

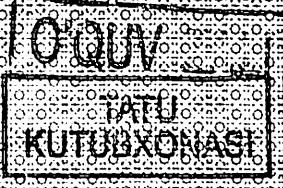
М601
601

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭЛЕКТРОНИКИ**

Лабораторный практикум с использованием программы
"Electronics Workbench"
Для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению
"Подготовка служба"



Tashkent 2007

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Лабораторный практикум с использованием программы
“Electronics Workbench”.*

Для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению
“Почтовая служба”

Ташкент 2007

Составитель: Козлов В.А. "ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ". *Лабораторный практикум с использованием программы Electronics Workbench*". Для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению "Почтовая служба". Ташкент, ТУИТ, 2007.-118 с.

В связи с непрерывным ростом объема информации и сокращением времени, отводимым на изучение многих технических дисциплин, в том числе и Основ электротехники и электроники, а также возрастанием требований к качеству подготовки специалистов в области Почтовая служба необходимо в учебный процесс внедрять современные компьютерные технологии.

Наиболее плодотворное приобретение знаний, умений и навыков учащимися происходит при выполнении ими лабораторного практикума в компьютерном классе. В процессе выполнения лабораторных работ активизируется познавательная деятельность учащихся, совершенствуется их способность к самостоятельному труду и осмысливанию сложных явлений электротехники и электроники. Применение программы анализа электрических схем Electronics Workbench (EWB), являющейся по существу электронной лабораторией, упрощает процесс изучения явлений в электрических цепях, делает его более наглядным, приближая его к эксперименту на реальных лабораторных стендах.

Всё это определяет структуру данного учебного пособия для выполнения 13 лабораторно-практических работ. В первой лабораторной работе даются основные сведения, необходимые для самостоятельной работы с программой EWB. В каждой лабораторной работе содержатся довольно подробные теоретические сведения, необходимые для понимания исследуемых явлений, а также для выполнения предварительных расчётов. При подготовке к выполнению лабораторной работы надо постараться ответить на все контрольные вопросы, содержащиеся в конце каждой лабораторной работы. Эти же вопросы также используются при защите лабораторных работ, которые происходят либо во время проведения занятия, либо в определённое время, у казанное преподавателем.

Тематика лабораторных работ соответствует программе курса ОЭ и Э. Первые 7 лабораторных работ выполняются в 3-ем, остальные 6 – в 4-ом семестре. Отчеты по выполненным лабораторным работам и их защита должны выполняться в срок, их задержка приводит к снижению рейтинговой оценки.

ВВЕДЕНИЕ

Домашняя подготовка

Подготовка к выполнению каждой лабораторной работы должна начинаться за 5-7 дней до выполнения, с тем, чтобы была возможность основательно разобраться в теоретической части, материала, правильно и вовремя выполнить предварительный расчёт, а также построить графики по результатам предварительного расчёта. Важной частью подготовки является ответы на контрольные вопросы, содержащиеся в конце каждой лабораторной работы.

Правила работы в компьютерном классе

До начала работы в компьютерном классе студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности (ТБ) и в последующем выполнять все изученные положения.

Нельзя работать на неисправной машине. Если на металлических частях ПК обнаружено напряжение, заземляющий провод оборван, необходимо сообщить об этом преподавателю, ведущему занятие.

Заземляющий контакт розетки питания, в которой включается вилка питания, должен быть заземлён. Вблизи персонального компьютера (ПК) не должно быть батарей отопления или водопроводных труб.

В компьютерном классе должна быть чистота, дисциплина и порядок. Необходимо следить за тем, чтобы на системный блок, монитор и клавиатуру не клали посторонние предметы. Не допускать к работе на ПК посторонних лиц.

При завершении работы на ПК необходимо ознакомить преподавателя с результатами работы и получить его подпись, после чего ПК может быть выключен обслуживающим персоналом компьютерного класса. Выключение ПК студентом категорически запрещается, т.к. это может привести к его повреждению.

Выполнение работы

Для выполнения работы на ПК необходимо:

1). Щёлкнуть дважды мышью по пиктограмме папки LabOEEru, расположенной на рабочем поле дисплея монитора ПК. После чего откроется окно, содержащее 13 папок с именами лабораторных работ Lab 1 – Lab 13, что означает лабораторная работа № 1 - № 13.

2). Выбирается папка требуемой лабораторной работы и по ней делается двойной щелчок мышью, в результате чего раскрывается окно, содержащее один текстовый файл в формате Word и несколько схемных файлов EWB. Текстовый файл содержит краткую теоретическую часть, методику выполнения предварительного расчёта и выполнения работы. Каждый схемный файл содержит схему и модели измерительных приборов, необходимых для выполнения работы. Текстовый и соответствующие схемные файлы загружаются двойным щелчком мыши по соответствующему ярлычку-пиктограмме. После чего на экране монитора появляется соответствующий

пояснительный текст или требуемая схема. Необходимо учитывать, что в процессе работы схема студентами не должна изменяться. Можно только изменять лишь параметры элементов согласно номера варианта.

3). Выполнение расчёта (моделирование). Для этого надо один раз щёлкнуть мышью по кнопке выключателя **0 | 1**, расположенной в правом верхнем углу рабочего окна программы EWB.

Для того чтобы приостановить процесс моделирования, надо сделать один щелчок мышью по кнопке **Pause**, расположенной ниже кнопки выключателя. Для прекращения моделирования надо однократно щёлкнуть мышью на кнопке выключателя **0 | 1**.

Для продолжения исследований вызывается (загружается в ПК) следующий схемный файл и т.д.

Оформление отчёта и защита выполненной работы

Перед началом выполнения новой лабораторной работы студент должен представить преподавателю отчёт о предыдущей работе. На титульном листе должны быть: название министерства или ведомства, к которому относится учебное заведение. (Узбекское агентство связи и информатизации), название института, кафедры, номер и названия лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, номер группы, фамилия и инициалы преподавателя, город и год выполнения работы. В отчёте приводится цель работы, исследуемые схемы, расчетные формулы, таблицы с результатами предварительного расчёта и компьютерного моделирования; графики и выводы из анализа проделанной работы. Защита лабораторной работы осуществляется во время проведения лабораторных работ или в специально для этого отведённое время.

1. ЗНАКОМСТВО С ПРОГРАММОЙ EWB

Цель работы - изучить правила работы с программой анализа электрических схем Electronics Workbench (EWB).

1. Структура рабочего окна программы

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

Знакомство с программой следует начать с изучения рабочего окна. Для этого откройте в вашем компьютере файл с программой Electronics 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. Меню программы EWB

Ниже расположена стандартная *панель инструментов* (рис.1.2).

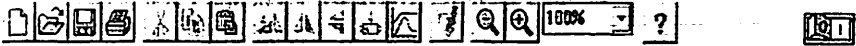


Рис.1.2. Панель инструментов программы EWB

Ниже расположена панель компонентов, которая содержит 13 кнопок (в данной версии программы EWB 5.0с) (рис.1.3).



Рис. 1.3. Панель компонентов программы EWB

Каждая кнопка представляет собой библиотеку компонентов (элементов) схем, контрольно-измерительных приборов, инструментов и т.д. Например,

- 1 – источники тока и напряжения;
- 2 – основные пассивные элементы;
- 10 – индикаторные приборы;
- 13 – измерительные приборы.

В правом верхнем углу окна экрана на уровне двух последних строк находятся кнопка **01** и "Pause". Кнопка **01** предназначена для запуска на расчёт модели электрической схемы. Под запуском модели понимается включение источников, сигналов и контрольно-измерительных приборов. Кнопка **Pause** служит для временной остановки расчёта.

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

2. Содержание некоторых панелей компонентов

Познакомьтесь с библиотеками некоторых компонентов, изображенных на рис. 1.4 – 1.7. На рисунках даны названия некоторых компонентов.

Упражнения: Открыть библиотеки компонентов, указанных на рис 1.3

Нажмите курсором мыши на кнопку 1 - **Sources** - источника тока и напряжения. Откроется библиотека источников тока и напряжения (рис.1.4).

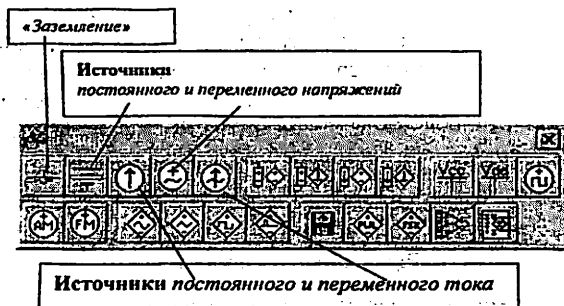


Рис. 1.4. Библиотека источников тока и напряжения

Откройте библиотеку **Basic** (кнопка 2) - основные пассивные элементы



Рис. 1.5. Библиотека основных пассивных элементов **Basic** (резисторы; конденсаторы; катушки индуктивностей и т.д.) (рис.1.5). На каждой кнопке показано условное изображение элемента схемы.

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

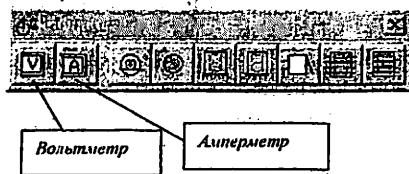


Рис. 1.6. Библиотека индикаторных приборов **Indicators**

Откройте библиотеку – измерительные приборы Instruments (рис. 1.7)



Рис. 1.7. Библиотека измерительных приборов Instruments

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

3. 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.

3.1. Размещение изображений элементов и приборов на рабочем поле.

Проведение 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° , изменение обозначения или параметра и т. д. Для этого нужно перевести изображение в *активную форму* щелчком мыши по значку элемента. Изображение станет красным.

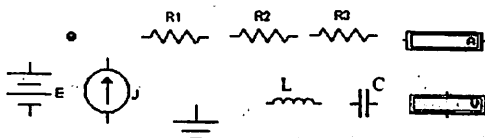


Рис. 1.8. Элементы и приборы

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).

Удалите изображение источника постоянного тока J, емкости C и индуктивности L, разверните два сопротивления R2 и R3 на 90° и разместите элементы так, как показано на рис.1.9, для создания будущей схемы.

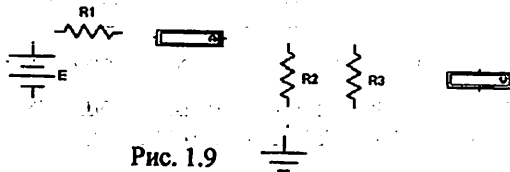


Рис. 1.9

3.2. Установка параметров элементов и технических характеристик измерительных приборов

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 элементов (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:

$R1 = 1 \text{ k}\Omega$ (кОм), $R2 = 1 \text{ k}\Omega$ (кОм), $R3 = 500 \Omega$ (Ом), $E = 2 \text{ V}$ (В).
Результат выполнения этого упражнения показан на рис 1.10.

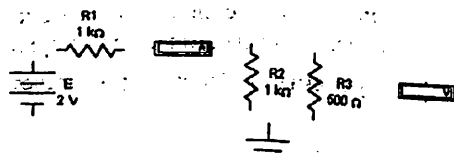


Рис.1.10

Вольтметр и амперметр, размещенные на рабочем поле, характеризуются двумя параметрами: **Mode** - режим работы - DC или AC (вид напряжения и тока) и **Resistance R** - входным сопротивлением. В режиме DC они позволяют измерять постоянные напряжения и ток. В режиме AC - действующие значения гармонических напряжения или тока.

Корпусная клемма этих приборов подключена к *широкой черной полосе* грани изображения прибора и на рис. 1.11 обозначена знаком «-». Клемма,

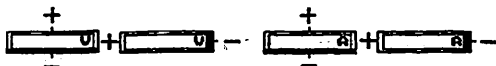


Рис. 1.11. Полярность выводов приборов

расположенная на противоположной стороне изображения прибора, является потенциальной и обозначена на рис. 1.11 знаком «+». Вращение изображения прибора может быть выполнено нажатием комбинации клавиш **Ctrl+R**.

Входное сопротивление вольтметра R_V обычно выбирают значительно больше сопротивления, параллельно к которому подключают вольтметр. Например, если точность измерения достаточна в 1%, то в 100 раз больше.

Входное сопротивление амперметра R_A 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 $R_V = 10 \text{ МОм}$, $R_A = 1 \text{ нОм}$.

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

3.3. Соединение элементов между собой проводниками

Соединение компонентов между собой проводниками производится в соответствии с заданным эскизом схемы. Курсор мыши подвести к выводу элемента и, после появления круглой площадки черного цвета ("узла"), нажать левую кнопку мыши. Затем курсор мыши переместить к выводу другого элемента, не отпуская клавиши. При этом появится линия (проводник). Если соединение произошло, то на этом выводе также появится "узел". После этого надо отпустить клавишу мыши, площадка исчезнет, а соединительная линия останется.

При соединении элементов 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 клавиатуры со стрелками или курсором. Эту операцию можно проводить многократно.

При коррекции изображения схемы можно перемещать не только проводники, но и элементы. 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, расположенные на рабочем поле проводниками и откорректируйте конфигурацию проводников, как показано на рис. 1.12.

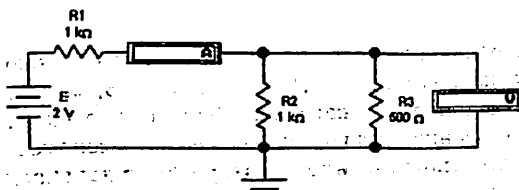


Рис. 1.12. Пример электрической схемы

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. 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.

