элементов схемы нужно дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на нужном элементе, при этом будет выведено окно свойств элемента. Пример такого окна приведен на рис. 1.18.

Кроме анализа прямого наблюдения за терминалами инструментов Electronics Workbench позволяет выполнить дополнительные виды анализа. В качестве примера для данной схемы можно привести получение АЧХ и ФЧХ схемы как четырехполюсника. Т.е. при расчете на вход схемы будет подаваться сигнал различной частоты и будет произведен анализ зависимости вида выходного сигнала от входного. При этом нужно будет задать начальную и конечную частоты, на которых будет произведен анализ. Для проведения этого анализа нужно остановить работу цепи, т.е. воспользоваться переключателем питания или кнопкой **Pause** и выполнить команду меню **Analysis / AC Frequency**. Перед расчетом будет выведено окно параметров анализа. Вид этого окна приведен на рис. 1.19.



Рис. 1.18. Окно параметров резистора

Start frequency (FSTART) End frequency (FSTOP)	10 Hz	Accept
Sweep type	Decade	Cance
Vertical scale	Log V	
Nodes in circuit	Nodes for analysis	

Рис. 1.19. Параметры анализа AC Frequency

При необходимости можно изменить некоторые из параметров: Start frequency (начальная частота), End frequency (конечная частота), Sweep type (тип горизонтальной оси на конечном графике), Number of points (количество точек анализа). В данном случае удобно установить количество исследуемых точек равным 1000 для получения более гладкого графика, тип горизонтальной оси – логарифмическим и диапазон частот от 1 Гц до 100 КГц.

Для получения графиков АЧХ и ФЧХ нужно нажать кнопку **Simulate** в окне параметров анализа, после чего будет выведено окно результатов, представленное на рис. 1.20.

Указания по оформлению отчета по работе

Отчет должен содержать:

- цель работы;

- выполнение заданий п. п.1 – 4 (правила создания на рабочем поле электрической схемы: размещения элементов, их соединения между собой, установки их параметров и характеристик приборов);

- отчет о работе с осциллографом;

- результаты моделирование интегрирующей RC цепи;
- выполнение индивидуальных заданий.



Рис. 1.20. АЧХ и ФЧХ интегрирующей RC - цепи

Контрольные вопросы

1. Как найти в библиотеках нужный компонент? В какой библиотеке находятся резисторы; конденсаторы, индуктивные катушки?

2. Где находятся индикаторные, приборы?

3. Где находятся измерительные приборы?

4. Как разместить изображения элементов и приборов на рабочем поле?

5. Как произвести перемещение изображения элементов по рабочему полю, их поворот на 90°, удаление?

6. Как задать численные значения сопротивлений, конденсаторов, индуктивных катушек, эдс источника напряжения?

7. Как установить параметры вольтметра и амперметра?

8. Как соединить элементы схемы между собой проводниками?

9. Как производится запуск модели? Как остановить процесс моделирования?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С *R*, *L* И *C*. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: изучить взаимосвязь гармонических токов и напряжений в пассивных элементах цепи и их последовательном соединении; исследовать резонансный режим.

Используемое оборудование и материалы: амперметр, вольтметры, источник переменной эдс, источник переменного тока, боде-плоттер (графопостроитель), резистор, индуктивность, ёмкость.

Краткие теоретические сведения

Рассмотрим последовательную *RLC*-цепь (рис. 2.1, а), находящуюся под гармоническим воздействием, комплексная схема замещения которой приведена на рис. 2.1, б.



Рис. 2.1. Схемы и векторные диаграммы сопротивлений последовательной *RLC*-цепи

Используя законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, составим систему уравнений электрического равновесия цепи:

$$\begin{split} \dot{U} &= \dot{U}_{R} + \dot{U}_{L} + \dot{U}_{C}; \ \dot{U}_{L} &= Z_{L}\dot{I}_{L}; \\ \dot{I} &= \dot{I}_{R} = \dot{I}_{L} = \dot{I}_{C}; \ \dot{U}_{C} = Z_{C}\dot{I}_{C}; \\ \dot{U}_{R} &= Z_{R}\dot{I}_{R}, \end{split}$$
(2.1)

где $Z_R = R$; $Z_L = j\omega L$; $Z_C = 1/(j\omega C)$ - комплексные сопротивления входящих в цепь идеализированных элементов. Решая систему (2.1) относительно тока \dot{I} , получаем

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{(Z_R + Z_L + Z_C)} = \dot{U}/\dot{Z}.$$
(2.2)

Комплексное входное сопротивление Z последовательной *RLC*-цепи равно сумме комплексных сопротивлений входящих в цепь элементов и определяется только параметрами входящих в цепь элементов и частотой внешнего воздействия (рис. 2.1, в):

$$Z = Z_{R} + Z_{L} + Z_{C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}).$$
 (2.3)

Переходя от алгебраической формы записи Z к показательной, находим модуль и аргумент комплексного входного сопротивления:

$$z = \sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{(\omega C)}\right]^2}; \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{(\omega C)}}{R}.$$
 (2.4)

Из выражений (2.4) следует, что характер входного сопротивления цепи зависит от соотношения между мнимыми составляющими комплексного входного сопротивления емкости $X_{\rm C} = -1/(\omega C)$ и индуктивности $X_{\rm L} = \omega L$. При $X_{\rm L} > |X_{\rm C}|$ входное сопротивление цепи имеет резистивно-индуктивный характер (0 $< \varphi < \pi/2$). Векторная диаграмма, построенная на основании уравнения (2.3) и иллюстрирующая данный случай, представлена на рис. 2.1, г (для большей наглядности векторы $Z_{\rm L}$ и $Z_{\rm C}$ изображены немного смещенными один относительно другого). Если $X_{\rm L} < |X_{\rm C}|$, то входное сопротивление цепи имеет резистивно-емкостный характер (- $\pi/2 < \varphi < 0$) (рис. 2.1, д). При $X_{\rm L} = |X_{\rm C}|$ мнимые составляющие входного сопротивления емкости $X_{\rm C}$ и индуктивности $X_{\rm L}$ взаимно компенсируются и входное сопротивление цепи имеет чисто резистивный характер ($\varphi = 0$) (рис. 2.1, е).