4. Запуск модели на расчёт

Включение измерительных приборов и процесса измерения производится щелчком по кнопке запуска моделирования [01].

4.1. Произведите измерение величин тока через резистор R1 и напряжения на R3.

Амперметр должен показать величину тока $I = 1.5 \text{ mA}$, а вольтметр – напряжение $U = 500 \text{ mV}$ (рис. 1.13).

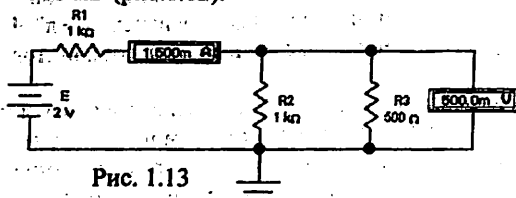


Рис. 1.13

4.2. Измените значение сопротивления резистора: $R1 = 4 \text{ k}\Omega$ 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:

$I = 461.5 \text{ мкА}$, $U = 153.8 \text{ мВ}$ (рис. 1.14):

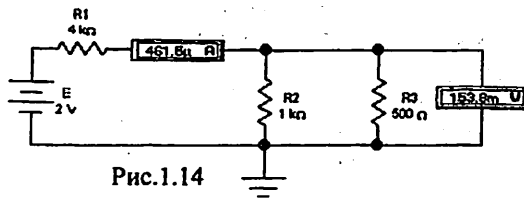


Рис.1.14

Запишите правила запуска модели и измерения токов и напряжений по показаниям индикаторных приборов.

Методика работы с двухканальным осциллографом подробно изложена в приложении 1-в конце данного методического пособия.

Методика работы с измерителем амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) электрических цепей (ЭЦ) с помощью измерителя частотных характеристик - «Bode plotter» подробно изложена в приложении 2 в конце данного методического пособия.

5. Указания по оформлению отчета по работе

Отчет должен содержать правила создания на рабочем поле электрической схемы: размещения элементов, их соединения между собой, установки их параметров и характеристик приборов.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Как найти в библиотеках нужный компонент? В какой библиотеке находятся резисторы; конденсаторы, индуктивные катушки?
- 6.2. Где находятся индикаторные, приборы?
- 6.3. Где находятся измерительные приборы?
- 6.4. Как разместить изображения элементов и приборов на рабочем поле?
- 6.5. Как произвести перемещение изображения элементов по рабочему полю, их поворот на 90° , удаление?
- 6.6. Как задать численные значения сопротивлений, конденсаторов, индуктивных катушек, ЭДС источника напряжения?
- 6.7. Как установить параметры вольтметра и амперметра?
- 6.8. Как соединить элементы схемы между собой проводниками?
- 6.9. Как производится запуск модели?
- 6.10. Как остановить процесс моделирования?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Цель работы - изучить внешние характеристики:

- 1) идеальных независимых и зависимых (управляемых) источников постоянного напряжения и тока;
- 2) реального источника постоянного напряжения.

1.1. Теоретические сведения

Элементы электрических цепей (ЭЦ) можно разделить на активные и пассивные. К активным элементам относятся элементы генерирующие электрическую энергию. В ЭЦ используют идеализированные независимые и зависимые (управляемые) источники напряжения и тока.

Независимыми источниками напряжения (рис.2.1) называют такие источники, напряжение на зажимах которых не зависит от тока, протекающего через них. Внутреннее сопротивление таких источников равно нулю.



Рис. 2.1. Обозначение независимых источников напряжения.
Стандарт: а) Россия; б) США; в) Германия

Независимыми источниками тока (рис.2.2), называют такие источники, ток которых не зависит от напряжения на их зажимах. Внутреннее сопротивление таких источников равно бесконечности.

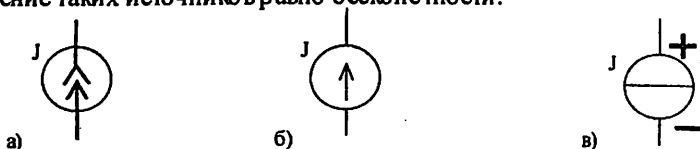


Рис. 2.2. Обозначение независимых источников тока.
Стандарт: а) Россия; б) США; в) Германия

Источники напряжения и тока характеризуются внешней вольтамперной характеристикой (ВАХ), представляющей зависимость напряжения на его зажимах от протекающего через него тока $U(I)$.

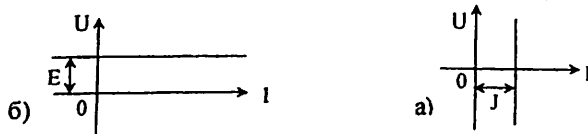
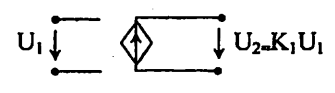
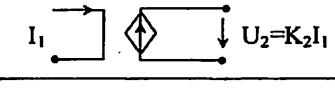




Рис. 2.3. Внешние ВАХ идеального источника постоянного:
а - напряжения; б – тока.

Идеализированные зависимые (управляемые) источники имеют две пары зажимом. Различают зависимые источники напряжения и тока (табл.2.1).

Таблица 2.1

Зависимые источники напряжения и тока

n	Наименование	Обозначение	K_i
1	Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)		U_2/U_1
2	Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)		U_2/I_1
3	Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)		I_2/U_1
4	Источник тока, управляемый током (ИТУТ)		I_2/I_1

Коэффициенты управления K_i могут иметь размерность сопротивления (ИНУТ), проводимости (ИТУН) или быть безразмерной величиной ИНУН и ИТУТ. Если управляющее воздействие источника равно нулю, то и выходное напряжение (ток) также будет равен нулю.

С помощью идеализированных активных и пассивных элементов можно построить модели (схемы замещения) реальных элементов электрической цепи, которые с достаточной для данного элемента точностью отражает процессы, происходящие в нём.

Реальный источник (аккумулятор, термопару) можно представить двумя схемами замещения: последовательной или параллельной (рис.2.4).



Рис.2.4. Схемы замещения реальных источников

Последовательная схема замещения (рис.2.4,а) содержит последовательное соединения источника ЭДС (ϵ , E) и внутреннего сопротивления R_b .

Параллельная схема (рис.2.4,б) - параллельное соединение источника тока (i , J) и внутренней проводимости $G_b = 1/R_b$. Обе схемы эквивалентны и в конкретный случаях пользуются той схемой, которая позволяет проще и быстрее решить поставленную задачу.

Внешняя ВАХ реального источника $U(I) = E - R_b I = J/G_b - I/G_b = (J - I)/G_b$ представляет собой прямую линию (рис.2.5).

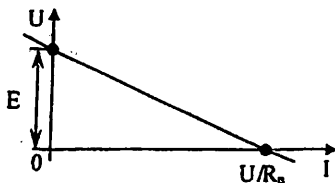
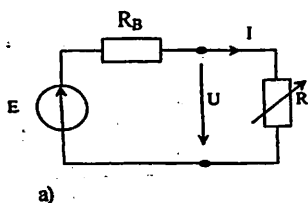
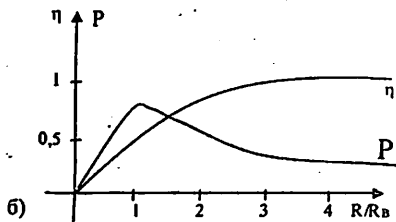


Рис.2.5. Внешняя характеристика реального источника

В простейшем случае к реальному источнику подключается сопротивление нагрузки R (рис.2.6,а).



а)



б)

Рис.2.6. Схема нагруженного реального источника (а) и его нагрузочные характеристики (б)

Ток I , напряжение U , мощность P в нагрузке R и КПД источника η определяются по формулам:

$$I = \frac{E}{R_B + R}; \quad U = RI = E \frac{R}{R_B + R}; \quad P = RI^2 = \frac{E^2 R}{(R_B + R)^2}; \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{P}{P_E} = \frac{UI}{EI} = \frac{RI^2}{(R_B + R)I^2} = \frac{R}{R_B + R} = \frac{U}{E}. \quad (2.2)$$

В режиме холостого хода источника ($R = \infty$) и в режиме короткого замыкания ($R = 0$) мощность в нагрузке $P = 0$. Максимальная мощность в сопротивлении нагрузки выделяется при согласованном режиме работы, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника ($R = R_B$).

$$P_m = E^2 / 4R. \quad (2.3)$$

При этом КПД источника будет равен $\eta = 0,5$ (50%). В связи с таким низким КПД в электротехнических установках большой мощности применяется режим работы, при котором сопротивление нагрузки много больше внутреннего сопротивления источника ($R \gg R_B$). При этом достигается высокий коэффициент полезного действия (95-99%). Согласованный режим работы широко применяется в технике проводной электросвязи, где используются малые мощности (до 10 Вт) и основное значение имеет не КПД, а безыскажённая передача сигналов на большие расстояния.

2. Предварительный расчёт

Для исследуемой цепи (рис.2.6,а) в соответствии с номером варианта задания (см. табл.2.2) необходимо рассчитать зависимости $I(R)$, $U(R)$, $P(R)$, $\eta(R)$ по формулам (2.1), (2.2).

Таблица 2.2

Исходные данные для предварительного расчёта и измерений

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E, В	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
R _н , Ом	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

Вар. №	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
E, В	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
R _н , Ом	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52	53	68

Расчёты выполнить при $R = (0,1; 0,5; 1; 1,5; 2; 4; 10) \cdot R_B$.
 Результаты предварительного расчёта свести в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

Задано:		$E = \dots В;$		$R_B = \dots Ом.$		Расчёт				Результаты измерений			
№	R	R, Ом	Расчёт				Результаты измерений						
			I, А	U, В	P, Вт	η	I, А	U, В	P, Вт	η			
1	$0,1 R_B$												
2	$0,5 R_B$												
3	R_B												
4	$1,5 R_B$												
5	$2 R_B$												
6	$4 R_B$												
7	$10 R_B$												

По результатам предварительного расчёта (см. табл.2.3) построить графики зависимостей $I(R/R_B)$, $U(R/R_B)$, $P(R/R_B)$, $\eta(R/R_B)$.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование идеального источника постоянного напряжения

Производится загрузка программы EWB; раскрывается каталог файлов папки LabOEE, загружается файл Lb2-1.ewb, при этом на дисплее монитора появляется схема рис.2.7.

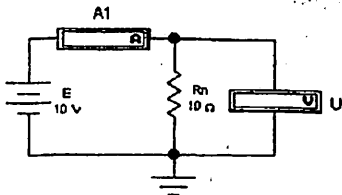


Рис.2.7. Схема исследования идеального источника постоянного напряжения

Устанавливается величина ЭДС источника напряжения E согласно номера варианта (см. табл. 2.2).

Изменяя сопротивление нагрузки R, записать в табл. 2.3 значения тока источника I (показания амперметра A1) и напряжения на зажимах источника (показания вольтметра U). По результатам измерений построить внешнюю ВАХ источника U(I).

Таблица 2.3

Исследование идеального источника напряжения

n	R, Ом	Измерено		
		U, В	Расчитано	Измерено
1	20			
2	40			
3	60			
4	80			
5	100			

3.2. Исследование идеального источника постоянного тока

Загрузить файл Lb2-2.ewb, при этом на дисплее монитора появится схема, приведённая на рис.2.8. Установить величину тока источника тока $I = 100n$ мА (n-номер варианта). Изменяя сопротивление резистора R, записать в табл.2.4 величины напряжений на зажимах источника (показания вольтметра V) и тока источника (показания амперметра A1). По результатам измерений (см. табл.2.4) построить внешнюю характеристику идеального источника тока $U(I)$.

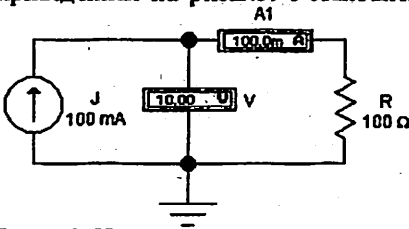


Рис. 2.8. Исследование идеального источника постоянного тока

Таблица 2.4

Исследование идеального источника тока

n	R, Ом	U, В		
		I, А	Расчитано	Измерено
1	0			
2	20			
3	40			
4	60			
5	80			
6	100			

3.3. Измерение коэффициента управления ИНУТ

Загрузить файл Lb2-3.ewb, при этом на дисплее монитора ПК появится схема, приведённая на рис.2.9.

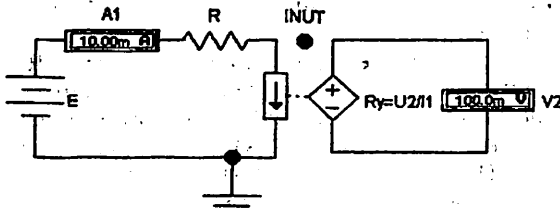


Рис. 2.9. Схема исследования ИНУТ

Изменяя сопротивление резистора R, записать в табл.2.5 значения входного тока I_1 (показания амперметра A1) и значения выходного напряжения (показания вольтметра V2).

Рассчитать сопротивление управления $R_y = U_2 I_1$ и записать в табл.2.5.

Таблица 2.5

Исследование ИНУТ

n	R_0 , Ом	I_1 , mA	U_2 , В	R_y , Ом
1	20			
2	40			
3	60			
4	80			
5	100			

По результатам измерений (см. табл.2.5) построить внешнюю характеристику ИНУТ $U_2(I_1)$. Определить среднее значение управляющего сопротивления $R_{y\text{ср}} = U_2 I_1$.

3.4. Исследование реального независимого источника

Загрузить файл Lb2-4.ewb. На рабочем поле EWB появится схема, приведённая на рис.2.10. Установить значения сопротивлений резисторов $R_1 = R_B$ согласно номера варианта (см. табл. 2.2). Включить расчёт нажатием

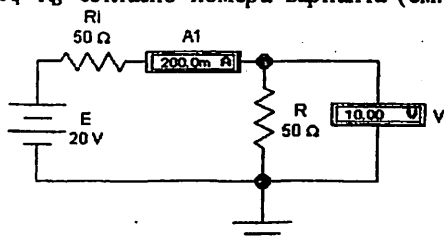




Рис. 2.10. Исследование реального источника

левой клавишей мышки на значок  , расположенный в верхнем левом углу рабочего поля дисплея монитора. Изменяя значения R , используемые в предварительном расчёте (см. таб.2.2), записать в табл.2.2. значения тока I в цепи (показания амперметра A1) и напряжения на нагрузке U (показания вольтметра V). По результатам измерений I и U рассчитать значения $P = UI$ и $\eta = U/E$ (2.4)

и занести их в таблицу 2.2, а по ним построить графики $I(R/R_B)$, $U(R/R_B)$, $P(R/R_B)$, $\eta(R/R_B)$. вместе с графиками предварительного расчёта.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Чему равно внутреннее сопротивление источника напряжения и источника тока?
- 4.2. Чем отличаются неидеальные источники электрической энергии от идеальных?
- 4.3. Как осуществить эквивалентное преобразование неидеального источника напряжения в неидеальный источник тока и обратное преобразование?
- 4.4. Какие режимы работы неидеального источника Вы знаете?
- 4.5. Что такое режим холостого хода и короткого замыкания реального источника?
- 4.6. Что такое согласованный режим реального источника и его свойства?
- 4.7. Какие типы зависимых источников в Вам известны и их применение?

3. ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА ДЛЯ ЛЭЦ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы - для разветвлённой линейной цепи постоянного тока проверить выполнение законов Кирхгофа путём моделирования на ПК

1. Теоретические сведения

Первый закон Кирхгофа – в любом узле алгебраическая сумма токов в всех ветвях, присоединённых к узлу, равна нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (3.1)$$

где n – количество ветвей, присоединённых к рассматриваемому узлу.

При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, будем брать со знаком «+», токи, направленные от узла – со знаком «-». Число уравнений по первому закону Кирхгофа на единицу меньше общего числа узлов ЭЦ.

Второй закон Кирхгофа - в любом контуре алгебраическая сумма напряжений на сопротивлениях равна алгебраической сумме ЭДС

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k, \quad (3.2)$$

где n, m – количество сопротивлений и источников ЭДС в контуре

При составлении уравнений по 2-му закону Кирхгофа обычно со знаком «+» берут напряжения $R_k I_k$, на которых направление обхода контура совпадает с направлением тока I_k , в сопротивлении R_k . В противоположном случае падения напряжения $R_k I_k$ берутся со знаком «-». ЭДС источников E_k берутся со знаком «+», если направление обхода контура совпадает с направлением стрелки этого источника. Число уравнений по 2-му закону Кирхгофа равно числу независимых контуров. Независимыми называются такие контуры, которые отличаются от других контуров хотя бы одной ветвью.

Общее число уравнений по законам Кирхгофа равно числу неизвестных токов в ЭЦ.

В лабораторной работе исследуется схема (рис.3.1,а) с двумя источниками напряжения E_1 и E_2 и схема (рис. 3.1,б) с источником напряжения E_1 и источником тока J .

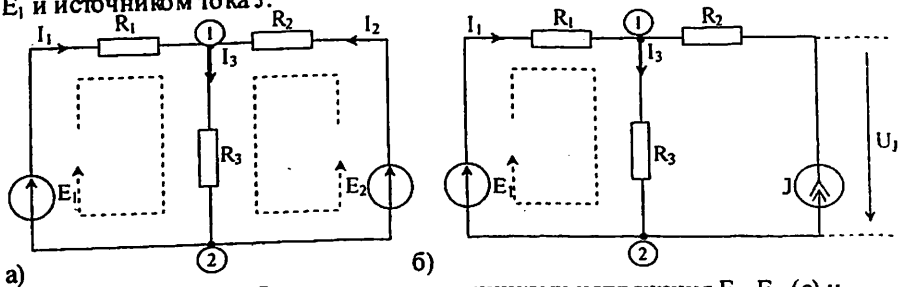


Рис.3.1. Схема с двумя источниками напряжения E_1, E_2 (а) и схема с источником напряжения E_1 и источником тока J

Для схемы рис.3.1,а токи в ветвях I_1, I_2, I_3 могут быть определены из решения системы уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1; \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2. \end{cases} \quad (3.3)$$

Откуда $I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$; $I_2 = \frac{E_2(R_1 + R_3) - E_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$; $I_3 = I_1 + I_2$. (3.4), (3.5), (3.6)

Напряжения на сопротивлениях цепи соответственно равны

$$U_1 = R_1 I_1; \quad U_2 = R_2 I_2; \quad U_3 = R_3 I_3. \quad (3.7)$$

Для схемы рис.3.1,б токи в ветвях можно определить из решения системы уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1 + J - I_3 = 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 = E. \end{cases} \quad (3.8)$$

Откуда $I_1 = \frac{E - R_3 J}{R_1 + R_3}$; $I_3 = \frac{E_1 + R_1 J}{R_1 + R_3}$. (3.9), (3.10)

Напряжение на сопротивлениях цепи

$$U_1 = R_1 I_1; \quad U_2 = R_2 J; \quad U_3 = R_3 I_3; \quad (3.11)$$

Напряжение на зажимах источника тока J

$$U_J = U_2 + U_3 = R_2 J + R_3 I_3. \quad (3.12)$$

Правильность расчёта токов в можно определить из решения уравнения

$$\text{баланса мощностей} \quad \Sigma P_{\text{пр}} = \Sigma P_{\text{ист}},$$

где $\Sigma P_{\text{ист}}$ – алгебраическая сумма мощностей источников;

$\Sigma P_{\text{пр}}$ – сумма мощностей приёмников.

Для первой схемы (см. рис.3.1,а) уравнение баланса мощностей имеет вид:

$$R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = E_1 I_1 + E_2 I_2. \quad (3.13)$$

Для второй схемы (см. рис.3.1,б)

$$R_1 I_1^2 + R_2 J^2 + R_3 I_3^2 = E_1 I_1 + U_J J, \quad (3.14)$$

где $U_J = R_2 J + R_3 I_3$ – напряжение на зажимах источника токов J.

2. Предварительный расчёт

Для схемы, приведённой на рис.3.1,а, по заданному варианту исходных данных (см. табл. 3.1), рассчитать значения токов в ветвях I_1, I_2, I_3 по формулам (3.4) - (3.6) и напряжение на сопротивлениях цепи U_1, U_2, U_3 по формулам (3.7). Проверить правильность расчёта токов из решения уравнения баланса мощностей. (3.13). Результаты предварительного расчёта занести в таблицу 3.2.

Для схемы рис.3.1,б по заданному варианту исходных данных (см. табл.3.1) рассчитать токи в ветвях I_1, I_2 по формулам (3.9), (3.10) и напряжение на сопротивлениях U_1, U_2, U_3 по формулам (3.11), напряжение на зажимах источника тока U_J по формуле (3.12). Проверить правильность расчёта токов из

решения уравнения баланса мощностей (3.14). Результаты предварительного расчёта занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.1

Исходные данные для предварительного расчёта

№ вар.	E_1	E_2	J	R_1	R_2	R_3
	В	В	мА	Ом	Ом	Ом
1	3	6	50	30	50	20
2	6	9	40	60	20	30
3	9	12	30	80	30	40
4	12	15	40	30	100	25
5	15	12	50	60	70	20
6	20	9	40	90	30	20
7	25	6	70	100	50	40
8	30	9	60	50	70	30
9	35	15	80	70	30	25
10	40	20	90	75	25	40
11	6	3	30	50	90	50
12	9	6	60	40	100	40
13	12	9	80	30	50	70
14	15	12	30	40	70	60
15	12	15	60	50	75	80
16	9	20	90	40	50	90
17	6	25	100	70	40	30
18	9	30	50	60	30	60
19	40	12	70	50	20	25
20	6	15	60	40	30	20
21	9	12	80	30	100	20
22	12	9	90	40	70	40
23	9	12	70	50	100	30
24	12	15	60	70	50	60
25	15	20	80	75	70	25

Таблица 3.2

Результаты предварительного расчёта и измерений

Вариант №.....		$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$
Схема рис. 3.1,а	Расчитано						
	Измерено						
	б, %						
Схема рис. 3.1,б	Расчитано						
	Измерено						
	б, %						
$E_1 = \dots \text{В}; E_2 = \dots \text{В}; J = \dots \text{мА}; R_1 = \dots \text{Ом}; R_2 = \dots \text{Ом}; R_3 = \dots \text{Ом}$							

3. Выполнения работы

3.1. Исследование схемы с двумя источниками напряжения

Производится загрузка программы EWB. Раскрывается папка файлов ЛБОЕЕ-3
Загружается файл Lb3-1, в результате на дисплее монитора появляется схема,

приведённая на рис. 3.2. Установить параметры элементов цепи (E_1 , E_2 , R_1 , R_2 , R_3) согласно исходным данным вариантам задания (см. табл.3.1).

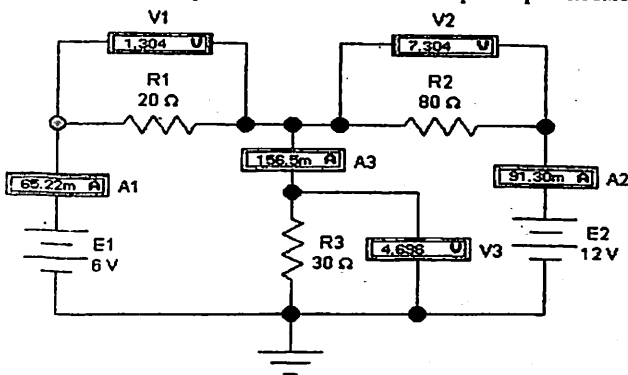


Рис 3.2. Схема с двумя источниками напряжения E_1 и E_2

Выполнить запуск расчёт, нажатием мышью выключателя (кнопки) в правом верхнем углу экрана монитора).

После установления показаний вольтметров и амперметров приостановить расчёт путём нажатия мышью кнопки Pause, расположенной ниже кнопки .

Значения токов в ветвях I_1 , I_2 , I_3 определяются по показаниям амперметров A_1 , A_2 , A_3 - напряжений на сопротивлениях U_1 , U_2 , U_3 - вольтметров V_1 , V_2 , V_3 .

Результаты изменений занести в табл.3.2.

Относительная погрешность измерений токов и напряжений определяется по формуле

$$\delta = (A_p - A_{из}) / A_p \quad (3.15)$$

где A_p – рассчитанная величина тока или напряжения;
 $A_{из}$ – измеренная величина тока или напряжения.

3.2. Исследование схемы с независимыми источником напряжения и источником тока

Загружается файл **Lb3-2**, в результате на дисплее монитора появляется схема, приведённая на рис.3.3.

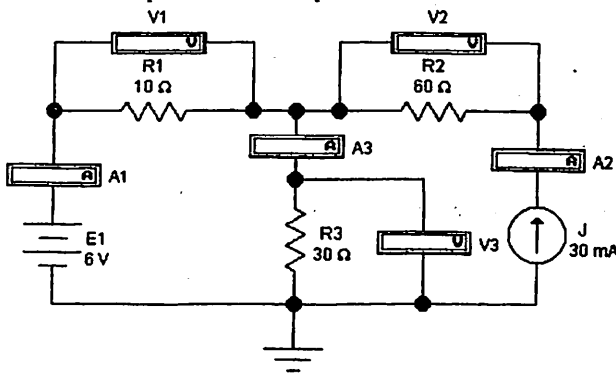
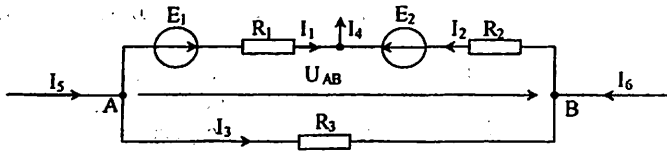


Рис 3.3. Схема с источником напряжения E_1 и источником тока J

Устанавливаются параметры цепи (E_1 , J , R_1 , R_2 , R_3) согласно требуемого варианта задания (см. табл.3.1). Запустить расчёт схемы. Результаты измерений заносятся в таблицу 3.2.

4. Контрольные вопросы

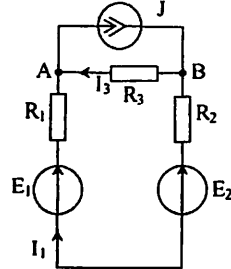
- 4.1. Какие основные топологические понятия используются в ТЭЦ?
- 4.2. Для чего применяются законы Кирхгофа в ЭЦ?
- 4.3. Что называется ветвью, узлом и контуром в ЭЦ?
- 4.4. Как формулируется первый закон Кирхгофа для ЭЦ?
- 4.5. Сколько уравнений необходимо составить по первому закону Кирхгофа?
- 4.6. Как формулируется второй закон Кирхгофа?
- 4.7. Сколько уравнений необходимо составить по второму закону Кирхгофа?
- 4.8. Какой контур ЭЦ называется независимым?
- 4.9. Какое общее количество уравнений необходимо составить по законам Кирхгофа?
- 4.10. Как определяется мощность, отдаваемая источнику напряжения?
- 4.11. Как определяется мощность, отдаваемая источнику тока?
- 4.12. Как определяется мощность, потребляемая в сопротивлении?
- 4.13. Что такое баланс мощностей в ЭЦ?
- 4.14. Для чего используется уравнение баланса мощностей в ЭЦ?
- 4.15. Для заданной схемы определить напряжение U_{AB} , если $E_1=10$ В; $E_2=20$ В; $R_1=10$ Ом; $R_2=20$ Ом; $I_1=0,7$ А; $I_2=1,3$ А.