Используя уравнение (2.2), можно по известному напряжению, приложенному к внешним зажимам цепи, найти ток, и наоборот. Векторные диаграммы тока и напряжений цепи, соответствующие различным соотношениям между мнимыми составляющими комплексного сопротивления емкости $X_{\rm C}$ и индуктивности $X_{\rm L}$, приведены на рис. 2.2. Вектор $\dot{U}_R = R\dot{I}$, изображающий напряжение на сопротивлении, совпадает по направлению с вектором \dot{I} ; вектор $\dot{U}_L = jX_L\dot{I} = j\omega L\dot{I}$ повернут относительно \dot{I} на 90 ° против часовой стрелки; вектор $\dot{U}_C = jX_C\dot{I} = -j\dot{I}/(\omega C)$ направлен противоположно вектору \dot{U}_L . При $X_{\rm L}$ > $|X_{\rm C}|$ (рис. 2.2, а) вектор \dot{U}_L . + \dot{U}_C . совпадает по направлению с вектором \dot{U}_L , ток цепи отстает по фазе от напряжения ($\varphi > 0$). При $X_L < |X_C|$, (рис. 2.2, б) вектор \dot{U}_L . + \dot{U}_C совпадает по направлению с вектором \dot{U}_C , ток цепи опережает по фазе напряжение ($\varphi < 0$). Если $X_L = |X_C|$ (рис. 2.2, в), то. вектор $\dot{U}_L + \dot{U}_C = 0$, напряжение на зажимах цепи \dot{U} равно напряжению на сопротивлении \dot{U}_R , ток цепи совпадает по фазе с приложенным напряжением ($\varphi = 0$)/



Рис. 2.2. Векторные диаграммы тока и напряжений последовательной *RLC*-цепи

Порядок выполнения работы

1. Исследование схемы последовательного соединения цепи переменного тока с помощью графопостроителя.

1.1. На рабочем поле собрать схему последовательного соединения с источником тока частотой 50 Гц (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Схема последовательного соединения цепи переменного тока с *R*, *L* и *C* -элементами

1.2. Из таблицы вариантов (табл. 2.1.) задать параметры элементов схемы согласно варианту.

	Парамстры элементов слемы																			
Вариант	1	11	2	12	3	13	4	14	5	15	6	16	7	17	8	18	9	19	10	20
С, мкФ	15	50	6	50	13	30	5	0	18	80	8	0	14	40	11	0	13	30	8	0
L, мГн	1(00	9	0	1	10	12	20	1()5	9	5	11	15	12	25	13	30	8	5
R, Ом	2	0	3	0	1	0	3	0	1	0	1	5	1	0	2	5	2	0	1.	5

Тараметры элементов схемы

Таблица 2.1

1.3. На заданной частоте f вычислить реактивные сопротивления емкости $X_{\rm C}$, индуктивности $X_{\rm L}$ и полное сопротивление Z последовательной *RLC*-цепи. Определить угол сдвига фаз между напряжением и током:

а) сопротивление конденсатора: $X_{\rm C} = 1/(2\pi f C)$, Ом;

б) сопротивление индуктивной катушки: $X_L = 2\pi f L$, Ом;

в) полное сопротивление цепи: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, Ом;

г) угол сдвига фаз определяем по синусу во избежание потери знака угла

$$\sin \varphi = (X_{\rm L} - X_{\rm C}) / Z,$$

$$\varphi = \arcsin (X_{\rm L} - X_{\rm C}) / Z.$$

1.4. Экспериментальная проверка результатов расчёта. Подключить бодеплоттер к схеме последовательного соединения (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Схема последовательного соединения цепи переменного тока с *R*, *L* и *C* –элементами с боде-плоттером

1.5. Включить схему. Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению боде-плоттера включить его увеличенное изображение (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Увеличенное изображение боде-плоттера. Фазо-частотная характеристика

Для получения фазочастотной характеристики (ФЧХ) на верхней панели плоттера включить кнопку PHASE. По вертикальной оси (VERTIKAL) откладывают градусы, - от -720 ° до 720 °. По горизонтальной оси (HORIZONTAL) всегда откладывают частоту в Герцах, - от 1 mHz до 10 GHz.

С помощью стрелок $\leftarrow \rightarrow$ или перетаскиванием мышью подвести вертикальную линию к частоте 50 Гц и снять угол сдвига фаз φ .

Сравнить расчётные данные с показаниями боде-плоттера, сделать вывод.

Исследование схемы последовательного соединения цепи переменного тока с помощью амперметра и вольтметров

1.6. На рабочем поле собрать вторую схему последовательного соединения с источником напряжения 120 В частотой 50 Гц. К этой схеме подключить амперметр и вольтметры (рис. 2.6). Открыв диалоговое окно измерительных приборов (двойным щелчком мыши по изображению прибора) изменить вид измеряемого напряжения (DC заменить на AC).



Рис. 2.6. Исследование схемы последовательного соединения цепи переменного тока с *R*, *L* и *C* – элементами с помощью амперметра и вольтметров

1.7. Из таблицы вариантов (табл. 2.1.) задать параметры элементов схемы согласно варианту. Включить схему. Снять показания приборов и занести их в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерения										
Е, В	U, B	U _C , B	U _L , B	U _R , B	I _C , A	I _L , A	I_R, A			

В данной цепи

$$E = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Сопротивление на индуктивности (п. 1.3):

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, OM$$

Сопротивление на емкости (п. 1.3):

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, O_M$$

Определим по закону Ома ток в резисторе, емкости и катушке:

$$I_{R} = \frac{U_{R}}{R}, A; I_{L} = \frac{U_{L}}{X_{L}}, A; I_{C} = \frac{U_{C}}{X_{C}}, A$$

Должно выполняться равенство $I_R \approx I_L \approx Ic$, т.к. *R*, *C* и *L* соединены последовательно

2. Исследование цепи переменного тока при резонансе напряжений с помощью графопостроителя

2.1. Вернуться к схеме последовательного соединения с источником переменного тока (рис. 2.4), установив частоту источника питания 1 Гц.

2.2. Вычислить резонансную частоту по формуле: $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, Гц.

2.3. Включить схему и увеличенное изображение боде-плоттера (рис. 2.7). Для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) нажать кнопку MAGNITUDE. По вертикальной оси (VERTIKAL) отложить отношение напряжений – в логарифмическом масштабе (LOG) от -200 dB до 200 dB.



Рис. 2.7. Увеличенное изображение боде-плоттера. Амплитудно-частотная характеристика

2.4. С помощью стрелок $\leftarrow \rightarrow$ или перетаскиванием мышью подвести вертикальную линию к максимальному значению амплитуды и снять резонансную частоту f, Гц.

Сравнить расчётные данные с показаниями боде-плоттера. Сделать вывод.