4.16. Для заданной цепи составить систему уравнений по законам Кирхгофа.

Параметры цепи: $E_1=80$ В; $E_2=20$ В; $J=1$ А; $R_1=10$ Ом; $R_2=20$ Ом; $R_3=30$ Ом.

- 4.17. Для схемы (п.4.16) определить токи в ветвях методом наложения.
- 4.18. Для схемы (п.4.16) составить уравнение баланса мощностей.
- 4.19. Для схемы (п.4.16) определить напряжение U_{AB} .
- 4.20. В схеме (п.4.15) определить все токи: I_3, I_4, I_5 .



4. ИССЛЕДОВАНИЕ RL- И RC-ЦЕПЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Цель работы - изучить цепь, содержащую последовательное соединение сопротивления и индуктивности (ёмкости) при установившемся гармоническом режиме на разных частотах, освоить построение векторно-диаграммы и треугольников напряжений, сопротивлений и мощностей.

1. Теоретические сведения

1.1. Свойства последовательной RL-цепи при гармоническом напряжении

В общем случае напряжение на входе RL-цепи (рис 4.1, а)

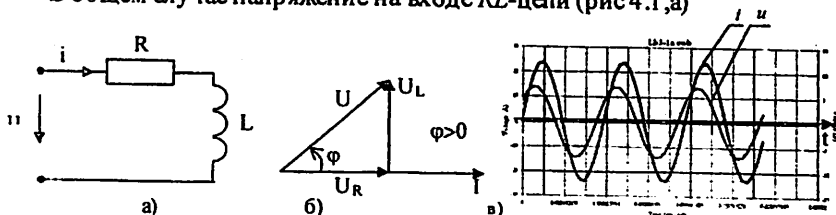


Рис. 4.1. Схема RL-цепи (а), векторная диаграмма (б), кривые мгновенных значений тока и напряжения на входе (в).

равно сумме мгновенных значений напряжений на её элементах (сопротивлении R и индуктивности L) $u = u_R + u_L$
(4.1)

При установившемся гармоническом режиме напряжение на входе RL-цепи (рис.4.1, а) $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$,
(4.2)

ток и напряжения на сопротивлении и индуктивности также будут изменяться по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (4.3)$$

$$u_L = \omega LI_m \cos(\omega t + \psi_i) = X_L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ), \quad (4.4)$$

где $U_{Rm} = RI_m$ - амплитудное значение напряжения на сопротивлении R; $U_{Lm} = \omega LI_m = X_L I_m$ - амплитудное значение напряжения на индуктивности L; $X_L = \omega L$ - индуктивное сопротивление.

Из (4.3) видно, что напряжение на сопротивлении u_R совпадает по фазе с током i . Из (4.4) видно, что напряжение на индуктивности u_L опережает по фазе ток i на 90° (см. рис.4.1, б). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи RL приведены на рис. 4.1 б.

Подставляя (4.2), (4.3), (4.4) в (4.1), получим

$$\begin{aligned} U_m \sin(\omega t + \psi_u) &= RI_m \sin(\omega t + \psi_i) + X_L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = Z I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ - полное сопротивление цепи; (4.6)

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg(\omega L / R) = \arctg(X_L / R) = \arctg(U_L / U_R). \quad (4.7)$$

Из (4.5) определяем амплитуду и начальную фазу входного тока

$$U_m = Z I_m \text{ откуда } I_m = U_m / Z, \quad (4.8)$$

$$\omega t + \psi_u = \omega t + \psi_i + \varphi \text{ откуда } \psi_i = \psi_u - \varphi, \quad (4.9)$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (4.10)$$

Разделив амплитудные значения на $\sqrt{2}$, получим выражения для действующих значений напряжений:

$$U_R = RI; \quad U_L = X_L I; \quad U = ZI = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}. \quad (4.11)$$

На рис.4.3 приведены графики частотных характеристик действующих значений напряжений на сопротивлении U_R , (рис.4.2,а), индуктивности U_L (рис.4.2,б) и сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$ (рис.4.2,в).

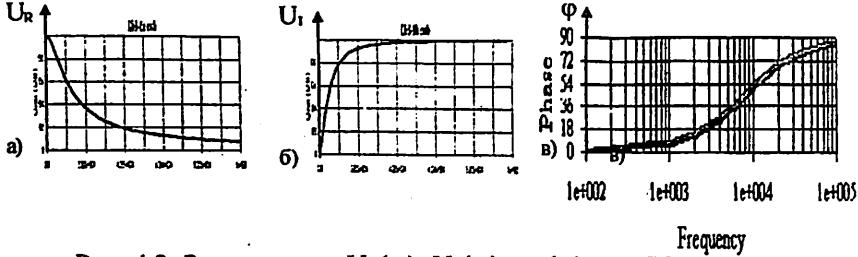


Рис. 4.2. Зависимости $U_R(\omega)$, $U_L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для RL-цепи

1.2. Свойства последовательной RC-цепи при гармоническом токе

Напряжение на входе последовательной RC-цепи (рис.4.3,а) равно сумме мгновенных значений напряжений на её элементах $u = u_R + u_C$ (4.12)

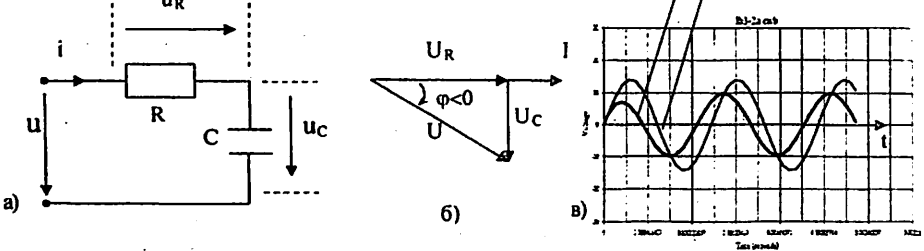


Рис.4.3. RC-цепь (а), векторная диаграмма напряжений и тока (б), временная диаграмма напряжения и тока на входе RC-цепи (в).

При установившемся гармоническом режиме напряжение на входе RC-цепи (рис.4.3,а)

$$(4.13)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

ток и напряжения на сопротивлении и ёмкости также будут изменяться по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u_R = Ri = R I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (4.14)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi_i) = -X_C I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ), \quad (4.15)$$

где $U_{Rm} = RI_m$ - амплитудное значение напряжения на R;
 $U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} I_m = X_C I_m$ - амплитудное значение напряжения на ёмкости C;
 $X_C = 1/\omega C$ - ёмкостное сопротивление.

Из (4.14) видно, что напряжение на сопротивлении u_R совпадает по фазе с током i , напряжение на ёмкости u_C отстаёт по фазе от тока i на 90° (см. рис.4.3,б). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи RC приведены на рис.4.3,б.

Подставляя (4.13), (4.14), (4.15) в (4.12), получим

$$U_m \sin(\omega t + \psi_u) = RI_m \sin(\omega t + \psi_i) - X_C I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ = \sqrt{R^2 + X_C^2} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = Z I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \quad (4.16)$$

$$\text{где } Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2} - \text{полное сопротивление цепи}; \quad (4.17)$$

$$\varphi = -\arctg(1/\omega RC) = -\arctg(X_C/R) = -\arctg(U_C/U_R). \quad (4.18)$$

Из (4.16) определяем амплитуду и начальную фазу тока

$$U_m = Z I_m \text{ откуда } I_m = U_m/Z, \quad (4.19)$$

$$\omega t + \psi_u = \omega t + \psi_i + \varphi \text{ откуда } \psi_i = \psi_u - \varphi, \quad (4.20)$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Разделив амплитудные значения напряжений (ток i) на $\sqrt{2}$, получим соответствующие выражения для действующих значений напряжений $U_R = RI$;

$$U_C = X_C I; \quad U = Z I = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}, \quad (4.21)$$

$$\text{где } Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = - \text{полное сопротивление RC-цепи}. \quad (4.22)$$

На рис. 4.4. приведены графики частотных характеристик действующих значений напряжений U_R, U_C и сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

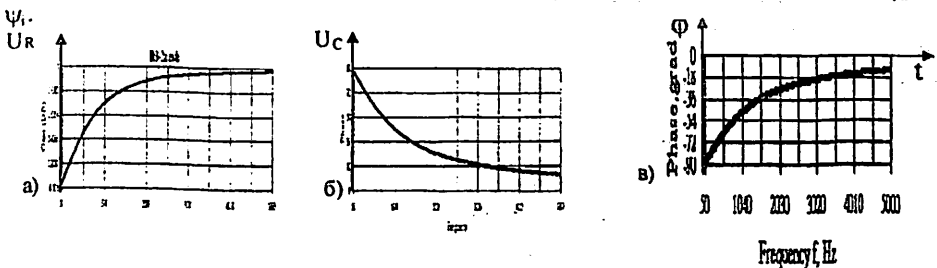


Рис. 4.4. Графики $U_R(\omega)$, $U_C(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.

Активная P , реактивная Q и полная S мощности для обеих схем (рис.4.1, а и рис.4.2, а) определяются по формулам:

$$P = RI^2 = UI \cos \varphi, \text{ Вт}; \quad Q = XI^2 = UI \sin \varphi, \text{ ВАР}, \quad S = ZI^2 = UI, \text{ ВА} \quad (4.23)$$

Необходимо учесть, что в формуле (4.23) для RL-цепи реактивное сопротивление

$$X = X_L = \omega L. \quad (4.24)$$

$$\text{Для RC-цепи реактивное сопротивление } X = -X_C = -1/\omega C. \quad (4.25)$$

2. Предварительный расчёт

Для заданного варианта параметров RL - или RC -цепи (рис.4.1,а), (рис.4.3,а), приведённого в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные для предварительного расчёта и эксперимента

ВариантN	L, мГн	C, нФ	ВариантN	L, мГн	C, нФ
1	10		11	60	
2		100	12		50
3	20		13	70	
4		90	14		40
5	40		15	80	
6		80	16	90	40
7	40		17		20
8		70	18		20
9	50		19	100	
10		60	20		10

Для RL -цепи (рис.4.1,а) при $R=1$ кОм и действующем значении напряжения на входе цепи $U=2N, В$ (N -номер варианта) выполнить расчёт напряжений на индуктивности U_L и сопротивлении U_R по формулам (4.11) на частотах

$$f = (0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,4) \cdot f_r, \quad (4.25)$$

где $f_r = R/2\pi L$ – частота, на которой индуктивное сопротивление равно резистивному ($X_L = R$). Сдвиг фаз ϕ между напряжением и током i рассчитывается по формуле (4.7).

На частоте f_r рассчитать активную $P(f_r)$, реактивную $Q(f_r)$ и полную $S(f_r)$ мощности. Результаты всех расчётов занести в табл. 4.2.

На частоте f_r построить векторную диаграмму для тока, напряжений и треугольник мощностей. По результатам предварительного расчёта и измерений построить графики $U_R(f/f_r)$, $U_L(f/f_r)$ и $\phi(f/f_r)$, аналогичные рис.4.2.

Таблица 4.2

Результаты предварительного расчёта и измерений для RL -схемы

f	f, кГц	Предварительный расчёт			Измерения		
		$U_R, В$	$U_L, В$	$\phi, град$	$U_R, В$	$U_L, В$	$\phi, град$
0,2 f_r							
0,5 f_r							
1,0 f_r							
1,5 f_r							
2,0 f_r							
4,0 f_r							
10 f_r							

$U = \dots$, $R = \dots$, $L = \dots$, $f_r = \dots$; $P(f_r) = \dots$; $Q(f_r) = \dots$; $S(f_r) = \dots$

Для RC-цепи (рис.4.3 а) рассчитать действующие значения напряжений на ёмкости U_C и сопротивлении U_R по формулам (4.21) на частотах (4.25), где $f_r = 1/2\pi RC$ - частота, на которой ёмкостное сопротивление равно сопротивлению резистора $X_C = R$.

Сдвиг фаз между напряжением и током определяется по формуле (4.17). Результаты расчёта U_R , U_C , ϕ на разных частотах занести в табл. 4.3. По результатам предварительного расчёта и измерений построить графики частотных характеристик напряжений $U_R(f/f_r)$, $U_C(f/f_r)$ и $\phi(f/f_r)$, аналогичные частотным характеристикам, приведённым на рис.4.3 и рис.4.4.

Таблица 4.3

Результаты предварительного расчёта и измерений для RC- схемы

f	f, кГц	Предварительный расчёт			Измерения		
		$U_R, В$	$U_C, В$	ϕ , град	$U_R, В$	$U_C, В$	ϕ , град
$0,2f_r$							
$0,5f_r$							
$1,0f_r$							
$1,5f_r$							
$2,0f_r$							
$4,0f_r$							
$10f_r$							

$U = \dots, R = \dots, C = \dots, f_r = \dots; P(f_r) = \dots; Q(f_r) = \dots; S(f_r) = \dots$

По результатам предварительного расчёта построить графики частотных характеристик напряжений: $U_R(f/f_r)$, $U_L(f/f_r)$, $U_C(f/f_r)$ и $\phi(f/f_r)$, аналогичные частотным характеристикам, представленным на рис.4.3 и рис.4.4.

На частоте f_r рассчитать активную $P(f_r)$, реактивную $Q(f_r)$ и полную мощность $S(f_r)$. Результаты расчётов занести в табл. 4.3.

На частоте f_r построить векторную диаграмму для тока, напряжений и треугольник мощностей.

3. Выполнение работы

3.1. Исследование RL-цепи

Производится загрузка программы Electronics Workbench (EWB). Раскрывается папка LabRab4. Загружается файл Lb4_1, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис. 4.5. Производится переустановка параметров элементов RL- цепи в соответствии с вариантом (см. табл. 4.1), т.е. устанавливаются параметры цепи, которые использовались в предварительном расчёте.

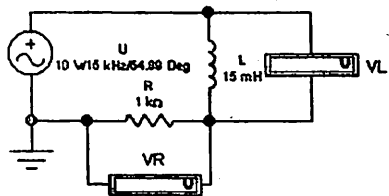


Рис.4.5. Схема исследования RL-цепи

Установить первую частоту генератора. Запустить схему на расчёт. После установления процесса расчёта записать в табл. 4.2 значения

напряжений на сопротивлении U_R (показание вольтметра VR) и на индуктивности U_L (показание вольтметра VL). Сдвиг фаз между входным напряжением и током можно определить по формуле $\varphi = \arctg U_L/U_R$.

Повторить измерения на всех требуемых частотах.

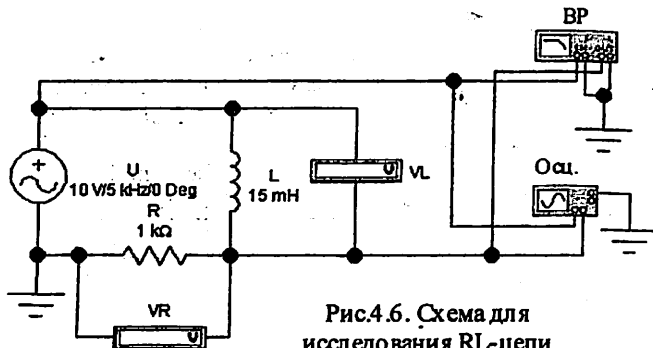


Рис.4.6. Схема для исследования RL-цепи

Сдвиг фаз между входным напряжением и током φ RL-цепи может быть измерен с помощью измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Bode Plotter (BP). Для этого загружается файл

Lb4-2, в результате чего на рабочем поле EWB появляется схема, приведённая на рис 4.6. Раскройте переднюю панель BP. После соответствующей настройки, на экране BP появится изображение ФЧХ $\varphi(f) = \psi_c - \psi_i$, аналогичного тому, что приведено на рис. 4.4,в. Установив курсор мыши у левого края экрана BP, нажать левую клавишу мыши и не отпуская её, перетащить вертикальную визирную линию на ту частоту, на которой требуется выполнить измерение φ . Результаты измерений $\varphi(f)$ занести в табл. 4.2.

Для измерения мгновенных значений входного напряжения $u(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$, закрыть переднюю панель BP. Далее открыть переднюю панель двухканального осциллографа (Osc.). Установить частоту генератора $f = f_r$. Включить схему на расчёт. С экрана осциллографа срисовать $u(t)$ и $u_R(t)$, которые имеют вид, приведённый на рис.4.1,в.

3.2. Исследование RC-цепи

Загрузить файл Lb4-3, при этом на рабочем поле EWB появится схема

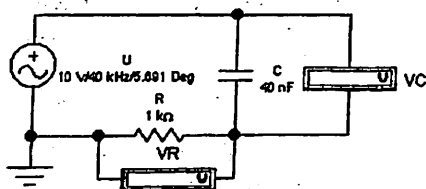


Рис.4.7. Схема измерения АЧХ RC-цепи

рис.4.7. Установить параметры RC-цепи. Измерить U_R, U_C на требуемых частотах, аналогично п.3.1. Сдвиг фаз между входным напряжением и током определить по формуле $\varphi = -\arctg (U_C/U_R)$.

Результаты измерений занести в табл. 4.3.

Сдвиг фаз между входным напряжением и током φ RC-цепи может быть измерен с помощью ИЧХ BP. Для измерения сдвига фаз φ между входным напряжением и током RC-цепи загружается файл Lb4-2, в результате чего на рабочем поле EWB появляется схема рис.4.6. Заменить L на

С. Установить значения параметров R и C. После чего необходимо раскрыть переднюю панель ВР и выполнить измерения $\varphi(f)$ на заданных частотах, аналогично п.3.1.

Исследование мгновенных значений $u = u(t)$ и $u_R = u_R(t)$ выполняются аналогично описанному выше (см. п.3.1).

4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Электрические схемы исследуемых цепей и параметры их элементов.
- 4.3. Предварительный расчёт.
- 4.4. Таблица результатов предварительного расчёта и компьютерного эксперимента.
- 4.5. Графики частотных характеристик $U_R(f/f_r)$, $U_L(f/f_r)$, $U_C(f/f_r)$, и $\varphi(f/f_r)$, полученные путём расчёта и моделирования.
- 4.6. Графики мгновенных значений $u(t)$, $u_R(t)$ на частоте f_r .
- 4.7. Расчёт активной P, реактивной Q и полной мощности S на частоте f_r .
- 4.8. Построить треугольник мощностей на частоте f_r .
- 4.9. Выводы из результатов расчёта и моделирования на ПЭВМ.

5. Контрольные вопросы и задачи

- 5.1. Найти напряжение U_R на сопротивлении $R=10$ Ом, если через него протекает ток $i=1,41 \sin(\omega t - \pi/6)$ А.
- 5.2. Найти напряжение U_L на индуктивности $L=1,0$ мГн, если через неё протекает ток (см. п.5.1) и $\omega = 1000$ рад/с?
- 5.3. Чему равны комплексные амплитудные и комплексные действующие значения тока I и напряжения на сопротивлении U_R (см. п.5.1) и на индуктивности U_L (см. п.5.2)?
- 5.4. Чему равно напряжение на сопротивлении U_R в момент времени $t=1$ мс (см. п.5.1), если $\omega = 1000$ рад/с?
- 5.6. В какой ближайший к нулю момент времени ток в цепи $i=14,1 \sin(1000t - \pi/6)$ А равен нулю?
- 5.7. Чему равно действующее значение напряжения на входе последовательной RL-цепи, если $U = 40$ В, $U_R = 40$ В?
- 5.8. Чему равно действующее значение напряжения на индуктивности U_L в последовательной RL-цепи, если $U = 50$ В, $U_R = 40$ В?
- 5.9. Чему равен сдвиг фаз φ между напряжением u и током i на входе последовательной RL-цепи (см. п.5.7)?
- 5.10. Чему равно полное сопротивление Z последовательной RL-цепи при $R=40$ Ом, $X_L=40$ Ом?
- 5.11. Комплексные действующие значения тока и напряжения на некотором участке цепи определяются следующими выражениями
$$\underline{I} = (5+j5) \text{ А} \text{ и } \underline{U} = (20-j20) \text{ В}.$$
Записать выражения для мгновенных значений тока и напряжения и найти комплексное сопротивление этого участка цепи.
- 5.12. Комплексный ток и напряжение на зажимах пассивного двухполюсника соответственно равны $\underline{I} = (10 + j10) \text{ А}$ и $\underline{U} = (200 - j100) \text{ В}$.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КонтУРЕ

Цель работы - теоретическое и экспериментальное исследование частотных характеристик последовательного колебательного контура и влияние на них внутреннего сопротивления генератора и сопротивления нагрузки.

1. Теоретические сведения

Для последовательного колебательного контура (рис 5.1, а) на основании

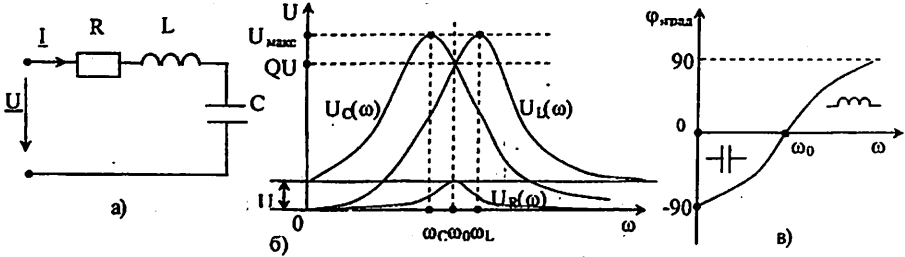


Рис. 5.1. Схема последовательного колебательного контура (а), его АЧХ (б) и ФЧХ (в)

второго закона Кирхгофа для комплексных действующих значений напряжений можно записать

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \underline{R}\underline{I} + j\omega L\underline{I} - j(1/\omega C)\underline{I} = [R + j(\omega L - 1/\omega C)]\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}.$$

Комплексное действующее значение тока в цепи $\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z}$, (5.1)

где $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I} = R + j(\omega L - 1/\omega C) = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi}$ (5.2)

ко комплексное сопротивление контура;

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \quad (5.3)$$

- полное сопротивление контура;

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i = \arctg X/R = \arctg (X_L - X_C)/R = \arctg (\omega L - 1/\omega C)/R \quad (5.4)$$

- сдвиг фаз между напряжением и током;

- $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$ – индуктивное и емкостное сопротивление.

При резонансе напряжений (РН) $\varphi = 0$, что возможно, когда реактивное сопротивление контура равно нулю

$$X = X_L - X_C = \omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0, \quad (5.5)$$

откуда резонансная угловая частота $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. (5.6)

Угловой частоте ω_0 соответствует частота резонанса $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ (5.7)

На резонансной частоте индуктивное сопротивление равно емкостному и равно характеристическому сопротивлению контура

$$X_{L0} = X_{C0} = \omega_0 L = 1/\omega_0 C = L/\sqrt{LC} = \sqrt{L/C} = \rho = R_c.$$

Величина $\rho = R_c = \sqrt{L/C}$ носит название характеристического сопротивления колебательного контура.

При РН сопротивление контура минимально, имеет чисто резистивный характер $Z_0 = R$, а ток в контуре – максимален $I_0 = U/R$.

Важнейшим параметром последовательного колебательного контура является его добротность $Q = \rho/R = \sqrt{LC}/R$. (5.8)

Добротность показывает во сколько раз при РН напряжение на реактивных элементах L и C превышает входное напряжение U Действительно

$$U_{L0}/U = U_{C0}/U = I_0 \omega_0 L/U = (I_0/\omega_0 C)/U = \rho/R = Q. \quad (5.9)$$

Величина d, обратная добротности, называется затуханием колебательного контура $d=1/Q$. (5.10)

Зависимость действующего значения тока в контуре от частоты определяется выражением $I(\omega) = U/Z$. (5.11)

Зависимости $I(\omega)$, $U_R(\omega)$, $U_L(\omega)$ и $U_C(\omega)$ называются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) или резонансными характеристиками. Они определяются по формулам

$$U_R(\omega) = RI(\omega); U_L(\omega) = X_L I(\omega); U_C(\omega) = X_C I(\omega). \quad (5.12)$$

На рис. 5.1,б изображены АЧХ, определяемые выражениями (5.12) и на рис. 5.1 в – ФЧХ $\varphi(\omega)$, определяемая по формуле (5.4).

Анализ зависимости $U_R(\omega)$ показывает, что напряжение на сопротивлении $U_R(\omega)$ имеет максимальное значение на резонансной частоте ω_0 и равно входному напряжению $U_{R0}=U$.

Напряжения на индуктивности и емкости при резонансе равны между собой и в Q раз больше входного напряжения (см. рис. 5.2,б)

$$U_{L0} = U_{C0} = \rho I_0 = \rho (U/R) = QU. \quad (5.13)$$

Максимальные значения напряжений на ёмкости и индуктивности равны между собой и немного больше резонансного

$$U_{C\max} = U_{L\max} = \frac{QU}{\sqrt{1-1/4Q^2}} \quad (5.14)$$

и получаются на частотах (см. рис.5.2,б):

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1-1/2Q^2}; \quad \omega_L = \omega_0 / \sqrt{1-1/2Q^2}. \quad (5.15)$$

С увеличением добротности Q частоты ω_C и ω_L приближаются к резонансной частоте ($\omega_C \approx \omega_L \approx \omega_0$) и максимальные значения напряжения на ёмкости и индуктивности приближаются к их резонансному значению

$$U_{L\max} = U_{C\max} \approx QU. \quad (5.16)$$

Степень отклонения частоты генератора ω от резонансной частоты колебательного контура ω_0 принято оценивать тремя видами расстройк:

- абсолютной $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, (5.17)

- относительной $\delta = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0$, (5.18)

- обобщённой $\xi = X/R = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = (\omega_0 L/R)(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega) = Q(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)$. (5.19)

При небольших абсолютных расстройках $\Delta f = f - f_0$, обобщённая расстройка может быть определена по приближённой формуле $\xi \approx 2Q \Delta f / f_0$.