Исследование цепи переменного тока при резонансе напряжений с помощью амперметра и вольтметров

2.5. На схеме последовательного соединения с источником переменного напряжения (рис. 2.6) установить резонансную частоту. Включить схему. Если резонанса напряжений достичь не удалось (см. признаки **резонанса напряжений**: при изучении последовательной *RLC*-цепи, было установлено, что ее входное сопротивление может иметь чисто резистивный характер, когда мнимая составляющая входного сопротивления емкости по абсолютному значению равна мнимой составляющей входного сопротивления индуктивности ($X_L = |X_C|$). В этом случае напряжение на емкости равно по амплитуде и противоположно по фазе напряжению на индуктивности ($\dot{U}_C = -\dot{U}_L$), а напряжение на входе цепи \dot{U} равно напряжению на сопротивлении \dot{U}_R и совпадает по фазе с входным током \dot{I} . Такая разновидность резонанса получила название **резонанса напряжений**), изменяя резонансную частоту, добиться появления резонанса. Снять показания приборов и занести их в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Е, В	I, A	U, B	U _C ,B	U _L , B	U _R , B						

Результаты измерения

Указания по оформлению отчета по работе

Отчет должен содержать:

- цель работы; оборудование и материалы;

- расчетную часть (исходные данные, расчетные формулы с пояснениями, результаты расчетов);

- схемы исследуемых цепей и измерения фазового сдвига;

- таблицы экспериментальных и расчетных результатов (см. форму);

- выводы.

Контрольные вопросы

1. Как определяется ток и напряжения в цепи синусоидального тока с последовательным соединением резистора, индуктивности и ёмкости. Запишите закон Ома в комплексной форме.

2. Какую цепь называют последовательным колебательным контуром?

3. При каком условии в последовательном колебательном контуре наступает резонанс? Почему резонанс в такой цепи называют резонансом напряжений?

4. Как определяется резонансная частота?

5. Что называют характеристическим сопротивлением контура и добротностью контура?

6. Изменением каких величин в последовательном колебательном контуре можно достичь резонанса?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С *R*, *L* И *C*. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Цель работы: изучить взаимосвязь гармонических токов и напряжений в пассивных элементах цепи и их параллельном соединении; исследовать резонансный режим.

Используемое оборудование и материалы: амперметр, вольтметры, источник переменной эдс; источник переменного тока; боде-плоттер (графопостроитель); резистор; индуктивность; ёмкость.

Краткие теоретические сведения

Рассмотрим параллельную *RLC*-цепь (рис. 3.1, а), к зажимам которой приложено напряжение, изменяющееся по гармоническому закону. Комплексная схема замещения цепи, в которой идеализированные двухполюсные элементы представлены их комплексными проводимостями, изображена на рис. 3.1, б.



Рис. 3.1. Схемы и векторные диаграммы проводимостей параллельной *RLC*-цепи

Используя законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, составим систему уравнений электрического равновесия цепи:

$$\dot{I} = \dot{I}_{R} + \dot{I}_{L} + \dot{I}_{C}; \ \dot{I}_{C} = Y_{C} \dot{U}_{C};$$

$$\dot{U} = \dot{U}_{R} = \dot{U}_{L} = \dot{U}_{C}; \ \dot{I}_{L} = Y_{L} \dot{U}_{L};$$

$$\dot{I}_{R} = Y_{R} \dot{U}_{R},$$

(3.1)

где $Y_R = \frac{1}{R}$; $Y_C = j\omega C$; $Y_L = \frac{1}{(j\omega L)}$ - комплексные проводимости вхо-

дящих в цепь идеализированных пассивных элементов.

Решая систему уравнений (3.1) относительно тока I, получаем

$$\dot{I} = (Y_R + Y_L + Y_C)\dot{U} = Y\dot{U},$$
 (3.2)

где $Y = Y_R + Y_L + Y_C$ - комплексная проводимость параллельной *RLC*-цепи, равная сумме комплексных проводимостей, входящих в цепь идеализированных элементов. Далее будет показано, что комплексная проводимость любого участка цепи, состоящего из произвольного числа параллельно включенных ветвей, равна сумме комплексных проводимостей этих ветвей. Комплексная проводимость параллельной *RLC*-цепи, как и комплексная проводимость любой линейной цепи, не зависит от амплитуды (действующего значения) и начальной фазы внешнего воздействия, а определяется только параметрами входящих в цепь элементов и частотой внешнего воздействия:

$$Y = Y_R + Y_L + Y_C = \left(\frac{1}{R}\right) + j\left[\omega C - \frac{1}{\omega L}\right].$$
(3.3)

Переходя от алгебраической формы записи к показательной, находим модуль *у* и аргумент *v* комплексной входной проводимости *RLC* -цепи:

$$y = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left[\omega C - \frac{1}{\omega L}\right]^2}; \ \vartheta = \operatorname{arctg}\left\{R\left[\omega C - \frac{1}{\omega L}\right]\right\}.$$
(3.4)

Анализ выражений (3.4) показывает, что характер входной проводимости, а, следовательно, и характер входного сопротивления параллельной *RLC* –цепи зависят от соотношения между реактивными составляющими входной проводимости емкости $b_C = \omega C$ и индуктивности $b_L = -1/(\omega L)$. Если $b_C > |b_L|$ (рис. 3.1, г), то входная проводимость цепи имеет резистивно-емкостный характер (аргумент комплексной проводимости $\pi/2 > \upsilon > 0$, поэтому аргумент комплексного входного сопротивления φ лежит в пределах - $\pi/2 < \varphi < 0$). При $b_C < |b_L|$ (рис. 3.1, д) входная проводимость цепи имеет резистивно-индуктивный характер, а при $b_C = |b_L|$ (рис. 3.1, е) реактивные составляющие входной проводимости емкости b_C и индуктивности b_L взаимно компенсируются и входная проводимость цепи имеет чисто резистивный (вещественный) характер.

Уравнение (3.2) представляет собой математическую запись закона Ома в комплексной форме для параллельной *RLC*-цепи.

Комплексная схема замещения цепи, соответствующая этому выражению, приведена на рис. 3.1, в. Используя уравнение (3.2), можно по заданному напряжению определить ток через внешние зажимы цепи и, наоборот, по заданному току вычислить приложенное к цепи напряжение.

Векторные диаграммы для токов и напряжения параллельной *RLC*-цепи приведены на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Векторные диаграммы токов и напряжения параллельной *RLC*-цепи при $b_C > |b_L|$ (a), $b_C < |b_L|$ (б) и $b_C < |b_L|$ (в)

Уравнения (3.1), описывающие процессы в параллельной *RLC*-цепи, подобны по структуре уравнениям электрического равновесия ранее рассмотренной последовательной *RLC* -цепи и могут быть получены одно из другого путем замены тока на напряжение, проводимости на сопротивление; емкости на индуктивность. Следовательно, параллельная н последовательная *RLC*-цепи являются дуальными. Векторное диаграммы дуальных цепей также могут быть получены одни из других путем упомянутых замен

Порядок выполнения работы

1. Исследование схемы параллельного соединения цепи переменного тока с помощью графопостроителя

1.1. На рабочем поле собрать схему параллельного соединения с источником тока частотой 50 Гц (рис. 3.3) и схему параллельного соединения с источником напряжения 120 В частотой 50 Гц (рис. 3.4).