Наиболее широко в теоретических исследованиях применяется обобщённая расстройка ξ , т.к. её использование существенно упрощает расчёт. Например, выражение для АЧХ тока (5.11) и сдвига фаз между входными напряжением и током можно записать через обобщённую расстройку в виде:

$$I = \frac{U}{R\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1+\xi^2}}; \quad \varphi = \arctg \xi. \quad (5.20)$$

Важной характеристикой колебательного контура является его полоса пропускания (ПП), под которой понимается область частот вблизи резонанса, где ток в контуре имеет значение не меньше $1/\sqrt{2}$ максимального значения I_0 (рис.5.2). На граничных частотах ПП выполняется условие:

$$n(\xi) = I/I_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (5.21)$$

откуда

$$\xi_{1,2} = X/R = \pm 1. \quad (5.22)$$

Таким образом, на границах ПП реактивное сопротивление (по абсолютной величине) равно активному (резистивному) сопротивлению.

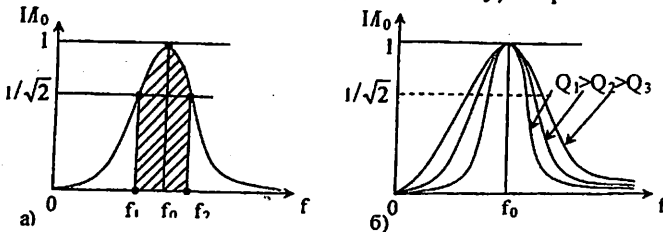


Рис.5.2. К определению ПП колебательного контура (а), зависимость формы резонансной кривой от добротности (б).

Из решения уравнения $\xi_{1,2} = Q(f/f_0 - f_0/f) = \pm 1$,

получим формулы для определения граничных частот ПП f_1 и f_2 .

$$f_{1,2} = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} \mp \frac{1}{2Q} \right) \approx f_0(1 \pm 1/2Q). \quad (5.23)$$

Абсолютная ширина ПП (см. рис. 5.2.) колебательного контура

$$S_a = f_2 - f_1 = f_0/Q = df_0, \quad (5.24)$$

относительная ширина ПП. $S_0 = (f_2 - f_1)/f_0 = 1/Q = d.$

$$(5.25)$$

Уравнение (5.24) используется для экспериментального определения добротности колебательного контура по измеренным значениям резонансной частоты f_0 и абсолютной ширине ПП $f_2 - f_1$.

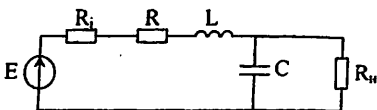


Рис. 5.3. Схема подключения колебательного контура к источнику и нагрузке

Добротность контура снижает внутреннее сопротивление источника (генератора) сигнала R_i (рис. 5.3) и сопротивление нагрузки R_n , подключённое параллельно ёмкости (рис.5.3), либо индуктивности. При $R_n \gg \rho$ эквивалентная добротность колебательного контура с учётом

влияния R_i и R_n определяется по формуле $Q_s = \rho / (R + R_i + \rho^2 / R_n).$

2. Предварительный расчёт

2.1. Для заданных параметров R, L, C (рис.5.1а) (см. табл. 5.1) рассчитать резонансную частоту f_0 , характеристическое сопротивление ρ , добротность Q , затухание d и абсолютную ширину ПП. Результаты расчёта занести в табл. 5.2

Таблица 5.1

Исходные данные для предварительного расчёта и моделирования.

Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом	Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом
1	10	50	10	11	15	40	30
2	20	60	20	12	25	50	35
3	30	70	30	13	35	60	40
4	40	80	40	14	45	70	45
5	50	90	50	15	55	80	50
6	60	100	60	16	65	90	60
7	70	40	70	17	75	60	70
8	80	30	80	18	85	40	80
9	90	20	90	19	95	30	90
10	100	10	100	20	110	20	100

Таблица 5.2

Параметры колебательного контура

L=.....;	C=.....;	R=.....;
f_0 =.....;	ρ =.....;	Q=.....;
D=.....;	$S_a=f_2-f_1$ =.....;	
При $R_i=0,5R$; $R_n=50$ кОм; Q_3 =.....; d_3 =.....; S_{a3} =.....		

2.2. Рассчитать эквивалентную добротность Q_3 , затухание d_3 и абсолютную ширину ПП S_{a3} колебательного контура, если он подключен к генератору с внутренним сопротивлением $R_i = 0,5R$ и параллельно емкости подключена нагрузка с сопротивлением $R_n = 50$ кОм (см. рис.5.2). Результаты расчёта занести в табл. 5.2.

Рассчитать частотные характеристики $U_R(f), U_L(f), U_C(f), \varphi(f)$ по формулам (5.4), (5.12) на частотах $f = f_0 \pm k\Delta f$, где $\Delta f = f - f_0 = f_0/2Q$, где $\Delta f = f_0/2Q; k=0; 1; 2; 3$. Результаты расчёта занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

№	Результаты измерений					Предварительный расчёт			
	f	U_R/U	U_L/U	U_C/U	φ	U_R/U	U_L/U	U_C/U	φ
	кГц				град.				град.
1	$f_0 - 3\Delta f$								
2	$f_0 - 2\Delta f$								
3	$f_0 - \Delta f$								
4	f_0								
5	$f_0 + \Delta f$								
6	$f_0 + 2\Delta f$								
7	$f_0 + 3\Delta f$								

2. Выполнение работы

3.1. Измерение АЧХ и ФЧХ RLC-цепи (рис. 5.1,а) с помощью вольтметров
 Загрузить систему EWB. Раскрыть папку LbOEE-5. Загрузить файл Lb5-1, при этом на дисплее монитора ПК появляется схема рис.5.4. Выполнить пере-

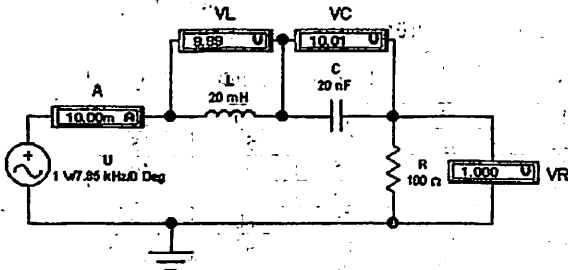


Рис.5.4. Схема исследования последовательного RLC-контура

установку параметров элементов RLC-цепи согласно варианту (см. табл. 5.1). Включить расчёт. Определить (экспериментально) резонансную частоту f_0 контура. Для этого, изменяя частоту генератора (при $U_L > U_C$ частоту- уменьшить) добиться равенства напряжений на индуктивности и ёмкости (одинаковые показания вольтметров V1 и V2). Записать значение экспериментально измеренной резонансной частоты f_0 , напряжения на индуктивности и ёмкости при резонансе U_{L0} , U_{C0} и ток при резонансе I_0 .

Устанавливая частоту генератора, согласно табл. 5.3, измерить действующие напряжения на индуктивности U_L , ёмкости U_C сопротивлению U_R и ток в цепи I .

Сдвиг фаз между входным напряжением и током рассчитать по формуле

$$\varphi = \arctg \left(\frac{U_L - U_C}{U_R} \right).$$

Результаты измерений занести в табл. 5.3.

3.2. Измерение АЧХ и ФЧХ с помощью измерителя частотных характеристик Bode Plotter

Используя ИЧХ Bode Plotter (BP), можно наблюдать АЧХ $H_R(f) = U_R/U$, ФЧХ $\varphi(f) = |\Psi_u - \Psi_i|$ в заданном диапазоне частот.

Для измерения АЧХ и ФЧХ RLC-цепи загружается файл Lb5-2, в результате чего на рабочем поле EWB появляется схема, приведённая на рис 5.5. Два раза щёлкнув левой клавишей мыши по изображению BP, раскроем его переднюю панель. После установки диапазона изменения частоты и фазы на экране монитора ПК появится изображение АЧХ (при нажатой кнопке **Magnitude**) (рис.5.6) или ФЧХ (при нажатой кнопке **Phase**) (рис.5.7).

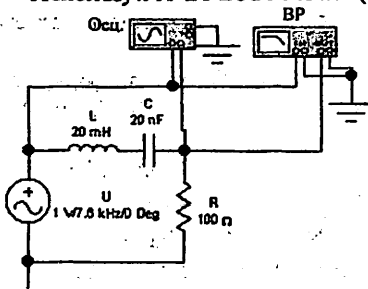


Рис.5.5. Схема для измерения АЧХ, ФЧХ и мгновенных значений $u(t)$ и $u_R(t)$

Установив курсор мышки на левой границе экрана BP, и нажав левую клавишу мыши,

тянуть вертикальный визир на частоту, на которой был выполнен предварительный расчёт. Необходимо учесть, что в исследуемой схеме (рис.5.5), знак φ получается противоположный истинному знаку.

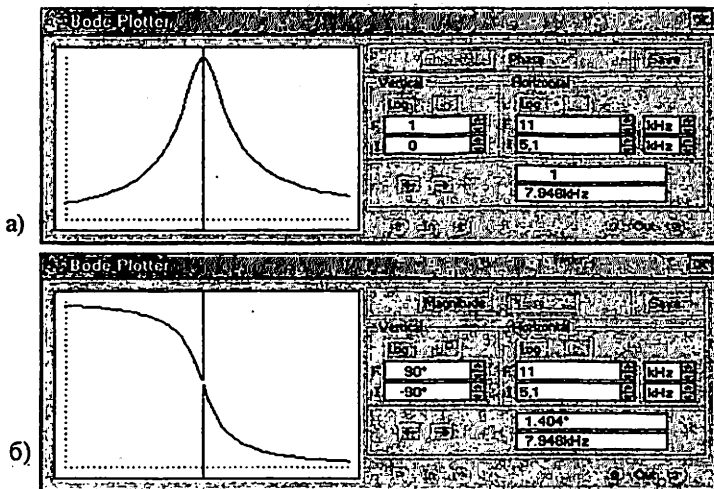


Рис.5.6. Передняя панель ИЧХ Bode Plotter с АЧХ (а) и с ФЧХ (б)

Далее, сдвигая вертикальную визирную линию вдоль оси частот и, устанавливая её на требуемые частоты, измерить φ (при нажатой кнопке **Phase** и $H_R(f)$ (при нажатой кнопке **Magnitude**). Результаты измерений $\varphi(f)$ и $H_R(f)$ занести в табл.5.2.

Если полностью раскрыть экран ИЧХ Bode Plotter и установить диапазоны изменения $\varphi(f)$ и $H(f)$ и выполнить другие настройки, то можно получить очень наглядные изображения АЧХ и ФЧХ (рис. 5.7). Методика работы с Bode Plotter подробно изложена в приложении П2 в конце данного методического пособия.

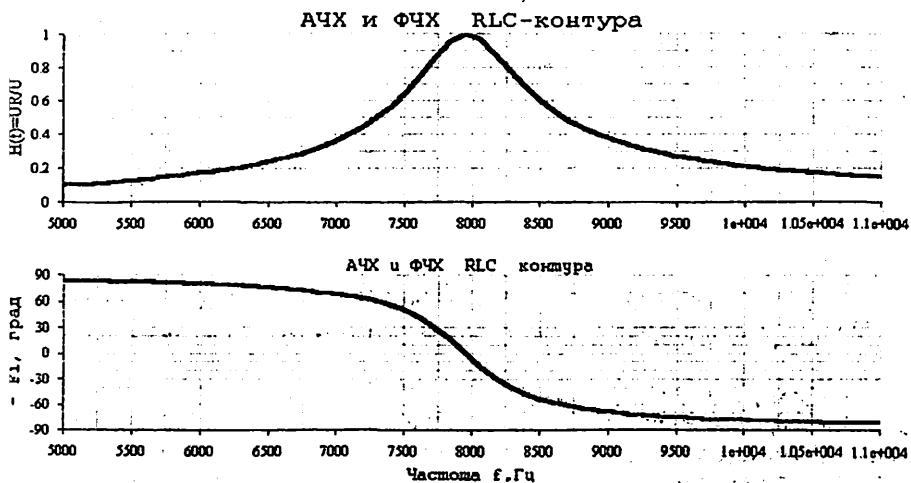


Рис. 5.7. Изображения АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью ИЧХ Bode Plotter

3.3. Исследование влияния внутреннего сопротивления генератора и нагрузки на АЧХ и ФЧХ RLC-цепи (рис.5.3)

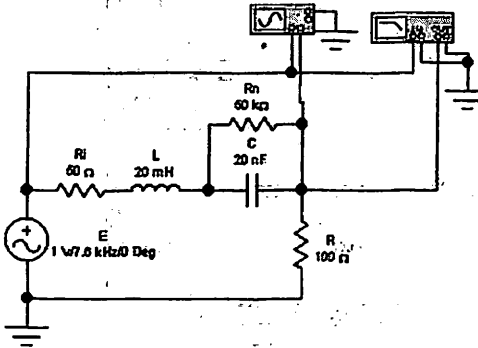


Рис.5.8. Схема для исследования влияния внутреннего сопротивления генератора R_i и нагрузки R_n на АЧХ и ФЧХ RLC контура.

Произвести загрузку файла Lb5-3, при этом на экране монитора появится схема, приведённая на рис.5.8.

Установить параметры RLC-цепи согласно требуемому варианту (см. табл. 5.1, табл. 5.2). Измерить АЧХ $H_{R3}(f) = U_R(f)/U$ и ФЧХ $\varphi_3(f) = \psi_{U2} - \psi_{U1}$. Методика измерения АЧХ и ФЧХ, аналогична п.4.2. После соответствующей настройки Vode Plotter можно получить изображения АЧХ и ФЧХ, представленные на рис. 5.9. Результаты измерений заносятся в табл.5.3.

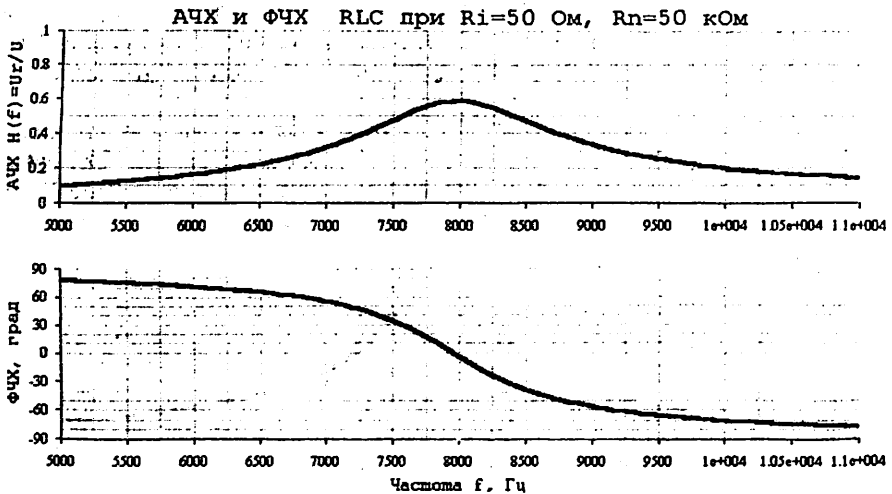


Рис. 5.9. Изображения АЧХ и ФЧХ последовательного RLC контура при $R_i=50$ Ом, $R_n=50$ кОм, полученные с помощью ИЧХ Vode Plotter

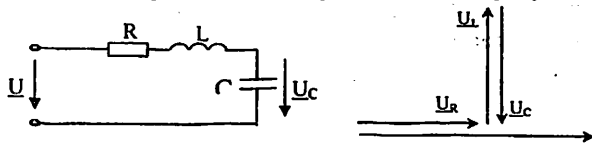
Для измерения мгновенных значений входного напряжения $u(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ закрывается передняя панель ВР и открывается передняя панель двухканального осциллографа «Осц». На частотах генератора $f = f_0$; $f_0 \pm \Delta f$, где $\Delta f = f_0/Q$, срисовать осциллограммы $u(t)$ и $u_R(t)$, которые имеют вид, приведённый на рис.5.1, в.

4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы. 4.2. Схемы измерений частотных характеристик.
 4.3. Графики частотных характеристик $U_R(f)/U$, $U_L(f)/U$, $U_C(f)/U$, $\varphi(f)$, построенных по результатам предварительного расчёта и эксперимента.
 4.4. По графику $U_R(f)/U$ определить абсолютную ширину полосы пропускания и сравнить полученное значение с результатом предварительного расчёта.
 4.5. Выводы по результатам исследований.

3. Контрольные вопросы и задачи

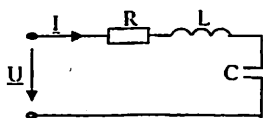
5.1. При каком условии векторная диаграмма последовательного колебательного контура имеет вид, приведённый на рисунке?



Ответы:

- А. $X_L > X_C$;
 Б. $X_C < X_L$; В. $X_L = X_C$.
 5.2. Как изменится характеристическое сопротивление контура,

если L и C увеличить в 4 раза?



Ответы:

- А. Увеличится в два раза.
 Б. Увеличится в четыре раза.
 В. Не изменится.
 Г. Уменьшится в два раза.

5.2. Как нужно изменить частоту приложенного напряжения, чтобы в контуре наступил резонанс напряжений, если на данной частоте $X_L > X_C$?

5.3. Определите напряжение на ёмкости при резонансе, если $U=10$ В, $R=10$ Ом, $X_{L0}=20$ Ом. Ответы: А. 10 В. Б. 20 В. В. 100 В. Г. 200 В.

5.4. Определите ток в колебательном контуре, если $U=200$ В, $R=100$ Ом, $X_L = X_C = 100$ Ом. Ответы: А. 0,66 А. Б. 1 А. В. 2 А. Г. 4 А.

5.5. Как изменится абсолютная полоса пропускания колебательного контура, если увеличить его активное сопротивление в два раза?

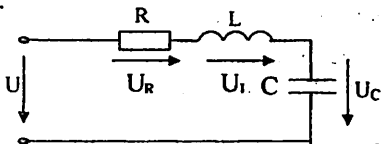
Ответы: А. Не изменится. Б. Увеличится в два раза.
 В. Уменьшится в два раза. Г. Увеличится в четыре раза.

5.6. Выберите R , L , C колебательного контура так, чтобы обеспечить $f_0 = 5$ кГц при добротности $Q = 50$.

5.7. Как изменится ток в колебательном контуре при резонансе, если уменьшить его индуктивность и увеличить ёмкость в три раза?

Ответы: А. Уменьшится. Б. Увеличится в три раза.
 В. Уменьшится в три раза. Г. Увеличится в девять раз.

5.8. Определите напряжение на индуктивности, если $U_R = 40$ В, $U_C = 30$ В, $U = 5$ В.



Ответы:

- А. 40 В; Б. 60 В; В. 30 В; Г. 50 В.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЭЦ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Цель работы - исследование влияния параметров последовательной RL- и RC-цепи на форму тока и напряжения на элементах при периодических несинусоидальных воздействиях; определение действующих значений тока и напряжений на элементах цепи.

1. Теоретические сведения

Периодическая несинусоидальная ЭДС $e(t)=e(t+T)$,

где T - период функции $e(t)$,

может быть представлена с помощью тригонометрического ряда Фурье в виде суммы постоянной ЭДС E_0 и гармонических ЭДС e_k

$$e(t)=E_0+e_1+e_2+\dots=E_0+\sum_{k=1}^{\infty} e_k.$$

где $E_0 = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt$ - постоянная составляющая, равная среднему значению функции за период;

$e_k = E_{km} \sin(k\omega_1 t + \Psi_k) = E'_{km} \sin k\omega_1 t + E''_{km} \cos k\omega_1 t$ - ЭДС k -той гармоники,

E_{km}, Ψ_k - амплитуда и начальная фаза ЭДС k -ой гармоники, которые опреде-

ляются по формулам: $E'_{km} = (2/T) \int_0^T e(t) \sin k\omega_1 t dt$; $E''_{km} = (2/T) \int_0^T e(t) \cos k\omega_1 t dt$;

$$E_{km} = \sqrt{(E'_{km})^2 + (E''_{km})^2}; \quad \Psi_k = \arctg \frac{E''_{km}}{E'_{km}}; \quad \omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi/T.$$

В работе используются периодические несинусоидальные ЭДС $e(t)$, приведенные на (рис.6.1).

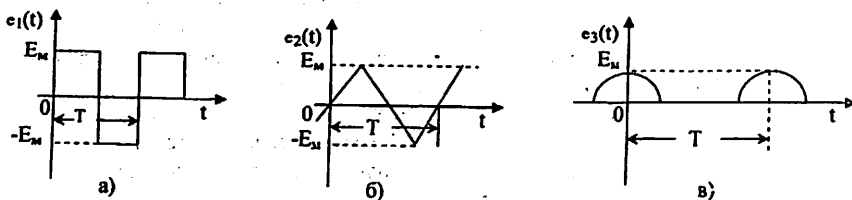


Рис. 6.1. Формы сигналов на входе ЭЦ

Разложение в ряд Фурье $e_1(t)$ (рис. 6.1,а) имеет вид:

$$e_1(t) = E_{1m} \sin \omega_1 t + E_{3m} \sin 3\omega_1 t + E_{5m} \sin 5\omega_1 t + \dots, \quad (6.1)$$

где $E_{km} = 4E_m/k\pi$; $k=1, 3, 5, \dots$ - амплитуды гармоник;
 $E_m = E$ - максимальное значение входного напряжения;
 E - действующее значение входного напряжения.

Разложение в ряд Фурье $e_2(t)$ (рис. 6.1,б) имеет вид:

$$e_2(t) = E_{1m} \sin \omega_1 t - E_{3m} \sin 3\omega_1 t + E_{5m} \sin 5\omega_1 t + \dots, \quad (6.2)$$

где $E_{km} = 4E_m/k^2\pi$; $k=1, 3, 5, \dots$; $E_m = \sqrt{3}E$;

Разложение в ряд Фурье $e_3(t)$ (рис. 6.1,б) имеет вид:

$$e_3(t) = E_0 + E_{1m} \cos \omega_1 t + E_{2m} \cos 2\omega_1 t + E_{4m} \cos 4\omega_1 t + \dots, \quad (6.3)$$

где $E_0 = E_m/\pi$; $E_{1m} = E_m/2$; $E_{2m} = 2E_m/3\pi$; $E_{4m} = 2E_m/15\pi$; ... ; $E_m = 2E$.

Для определения мгновенных значений токов (напряжений) нужно сначала определить мгновенные значения токов (напряжений), вызванных ЭДС каждой гармоникой в отдельности, а затем их сложить

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} i_k + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega_1 t + \psi_{ik}).$$

Для схем, приведённых на рис.6.2, амплитудные значения токов k -ой гармоники определяются из выражения $I_{km} = E_{km}/Z_k$ (6.4)

где $Z_k = \sqrt{R^2 + x_k^2}$ - полное сопротивление цепи на k -той гармонике; (6.5)

$x_k = kx_L$; $x_k = -x_C/k$ - реактивное сопротивление RL и RC-цепи на k -ой гармонике; $x_L = \omega_1 L$; $x_C = 1/(\omega_1 C)$ - индуктивное и ёмкостное сопротивление RL и RC-цепи на первой гармонике.

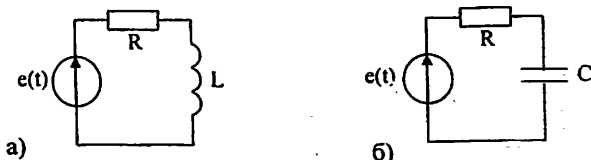


Рис. 6.2. Исследуемые RL- и RC-цепи.

Амплитудные значения напряжений на элементах цепи (рис. 6.2) на k -той гармонике: $U_{Rkm} = RI_{km}$; $U_{Lkm} = kx_L I_{km}$; $U_{Ckm} = (x_C/k) I_{km}$ (6.6)

Действующие значения напряжений на элементах цепи (рис.6.2)

$$U = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots} \quad (6.7)$$

Действующее значение тока в цепи (рис.6.2)

$$I = \sqrt{I_0^2 + \left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots} \quad (6.8)$$

Активная мощность несинусоидального периодического сигнала

$$P = RI^2, \quad (6.9)$$

Реактивная мощность

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} x_k I_k^2 = x_1 I_{1m}^2 / 2 + x_2 I_{2m}^2 / 2 + \dots \quad (6.10)$$

Полная мощность

$$S = EI. \quad (6.11)$$

Периодические несинусоидальные сигналы характеризуются коэффициентом искажений k_{ii} , равного отношению действующего значения напряжения первой гармоники к действующему значению напряжения периодического напряжения $k_{ii} = E_1/E$ (6.12)

и коэффициентом гармоник, равного отношению действующего значения высших гармоник (начиная со второй) к действующему значению первой гармоники

$$k_k = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} E_k^2} / E_1 = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} E_k^2} / E_1 \quad (6.13)$$

Предварительный расчёт

2.1. Рассчитать амплитуды ЭДС первых трёх гармоник согласно варианту задания (см. табл. 6.1) по формулам (6.1) – (6.3).

Таблица 6.1

Параметры цепи для предварительного расчёта

Вариант №	Вид воздействия (рис. 6.1)	Схема рис. 6.2	Параметры элементов цепи		
			L, мГн	C, нФ	R, Ом
1	$e_1(t)$	RL	40		200
2	$e_2(t)$	RC		30	5000
3	$e_3(t)$	RL	30		100
4	$e_1(t)$	RC		20	10 000
5	$e_2(t)$	RL	50		200
6	$e_3(t)$	RC		30	4 000
7	$e_1(t)$	RL	50		300
8	$e_2(t)$	RC		30	3 000
9	$e_3(t)$	RL	60		200
10	$e_1(t)$	RC		200	1 000

Необходимо учесть, что действующие значения ЭДС E каждого из этих источников (для удобства расчётов) установлены одинаковыми и равными $E=5$ В.

2.2. Записать выражение ЭДС $e(t)$ в виде суммы гармонических составляющих (6.1)-(6.3).

2.3. Рассчитать амплитудные значения токов $I_0, I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}$ в заданной цепи, вызванных ЭДС каждой гармоники в отдельности по формулам (6.4).

2.4. Рассчитать амплитудные значения напряжения на элементах цепи от тока каждой гармоники в отдельности по формуле (6.6).

2.5. Рассчитать результирующие действующие значения напряжений на элементах цепи по формуле (6.7).

2.6. Рассчитать результирующие действующие значения тока в цепи по формуле (6.8).

2.7. Рассчитать активную P , реактивную Q и полную S мощность в цепи по формулам (6.9)- (6.11).

2.8. Рассчитать коэффициент искажений k_n и гармоник k_k по формулам (6.12), (6.13). Результаты всех расчётов занести в таблицу 6.2, 6.3.