1.2. Из таблицы вариантов (табл. 3.1.) задать параметры элементов схемы согласно варианту

Таблица 3.1



Рис. 3.3. Схема параллельного соединения цепи переменного тока с *R*, *L* и *C* – элементами с источником тока

Рис. 3.4. Схема параллельного соединения цепи переменного тока с *R*, *L* и *C* – элементами с источником напряжения

1.3. Определить угол сдвига фаз между напряжением и током:

а) сопротивление конденсатора: $X_{\rm C} = 1/(2\pi f C)$, Ом

б) сопротивление индуктивной катушки: $X_{\rm L} = 2\pi f L$, Ом

- в) входную проводимость *Y*, Ом⁻¹ формуле (3.4)
- г) напряжение в цепи U = I/Y

д) токи ветвей:

$$I_R = U/R, A$$

 $I_C = U/X_C, A$
 $I_L = U/X_L, A$

е) ток неразветвлённой части цепи $I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_c)^2}$, А ж) угол сдвига фаз определяем по синусу во избежании потери знака угла

$$\sin \varphi = (I_{\rm L} - I_{\rm C}) / I$$
$$\varphi = \arcsin (I_{\rm L} - I_{\rm C}) / I$$

1.4. Экспериментальная проверка результатов расчёта. Подключить бодеплоттер к схеме рис. 3.3. параллельного соединения с источником тока (рис. 3.5)

1.5. Включить схему. Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению боде-плоттера включить его увеличенное изображение (рис. 3.6).

Для получения фазочастотной характеристики (ФЧХ) на верхней панели плоттера включить кнопку **PHASE**. По вертикальной оси (**VERTIKAL**) откладывают градусы, от - 720 ° до 720 °. По горизонтальной оси (**HORIZONTAL**)

всегда откладывают частоту в Герцах, - от 1 mHz до 10 Ghz. С помощью стрелок $\leftarrow \rightarrow$ или перетаскиванием мышью подвести вертикальную линию к частоте 50 Гц и снять угол сдвига фаз φ .

Сравнить расчётные данные с показаниями боде-плоттера. Сделать вывод.



Рис. 3.5. Схема параллельного соединения цепи переменного тока с R, L и C –элементами с боде-плоттером



Рис. 3.6. Увеличенное изображение боде-плоттера. Фазо-частотная характеристика

Исследование схемы параллельного соединения цепи переменного тока с помощью амперметра и вольтметров.

1.6. На рабочем поле к схеме параллельного соединения с источником напряжения 120 В частотой 50 Гц рис. 3.4. подключить амперметры и вольт-

метр (рис. 3.7.). Открыв диалоговое окно измерительных приборов (двойным щелчком мыши по изображению прибора), изменить вид измеряемого напряжения (DC заменить на AC).

1.7. Включить схему. Снять показания приборов и занести их в табл. 3.2.



Рис. 3.7. Исследование схемы параллельного соединения цепи переменного тока с *R*, *L* и *C* – элементами с помощью амперметра и вольтметров

Таблица 3.2

Результаты измерений										
	I, A	U, V	I _R , A	I _C , A	I _L , A					
эксперимент										
расчет										

В данной цепи

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_c)^2}$$
, A

Сопротивление на индуктивности (п. 1.3):

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, OM$$

Сопротивление на емкости (п. 1.3):

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, O_M$$

Определим по закону Ома ток в резисторе, емкости и катушке:

$$I_R = \frac{U}{R}, A; I_L = \frac{U}{X_L}, A; I_C = \frac{U}{X_C}, A$$

1.8. Сравнить расчётные данные с показаниями приборов. Сделать вывод.

2. Исследование цепи переменного тока при резонансе токов с помощью графопостроителя.

2.1. Вернуться к схеме параллельного соединения с источником переменного тока (рис. 3.5), установив частоту источника питания 1 Гц.

2.2. Вычислить резонансную частоту по формуле: $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, Гц

2.3. Включить схему и увеличенное изображение боде-плоттера (рис. 3.8). Для получения амплитудо-частотной характеристики (АЧХ) нажать кнопку **MAGNITUDE**. По вертикальной оси (**VERTIKAL**) отложить отношение напряжений – в логарифмическом масштабе (**LOG**) от -200 dB до 200 dB.



Рис. 3.8. Увеличенное изображение боде-плоттера. Амплитудно-частотная характеристика

2.4. С помощью стрелок $\leftarrow \rightarrow$ или перетаскиванием мышью подвести вертикальную линию к минимальному значению амплитуды и снять резонансную частоту f, Гц.

Сравнить расчётные данные с показаниями боде-плоттера, сделать вывод. Исследование цепи переменного тока при резонансе токов с помощью амперметров и вольтметра.

2.5. На схеме параллельного соединения с источником переменного напряжения (рис. 3.7) установить резонансную частоту. Включить схему. Если резонанса токов достичь не удалось (см. признаки *резонанса токов*: режим электрической цепи при параллельном соединении участков с индуктивностью и емкостью, характеризующийся равенством индуктивной и емкостной проводимостей, называют резонансом токов; реактивные составляющие токов ветвей равны $I_{PC} = I_{PL}$ и находятся в противофазе в случае, когда напряжение на входе чисто активное; токи ветвей превышают общий ток цепи, который имеет минимальное значение; напряжение на входе цепи \dot{U} совпадает по фазе с входным током \dot{I} .), изменяя резонансную частоту, добиться появления резонанса. Снять показания приборов и занести их в табл. 3.3.

Таблица 3.3

		- • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	p • · · · · · ·	
<i>I</i> , A	U, B	$I_{\rm R}, {\rm A}$	$I_{\rm C}, {\rm A}$	$I_{\rm L}, {\rm A}$

Результаты измерений

Указания по оформлению отчета по работе

Отчет должен содержать:

- цель работы; оборудование и материалы;

- расчетную часть (исходные данные, расчетные формулы с пояснениями, результаты расчетов);

- схемы исследуемых цепей и измерения фазового сдвига;

- таблицы экспериментальных и расчетных результатов (см. форму);

- выводы.

Контрольные вопросы

1. В какой электрической цепи и при каких условиях может возникнуть резонанс токов?

2. Как можно добиться резонанса токов в цепи?

3. Как определить полную проводимость электрической цепи синусоидального тока?

4. Как определить активную и реактивную проводимость цепи?

5. Какое выражение является условием резонанса токов?

6. Приведите выражение для закона Ома, соответствующее цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

7. Дайте определение параллельного колебательного контура. Изобразите параллельный колебательный контур.

8. Какой характер носит сопротивление параллельного контура при резонансе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы – исследование параметров и характеристик однотранзисторного усилителя переменного тока.

Используемое оборудование и материалы: осциллограф, боде-плоттер (графопостроитель), функциональный генератор, источники постоянной эдс, биполярный транзистор, резисторы, конденсаторы.

Краткие теоретические сведения

Усилителем называется устройство, предназначенное для усиления входных электрических сигналов по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала. Усилитель включает в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом $U_{\rm Bx}$, источник питания $U_{\rm n}$ и нагрузочное устройство с сопротивлением $Z_{\rm H}$ (рис. 4.1).

Входной сигнал $U_{\rm вx}$ управляет параметрами нелинейного элемента. В качестве нелинейного элемента используются электровакуумные приборы, транзисторы и другие элементы.



Рис. 4.1. Структурная схема усилительного устройства

Усилитель может иметь один или два входа и один или два выхода. Один из входов обычно является прямым, а второй – инверсным.

Классификация усилителей производится по многим признакам:

- по виду усиливаемого сигнала они делятся на усилители гармонических и импульсных сигналов;

- по типу усиливаемого сигнала усилители подразделяют на усилители напряжения, тока и мощности;

- по диапазону усиливаемых частот различают усилители постоянного тока и усилители переменного тока. В свою очередь усилители переменного тока в зависимости от диапазона усиливаемых частот делятся на усилители

низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), широкополосные и избирательные усилители. Последние обеспечивают усиление в узком диапазоне частот;

- по виду нагрузки различают усилители с активной, с активноиндуктивной и емкостной нагрузкой.

Усилители могут быть однокаскадными и многокаскадными с гальванической, емкостной и индуктивной связью.

В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: усилители с линейным режимом работы и усилители с нелинейным режимом работы.

Для получения высоких коэффициентов усиления в состав усилителя входит обычно несколько каскадов. Усилительное устройство состоит из входного, предварительного и выходного каскадов, рис. 4.2. Входной каскад кроме функции усиления выполняет функцию согласования с источником сигнала. Предварительные каскады предназначены для усиления сигнала по напряжению. Выходной каскад, как правило, усиливает сигнал по мощности и выполняет функцию согласования усилителя с внешней нагрузкой.

Первым каскадом как правило является предварительный усилитель, затем идут промежуточный усилитель и усилитель мощности. Предварительный усилитель обеспечивает связь источника сигнала с усилителем. Он должен иметь большое входное сопротивление для того, чтобы не ослаблять входной сигнал. Промежуточный усилитель обеспечивает основное усиление, а усилитель мощности обеспечивает заданную выходную мощность.



Рис. 4.2. Структурная схема усилителя

При построении усилительных устройств наибольшее распространение получили каскады на биполярных и полевых транзисторах.

Основными характеристиками любого усилителя являются:

- амплитудная характеристика, которая представляет собой зависимость установившегося значения выходного напряжения от входного.: $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$. Для линейных усилителей это прямая, проходящая через начало координат; - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ): $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$ отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Реально в усилителях из-за наличия паразитных емкостей и индуктивностей различные частоты усиливаются неодинаково;

- фазочастотная характеристика $\varphi = \lambda(f)$ отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала;

- переходная характеристика – отражает реакцию усилителя на единичный скачок входного напряжения. Переходная характеристика определяется по ее изображению на экране осциллографа при подаче на вход усилителя входного сигнала прямоугольной формы. Процесс изменения выходного сигнала может быть колебательным (кривая 1) либо апериодичным (кривая 2).



Рис. 4.3. Характеристики усилителя: амплитудная (а), амплитудно-частотная (б), фазочастотная (в) и переходная (г)

График амплитудной характеристики строится в линейном масштабе (рис. 4.4).

Важнейшими параметрами усилителя являются: коэффициенты усиления по току K_I, напряжению K_U и мощности K_P:

$$K_{I} = \frac{\Delta I_{\text{BbIX}}}{\Delta I_{\text{BX}}}; \ K_{U} = \frac{\Delta U_{\text{BbIX}}}{\Delta U_{\text{BX}}}; \ K_{P} = \frac{\Delta P_{\text{BbIX}}}{\Delta P_{\text{BX}}}, \tag{4.1}$$

где $I_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$, $P_{\text{вк}}$, $P_{\text{вых}}$ – действующие значения токов напряжений и мощностей на входах и выходах усилителя.



Рис. 4.4. Амплитудная характеристика

Коэффициент усиления по току – это отношение установившегося значения тока на выходе к току сигнала на входе усилителя.

Коэффициент усиления по напряжению - это отношение установившегося значения напряжения сигнала на выходе к напряжению сигнала на входе усилителя.

Коэффициент усиления по мощности - это отношение мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку к мощности, подводимой к его входу.

По АЧХ (рис. 4.5) определяют следующие количественные показатели усилителей:

- полоса пропускания усилителя или диапазон усиливаемых частот $2\Delta f$ характеризует частотные свойства усилителя. (Измеряется на уровне 0,707 от K_{max} $2\Delta f = f_{\text{B}} - f_{\text{H}}$. Для наглядности в ряде случаев АЧХ строится в относительных единицах усиления $N(f) = K(f)/K_{\text{max}}$, где K(f) - коэффициент усиления на частоте f, K_{max} – максимальный коэффициент усиления.)

- верхняя f_{e} и нижняя f_{μ} граничные частоты, на которых коэффициент усиления $K_{e} = K_{\mu} = 0,707 K_{\text{max}} = K_{\text{max}}/\sqrt{2}$, или частоты, на которых указаны другие допустимые частотные искажения;



Рис. 4.5. АЧХ усилителя

- частотные искажения, вызываемые неодинаковым усилением различных частот. Эти искажения оцениваются коэффициентами частотных искажений на нижних и верхних частотах M_{μ} и M_{θ} , определяемых из следующих выражений:

$$M_{\mu} = K_{\max} / K_{\mu}; M_{\theta} = K_{\max} / K_{\theta}.$$
(4.2)

Входное и выходное сопротивление необходимо учитывать при согласовании с источником входного сигнала и с нагрузкой. В общем случае значение входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией от частоты: $Z_{\text{вх}}(f) = U_{\text{вх}}(f) / I_{\text{вх}}(f); Z_{\text{вых}}(f) = U_{\text{вых}}(f) / I_{\text{вых}}(f).$

Обычно Z_{ex} представляет собой параллельное соединение активной составляющей R_{ex} и реактивной составляющей, обусловленной входной емкостью C_{ex} . Таким образом, входная цепь усилителя характеризуется входным напряжением U_{ex} , входным током I_{ex} , входным сопротивлением R_{ex} , а также входной мощностью P_{ex} .

Выходная цепь усилителя, в которую подключается нагрузка, характеризуется эквивалентной схемой, состоящей из генератора ЭДС и выходного сопротивления R_{6blx} (генератора тока SU_{6x} и выходной проводимости G_{6blx}), а также сопротивлением нагрузки R_{μ} . По этим параметрам легко определить основные выходные данные усилителя: выходное напряжение U_{6blx} усиленного сигнала на нагрузке, выходной ток I_{6blx} и полезную выходную мощность P_{6blx} , отдаваемую усилителем в нагрузку.

Хотя выходное сопротивление и сопротивление нагрузки в общем случае имеют комплексный характер, но в рабочей полосе частот усилителя эти сопротивления можно считать чисто активными R_{sbix} и R_{H} . При этом условии выходная мощность и напряжение усиленного сигнала на нагрузке определяются выражениями

$$U_{_{6blx}} = I_{_{6blx}}R_{_{H}}; \quad P_{_{6blx}} = I_{_{6blx}}U_{_{6blx}} = I_{_{6blx}}R_{_{H}}^{2} = \frac{U_{_{6blx}}^{2}}{R_{_{H}}}.$$
(4.3)

Выходная мощность, отвечающая заданной норме нелинейных искажений, называется номинальной.

Типовым значением сопротивления нагрузки R_{μ} современных акустических систем является $R_{\mu} = 8$ Ом. Высокая верность воспроизведения акустических систем или громкоговорителя может быт только при эффективном демпфировании свободных колебаний подвижной части. Это возможно лишь в случае выполнения условия $R_{Bblx} < R_{\mu}$. Поэтому для современных высококачественных усилителей вводят понятие коэффициента демпфирования, определяемого отношением

$$K_{\mathcal{I}} = \frac{R_{\mu}}{R_{BLX}}.$$
(4.4)

Выходная мощность усилителя – это мощность, которая выделяется на нагрузке.

Искажения сигналов в усилителе – это отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала в процессе усиления. Различают два вида искажений: статические (нелинейные) и динамические (линейные).

Нелинейные искажения - это искажения, проявляющиеся при усилении сигналов большой величины и вызванные наличием в схеме усилителя нелинейных элементов. Нелинейные искажения возникают в умножителе за счет работы его на нелинейном участке ВАХ. Количественно нелинейные искажения оцениваются коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{\mu} = \frac{\sqrt{(A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2)}}{A_1}, \qquad (4.5)$$

где A_n – амплитуда n-й гармоники; A_1 – амплитуда основной гармоники выходного сигнала.

Линейные искажения - это искажения, проявляющиеся при усилении сигналов низкого уровня и, вызванные влиянием только реактивных элементов схемы. Линейные искажения определяются амплитудно-частотной характеристикой усилителя и количественно оцениваются коэффициентами частотных искажений на низких и высоких частотах.

Известно много вариантов выполнения каскада усилителя на биполярном транзисторе с ОЭ. Работу усилительного каскада рассмотрим на примере наиболее популярной схемы усилительного каскада ОЭ на биполярном транзисторе *n-p-n* (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Схема усилительного каскада ОЭ

Основными элементами схемы являются источник питания Uп, усиливающий элемент – транзистор VT1 и резистор Rк. Общая (нулевая) точка схемы соединена с отрицательным потенциалом источника питания Uп. Эти элементы схемы обеспечивают усиление за счёт протекания тока коллектора Ik, который управляется током базы, поэтому эти элементы можно считать главной цепью усилительного каскада.

Остальные элементы выполняют вспомогательную роль. Так, конденсаторы Cp1 и Cp2 являются разделительными. Конденсатор Cp1 не пропускает постоянный ток через источник переменного входного сигнала Eвх по цепи "+"Uп \rightarrow R1 \rightarrow Cp1 \rightarrow Rвх \rightarrow "-"Uп, что исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала Rвх на напряжение Uбп в режиме покоя. Конденсатор Cp2 пропускает на внешнюю нагрузку Rн (обычно входное сопротивление следующего каскада усиления) только переменную составляющую напряжения и не пропускает её постоянную составляющую. Делитель напряжения, включающий в себя резисторы R1 и R2, обеспечивает необходимое напряжение покоя базы транзистора

$$U_{6\pi} = U_{R2} = U_{\pi} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$
(4.6)

Резистор Rэ и конденсатор Сэ образуют отрицательную обратную связь, которая обеспечивает температурную стабилизацию точки покоя каскада.

Порядок выполнения работы

Собрать в программе Electronics Workbench усилитель переменного тока по схеме, указанной на рис. 4.7, с применением транзистора, указанного в табл. 4.1, подключив все необходимые приборы: функциональный генератор (**Function Generator**), осциллограф (**Oscilloscope**), анализатор частотных характеристик (**Bode Plotter**).



Рис. 4.7. Усилитель переменного тока на транзисторе

Таблица 4.1

Вариант	1	11	2	12	3	13	4	14	5	15	6	16	7	17	8	18	9	19	10	20
Тип тран-	2N2	218	2N3	3904	2N4	401	BD	537	BD	535	BD	533	BD5	501B	BD	550	BD	243	BD'	241
зистора	2112	2210	21.00	//01		101	55	001	55	000	55	000	DDU	OID .		220	22	210	001	

Тип биполярного транзистора

Определить, используя анализатор частотных характеристик (**Bode Plotter**):

- среднюю частоту полосы пропускания $f_{\rm cp}$;

- нижнюю граничную частоту полосы пропускания $f_{\text{нижн}}$;

- верхнюю граничную частоту полосы пропускания $f_{\text{верхн}}$;

- коэффициент усиления по напряжению в рассматриваемой схеме в относительных единицах $k_{\rm U}$ и в децибелах $L_{\rm U}$ на нижней, средней и верхней частоте полосы пропускания;

- величину отставания по фазе *φ* выходного сигнала относительно входного на нижней, средней и верхней частоте полосы пропускания.

Определить, используя осциллограф (Oscilloscope):

- величины $k_{\rm U}$ и φ при $f_{\rm нижн}, f_{\rm cp}, f_{\rm верхн};$

- вычислить $L_{\rm U} = 20 \cdot \lg k_{\rm U}$ при $f_{\rm нижн}, f_{\rm cp}, f_{\rm верхн}$.

Заполнить табл. 4.2.

Таблица 4.2

Измерительный	Параметры	τ	Ц	
прибор	усилителя	$f_{\text{нижн}} = \dots$	$f_{\rm cp} = \dots$	$f_{\text{верхн}} = \dots$
Анализатор	<i>k</i> _U , o. e.			
частотных	$L_{ m U}$, дБ			
характеристик	<i>ф</i> , град			
	k _U , o. e.			
Осциллограф	<i>L</i> _U , дБ			
	<i>φ</i> , град			

Параметры усилителя

Пример задания. На базе биполярного транзистора, например, 2N2222A, можно создать усилитель переменного тока (рис. 4.7). В данном усилителе транзистор включен по схеме с общим эмиттером.

На входе и выходе усилителя для отсечки постоянной составляющей включены конденсаторы ёмкостью 5 мкФ.

Рабочая точка ВАХ транзистора обеспечивается резистивным делителем напряжения. Сопротивления резисторов делителя предварительно рассчитываются либо подбираются так, чтобы нелинейные искажения выходного сигнала были минимальными. В цепь эмиттера включено сопротивление 50 Ом, обеспечивающее стабилизацию рабочей точки.

По переменному току эмиттер транзистора через шунтирующий конденсатор 50 мкФ подключается к общей точке. Сопротивление нагрузки составляет 100 кОм – усилитель работает в режиме холостого хода. Напряжение питания усилителя составляет 12 В.

На вход усилителя с функционального генератора **Function Generator** подаётся гармонический сигнал с амплитудой 20 мВ и частотой 10 кГц (рис. 4.8). Частота входного сигнала в дальнейшем будет меняться.

Function (Generator	×
2	~~	
Frequency	10 🛢	kHz 🖨
Duty cycle	50 🛢	%
Amplitude	20	mV₿
Offset	0	
	Common	+ ©

Рис. 4.8. Диалоговое окно функционального генератора Function Generator

Построитель частотных характеристик **Bode Plotter** имеет четыре вывода – две клеммы для входного сигнала **In** и две клеммы для выходного сигнала **Out. Bode Plotter** позволяет получить амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики усилителя. По АЧХ возможно определить верхнюю и нижнюю границы полосы пропускания и среднегеометрическую частоту полосы пропускания. Диалоговое окно **Bode Plotter** приведено на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Диалоговое окно **Bode Plotter**: амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Включим кнопку **Magnitude** для построения АЧХ. По вертикали (Vertical) и по горизонтали (Horizontal) установим логарифмическую шкалу (Log). Пределы по вертикали, следующие: I = -20 дБ (dB) - нижний предел и F = -50 дБ - верхний предел. Пределы по горизонтали, следующие: <math>I = 10 Гц (Hz) – нижний предел и F = 10 ГГц (GHz) – верхний предел. Установим движок в точке с координатами 40,97 дБ и 432,9 кГц, примерно посередине АЧХ. Примем эту точку за среднюю в полосе пропускания. На границе полосы пропуска-

ния амплитуда выходного сигнала снизится на 3 дБ, или в 1.414 раза, и составит 40,97 – 3 = 37,97 дБ.

Перемещая движок от средней точки влево до тех пор, пока амплитуда выходного сигнала не примет значение 37,97 дБ, найдём нижнюю частоту полосы пропускания. Величине 37,97 дБ наиболее соответствуют две точки:

1) 37,79 дБ и 1,874 кГц;

2) 38,18 дБ и 2,074 кГц.

Величины абсолютных отклонений составят, соответственно, $\Delta A_1 = 37,97 - 37,79 = 0,18$ дБ и $\Delta A_2 = 37,97 - 38,18 = 0,21$ дБ. Принимаем первую точку с координатами $A_{\text{нижн}} = 37,79$ дБ и $f_{\text{нижн}} = 1,874$ кГц в качестве нижней границы полосы пропускания усилителя переменного тока, так как $\Delta A_1 < \Delta A_2$.

Перемещая движок от средней точки вправо до тех пор, пока амплитуда выходного сигнала не примет значение 37,97 дБ, найдём верхнюю частоту полосы пропускания. Величине 37,97 дБ наиболее соответствуют две точки:

1) 37,56 дБ и 81,11 МГц;

2) 38,06 дБ и 72,67 МГц. Величины абсолютных отклонений составят, соответственно, $\Delta A_3 = 37,97 - 37,56 = 0,41$ дБ и $\Delta A_4 = 37,97 - 38,06 = 0,09$ дБ. Принимаем точку с координатами $A_{верхн} = 38,06$ дБ и $f_{верхн} = 72,67$ МГц в качестве верхней границы полосы пропускания усилителя переменного тока, так как $\Delta A_4 < \Delta A_3$.

Среднегеометрическая частота полосы пропускания усилителя переменного тока определяется как

$$f_{\rm cp} = \sqrt{f_{\rm HMWH} \cdot f_{\rm Bepx}}.$$
(4.7)

Подставив численные значения, определённые ранее, рассчитаем

$$f_{\rm cp} = (1,874 \cdot 10^3 \cdot 72,67 \cdot 10^6)^{1/2} = 369 \cdot 10^3 \,\Gamma \mu = 369 \,\kappa \Gamma \mu.$$

В диалоговом окне устройства **Bode Plotter** включаем фазочастотную характеристику (ФЧХ) с помощью кнопки **Phase** (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Диалоговое окно Bode Plotter: фазочастотная характеристика (ФЧХ)

На нижней границе полосы пропускания при частоте $f_{\text{нижн}} = 1,874$ кГц выходной гармонический сигнал отстаёт по фазе от входного на величину $\varphi_{\text{нижн}} = -135$ °. На верхней границе полосы пропускания при частоте $f_{\text{верхн}} = 72,67$ МГц отставание по фазе составляет: $\varphi_{\text{верхн}} = -230,7$ °.

По желанию (не обязательно) АЧХ и ФЧХ усилителя переменного тока (УПТ) возможно сохранить в отдельный файл, а затем построить в другой программе, например, в программе Excel. В диалоговом окне **Bode Plotter** необходимо нажать кнопку **Save** (Сохранить). Появится диалоговое окно **Save Bode Data** (рис. 4.11), где необходимо выбрать:

1) путь, например, с:\temp;

2) имя файла, например, OE_upt.bod.



Рис. 4.11. Диалоговое окно Save Bode Data

У сохранённого файла необходимо изменить расширение на *.xls, а затем загрузить файл с помощью Excel. На рис. 4.12 – 4.14 приведены характеристики УПТ, построенные в Excel.



Рис. 4.12. Логарифмическая АЧХ УПТ, построенная в Excel



Рис. 4.13. АЧХ УПТ, построенная в Ехсеl



Рис. 4.14. ФЧХ УПТ, построенная в Excel

Коэффициент усиления УПТ по напряжению k_U можно определить, как

$$k_U = \frac{U_{\text{Bblx,a}}}{U_{\text{Bx,a}}} = \frac{U_{\text{Bblx,d}}}{U_{\text{Bx,d}}} = \frac{\overline{U_{\text{Bblx}}}}{\overline{U_{\text{Bx}}}},$$
(4.8)

где $U_{\text{вых.а}}$, $U_{\text{вых.д}}$, $\overline{U_{\text{вых}}}$ - амплитудное, действующее и среднее значения выходного гармонического сигнала (напряжения) УПТ; $U_{\text{вх.а}}$, $U_{\text{вх.д}}$, $\overline{U_{\text{вх}}}$ - амплитудное, действующее и среднее значения входного гармонического сигнала УПТ.

Коэффициент усиления k_U является безразмерным, т. е. измеряется в относительных единицах. Зависимость коэффициента усиления k_U УПТ от частоты *f* является амплитудно-частотной характеристикой $k_U(f)$. Коэффициент усиления УПТ L_U , выраженный в децибелах (дБ или dB), можно выразить через k_U следующим образом:

$$L_U = 20 \lg k_U. \tag{4.9}$$

Откроем диалоговое окно построителя частотных характеристик **Bode Plotter** (см. рис. 4.15). Включим кнопку **Magnitude**. В подразделе **Vertical** включим линейную шкалу Lin. Пределы по вертикали следующие: I = 0 – нижний предел, F = 500 – верхний предел. В подразделе **Horizontal** включим логарифмическую шкалу **Log**. Пределы такие же, как предлагаются по умолчанию (рис. 4.15). Данная характеристика является зависимостью или АЧХ УПТ в безразмерных единицах.

На нижней границе полосы пропускания УПТ при f = 1,874кГц коэффициент усиления $k_U = 77,5$ (рис. 4.15). На верхней границе полосы пропускания УПТ при f = 72,67 МГц коэффициент усиления $k_U = 80,1$. При среднегеометрической частоте полосы пропускания f = 369 кГц коэффициент усиления $k_U = 112$.



Рис. 4.15. Диалоговое окно построителя частотных характеристик Bode Plotter: АЧХ УПТ в безразмерных единицах

С помощью построителя частотных характеристик Bode Plotter выше определены параметры k_U , L_U , f_{cp} , $f_{HUЖH}$, f_{BepxH} . Эти параметры УПТ можно получить и при помощи осциллографа (**Oscilloscope**).

В диалоговом окне функционального генератора **Function Generator** выставим параметры входного гармонического сигнала (напряжения): амплитуду $U_{\text{вх.а}} = 20 \text{ мB}$ и частоту $f = f_{\text{нижн}} = 1,9$ кГц (рис. 4.16).

🊰 Function (Generator	X
	$\sim\sim$	
Frequency Duty cycle	1.9	kHz 🚔
Amplitude	20	mV 📮
Offset	0	
ē	Common	+ ©

Рис. 4.16. Диалоговое окно функционального генератора Function Generator

Диалоговое окно осциллографа представлено на рис. 4.17. Как видно из рис. 4.17, осциллограф имеет два движка. Первый движок установим в такой момент времени ($T_1 = 22,2435$ мс), когда входной сигнал принимает наибольшее (амплитудное) значение $V_{A1BX,a} = U = 19,8274$ мВ ≈ 20 мВ.

Значения *V*_{A1} и T₁ индицируются в первом окне.



Рис. 4.17. Диалоговое окно осциллографа

Второй движок установим в момент времени $T_2 = 22,4409$ мс, когда выходной сигнал принимает наибольшее (амплитудное) значение

$$V_{\rm B2\ Bbix.a} = U = 1,4615\ {\rm B}.$$

Значения V_{B2} и T₂ индицируются во втором окне.

Коэффициент усиления УПТ по напряжению $k_{\rm U}$ на частоте $f_{\rm H} = 1,9$ кГц по показаниям осциллографа рассчитаем следующим образом:

$$k_U = \frac{U_{\text{вых.a}}}{U_{\text{вх.a}}} = \frac{V_{B2}}{V_{A1}} = \frac{1,4615}{19,8274 \cdot 10^{-3}} = 73,711.$$

Вычислим коэффициент усиления УПТ в децибелах на частоте $f_{\rm H} = 1,9$ кГц по показаниям осциллографа:

$$L_U = 20 \log 73,711 = 37,351.$$

Отставание по фазе выходного сигнала УПТ относительно входного на частоте $f_{\rm H} = 1,9$ кГц по показаниям осциллографа рассчитаем следующим образом:

$$\varphi = -\frac{T_2 - T_1}{\frac{1}{f_{\rm H}}} \cdot 360 = -\frac{(22,4409 - 22,2435) \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{1,9 \cdot 10^{-3}}} \cdot 360 = -135,022^{\circ}.$$

По вышеописанной процедуре можно с помощью осциллографа (**Oscilloscope**) вычислить параметры $k_{\rm U}$, $L_{\rm U}$ и φ на верхней граничной частоте полосы пропускания УПТ $f_{\rm верхн} = 72,67$ МГц и на среднегеометрической частоте полосы пропускания.

Необходимо отметить, что параметры k_U , L_U и φ , измеренные и вычисленные с помощью инструментов **Bode Plotter** и **Oscilloscope**, примерно совпадают, а расхождения обусловлены дискретностью числовых величин, задаваемых в генераторе **Functional Generator** и индицируемых в инструментах **Bode Plotter** и **Oscilloscope**.

Указания по оформлению отчета по работе

Отчет должен содержать:

- цель работы; оборудование и материалы;

- схемы исследуемых цепей;

- расчетную часть (исходные данные, расчетные формулы с пояснениями, результаты расчетов);

- таблицы экспериментальных и расчетных результатов (см. форму);

- выводы.

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются электронные усилители?

2. Расскажите о схемах включения биполярного транзистора в усилительный каскад.

3. В чём заключаются преимущества схемы с общим эмиттером?

4. Какими техническими показателями характеризуются современные усилители?

5. Как строятся наиболее типичные схемы усилительных каскадов на транзисторах?

6. Перечислите основные характеристики усилителя.

7. Что представляет собой амплитудная характеристика?

8. Что отражает амплитудно-частотная характеристика?

9. Что отражает фазочастотная характеристика?

10. Что отражает переходная характеристика?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение / В.И. Карлащук. – М.: Солон – Р, 2003. – 726 с.

2. Алиев И.И. Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике / И.И. Алиев. – М.: Радиософт, 2003. – 112 с.

3. Лачин В.И. Электроника / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. – Ростов: Феника, 2000. – 448 с.

4. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC: лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB / В.И. Карлащук. – М.: Солон – Р, 2004. – 799 с.

5. Панфилов Д.И. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: практикум на Electronics Workbench. Том 1. Электротехника / Д.И. Панфилов. – М.: Додека, 1999. – 304 с.

6. Харкевич А.А. Основы радиотехники / А.А. Харкевич. – М.: ФИЗМА-ТЛИТ, 2007. – 512 с.

7. Догадин Н.Б. Основы радиотехники: учеб. пособие / Н.Б. Догадин. - СПб.: Изд-во «Лань», 2007. - 272 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Краткое знакомство с программой	
Elektronics Workbench	3
Лабораторная работа № 2. Исследование схемы последовательного	
соединения цепи переменного тока с R, L и C. Резонанс	
напряжений	16
Лабораторная работа № 3. Исследование схемы параллельного	
соединения цепи переменного тока с R, L и C. Резонанс	
токов	23
Лабораторная работа № 4. Исследование однотранзисторного	
усилителя переменного тока	31
Библиографический список	46

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВ РАДИОТЕХНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») всех форм обучения

Составитель Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 15.05.2023. Уч.-изд. л. 2,5.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84