Таблица 6.2
 Результаты предварительного расчёта RL- и RC-цепи

Схема рис. 6.2.; сигнал рис. 6.1.; $f=2 \text{ кГц}$; $E=5 \text{ В}$;
 $E_m = \dots \text{ В}$; $R = \dots \text{ В}$; $L = \dots \text{ мГн}$; ($C = \dots \text{ нФ}$)

к	$\cos \varphi$	$E_{\text{эм}}$	X_k	Z_k	$I_{\text{эм}}$	$U_{\text{эм}}^{(k)}$	$U_{\text{эм}}^{(k)}$
	1/c	В	Ом	Ом	А	В	В

Таблица 6.3
 Действующие значения напряжения, тока и мощности

	Предварительный расчёт	Результат измерения	Относительная погрешность
$U_R, \text{ В}$			
$U_L, \text{ В}$			
$U_C, \text{ В}$			
$I, \text{ А}$			
$P = \dots \text{ Вт}$; $Q = \dots \text{ ВАр}$; $S = \dots \text{ ВА}$; $\kappa_n = \dots$; $\kappa_r = \dots$			

3. Выполнение работы

Производится загрузка системы EWB. Раскрывается папка LbOEE. Загружается файл Lb6-1.ewb, при этом на дисплее монитора ПК появляется схема, рис. 6.3.

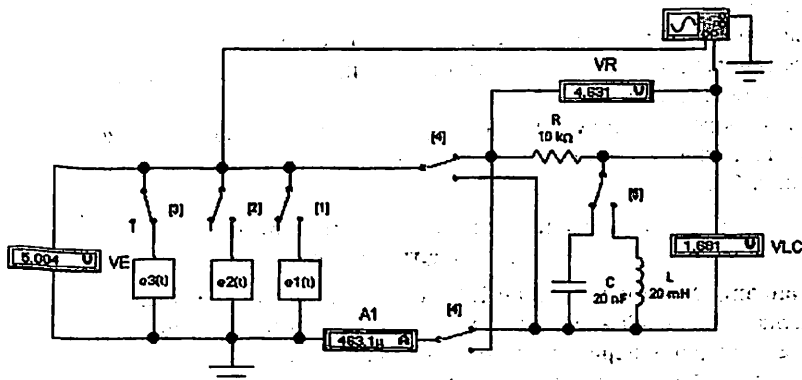


Рис. 6.3. Схема для исследования RL- и RC-цепи при воздействии периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$.

Она позволяет исследовать RL- и RC-цепь при воздействии на них периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$, имеющей форму:

- 1) периодической последовательности биполярных прямоугольных импульсов $e_1(t)$ (см. рис.6.1,а);

- 2) периодической последовательности биполярных пилообразных импульсов $e_2(t)$ (см. рис.6.1,б);
- 3) периодической последовательности положительных полусинусоидальных импульсов $e_3(t)$ (см. рис.6.1,б).

Включение-отключение соответствующей ЭДС $e(t)$ выполняется путём нажатия на соответствующую клавишу клавиатуры «1», «2», «3».

Включение емкости C или индуктивности L осуществляется путём однократного нажатия на клавишу «5».

Действующие значения напряжений измеряются соответствующими цифровыми вольтметрами: периодическую несинусоидальную ЭДС $E - V1$, на сопротивлении $U_R - VR$, на индуктивности U_L или емкости $U_C - VLC$.

Для исследования формы напряжения на индуктивности $u_L(t)$ или емкости $u_C(t)$ на экране модели осциллографа контакт переключателя «4» должен находиться в верхнем положении, на сопротивлении $u_R(t)$ - в нижнем положении. Изменение состояния указанного переключателя осуществляется путём однократного нажатия на клавиатуру клавиши «4».

Передняя панель осциллографа раскрывается путем быстрого двукратного щелчка левой клавишей «мыши» по пиктограмме (маленьком условном изображении) осциллографа.

3.1. Измерение действующих значений напряжений на элементах цепи


Согласно с номером варианта (см. табл.6.1) с помощью клавиши «5» установить требуемый тип реактивного элемента (индуктивность L или емкость C) (см. схема рис.6.3).

Установить параметры элементов (величины сопротивления, индуктивности и емкости).

Согласно с номером варианта (см. табл.6.1) с помощью клавиши «1», «2», «3», установить требуемый вид источника периодического несинусоидального воздействия (см. рис.6.1).

Включить режим расчёта и, после установления процесса, записать показания вольтметров VR , VLC , VE и амперметра $A1$. Результаты измерений занести в табл. 6.2.

3.2. Исследование формы напряжения на элементах цепи

Установить с помощью клавиш 1,2,3,4 требуемую ЭДС $e(t)$ и схему цепи. Два раза щелкнуть левой клавишей мыши по пиктограмме осциллографа. В результате раскроется передняя панель осциллографа. Запустить расчёт, щелкнув левой клавишей мыши по кнопке «включить-выключить» (расположена в правом верхнем углу рабочего поля EWB и обозначена ). После чего увидим на экране модели осциллографа изображение напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ или напряжения на индуктивности $u_L(t)$ или емкости $u_C(t)$. Аккуратно, с соблюдением масштаба, срисовать с экрана модели осциллографа изображение соответствующего напряжения.

Контрольные вопросы и задачи

5.1. Укажите полное сопротивление RL-цепи (рис.6.2,а) на 3-ей гармонике, если на первой гармонике $R=10 \text{ Ом}$; $X_L=3,333 \text{ Ом}$.

Ответы: А) $Z^{(3)}=20 \text{ Ом}$; Б) $Z^{(3)}=14,1 \text{ Ом}$; В) $Z^{(3)}=12,1 \text{ Ом}$.

5.2. Укажите полное сопротивление RC-цепи (рис.6.2,б) на 3-ей гармонике, если на первой гармонике $R=10 \text{ Ом}$; $X_C=20 \text{ Ом}$.

Ответы: А) $Z^{(3)}=12,1 \text{ Ом}$; Б) $Z^{(3)}=20 \text{ Ом}$; В) $Z^{(3)}=14,1 \text{ Ом}$.

5.3. Укажите действующее значение периодического несинусоидального тока $i(t)=2+4 \sin \omega_1 t+2,83 \sin 2\omega_1 t$ А.

Ответы: А) $I=8,83 \text{ А}$; Б) $I=8 \text{ А}$; В) $I=4 \text{ А}$; Г) $I=5 \text{ А}$.

5.4. Укажите правильное выражение мгновенного значения напряжения, если постоянная составляющая U_0 и амплитуды гармоник U_{km} имеют значения:

$$U_0=3,5 \text{ В}; U_{1m}=6,5 \text{ В}; U_{2m}=3,1 \text{ В}.$$

Ответы: А) $u(t)=3,5+\sqrt{2} 6,5 \sin \omega_1 t+\sqrt{2} 3,1 \sin 2\omega_1 t$ В;

Б) $u(t)=3,5+\frac{6,5}{\sqrt{2}} 6,5 \sin \omega_1 t+\frac{3,1}{\sqrt{2}} 3,1 \sin 2\omega_1 t$ В;

В) $u(t)=3,5+6,5 \sin \omega_1 t+3,1 \sin 2\omega_1 t$ В.

5.5. Укажите правильное выражение мгновенного значения тока, если постоянная составляющая I_0 и действующие значения гармоник тока имеют значения: $I_0=1,5 \text{ А}$; $I_1=2,3 \text{ А}$; $I_4=1,2 \text{ А}$.

Ответы: А) $i(t)=1,5+\frac{2,3}{\sqrt{2}} \sin 2\omega_1 t+\frac{1,2}{\sqrt{2}} \sin 4\omega_1 t$ А;

Б) $i(t)=1,5+\sqrt{2} 2,3 \sin 2\omega_1 t+\sqrt{2} 1,2 \sin 4\omega_1 t$ А;

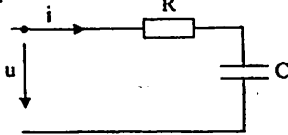
В) $i(t)=1,5+2,3 \sin 2\omega_1 t+1,2 \sin 4\omega_1 t$ А.

5.6. Укажите цепь, через которую протекает ток,

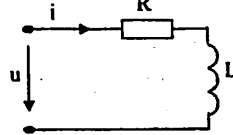
$$i(t)=2 \sin (\omega_1 t-45^\circ)+0,5 \sin (2\omega_1 t-63^\circ) \text{ А},$$

если напряжение на её зажимах $u(t)=28,2 \sin \omega_1 t+11,2 \sin 2\omega_1 t$ В.

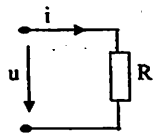
Ответы:



А)



Б)



В)

5.7. Укажите правильное значение активной мощности, потребляемой цепью, если на её входе мгновенные значения напряжений и тока описываются выражениями: $u=1,5+2 \sin (\omega_1 t+80^\circ) \text{ В}$; $i=0,5+3 \sin (\omega_1 t+80^\circ) \text{ А}$.

Ответы: А) $P=2,5 \text{ Вт}$; Б) $P=1,5 \text{ Вт}$; В) $P=6,75 \text{ Вт}$.

5.8. Укажите правильное значение коэффициента искажений k_n для периодического напряжения: $u=3+5 \sin \omega_1 t+2 \sin 2\omega_1 t+\sin 3\omega_1 t+0,5 \sin 4\omega_1 t$ В.

Ответы: А) $k_n=0,52$; Б) $k_n=0,72$; В) $k_n=0,82$.

5.9. Укажите правильное значение коэффициента гармоник для напряжения: $u=5 \sin \omega_1 t+0,5 \sin 2\omega_1 t+0,1 \sin 3\omega_1 t$ В.

Ответы: А) $k_r=0,2$; Б) $k_r=0,1$; В) $k_r=0,3$.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В RL и RC-ЦЕПЯХ

Цель работы - исследование переходных процессов в последовательных RL, RC и RLC цепях; изучение влияния параметров этих цепей на характер переходного процесса.

1. Теоретические сведения

1.1. Переходные процессы в последовательной RC-цепи

Переходный процесс исследуется в RC-цепи, изображённой на рис.7.1,а. Входной сигнал задаётся источником напряжения $e(t)$ и представляет собой периодическую последовательность прямоугольных положительных импульсов с амплитудой E , моделирующих периодическое подключение и отключение (короткое замыкание) цепи (см. рис.7.1,б)..

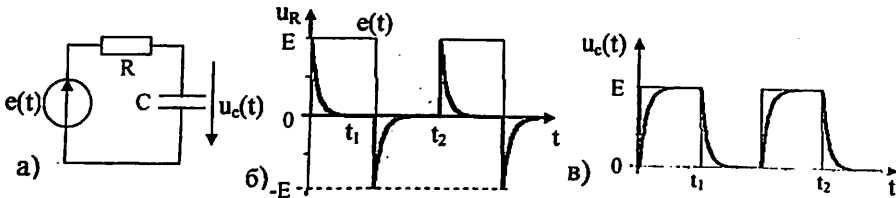


Рис. 7.1. Исследуемая RC-цепь (а), входное напряжение $e(t)$, напряжение на сопротивлении $u_R(t)$, ёмкости $u_C(t)$ (в).

Подключение RC-цепи к источнику постоянного напряжения в интервале $0 \leq t \leq t_1$ (рис.7.1,а) $E = u_R + u_C$. Если учесть, что $u_R = Ri$ и $i = Cdu_C/dt$, то переходной процесс в цепи описывается дифференциальным уравнением

$$E = RC(du_C/dt) + u_C, \quad (7.1)$$

которому соответствует решение

$$u_C = E(1 - e^{-t/\tau}), \quad u_R = E - u_C = E e^{-t/\tau}, \quad i = u_R/R = (E/R) e^{-t/\tau}, \quad (7.2)$$

где

$\tau = RC$ - постоянная времени RC-цепи,
 $e = 2,71828$ - основание натурального логарифма.

Короткое замыкание цепи RC в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$, т.е. при $e(t) = 0$. Переходной процесс описывается выражениями

$$u_C = E e^{-(t-t_1)/\tau}, \quad u_R = -u_C = -E e^{-(t-t_1)/\tau}. \quad (7.3a)$$

Для того чтобы к моменту каждого следующего перепада напряжения успевал закончиться предыдущий переходной процесс, необходимо частоту генератора $e(t)$ установить $f \leq 1/8\tau$. В этом случае, если за начало отсчета принять $t=t_1=0$, то выражения (7.3a) упростятся

$$u_C = E e^{-t/\tau}, \quad u_R = -u_C = -E e^{-t/\tau}. \quad (7.3б)$$

1.2. Переходные процессы в последовательной RL-цепи

При включении цепи RL (рис. 7.2) на постоянное напряжение $e(t) = E$

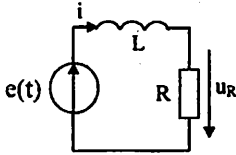


Рис.7.2. Цепь RL

для переходного тока

и для переходных напряжений на сопротивлении и индуктивности

$$u_R = Ri = E(1 - e^{-t/\tau}), \quad u_L = E - u_R = Ee^{-t/\tau}, \quad (7.5)$$

При коротком замыкании RL цепи (в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$ $E=0$) переходный ток и напряжения на сопротивлении и индуктивности

$$u_R = Ee^{-(t-t_1)/\tau}; \quad i = (E/R)e^{-(t-t_1)/\tau}; \quad u_L = -u_R. \quad (7.6a)$$

Для того чтобы к моменту каждого следующего перепада напряжения успевал закончиться предыдущий переходный процесс, необходимо частоту генератора $e(t)$ установить $f \leq 1/8\tau$. В этом случае, если за начало отсчета принять $t^* = t - t_1 = 0$, то выражения (7.6a) упростятся

$$u_R = Ee^{-t^*/\tau}; \quad i = (E/R)e^{-t^*/\tau}; \quad u_L = -u_R. \quad (7.6b)$$

Следует отметить, что графики $u_R(t)$, $u_L(t)$ RL – цепи (рис.7.2) будут соответственно такими же, как $u_C(t)$ и $u_R(t)$ RC – цепи (рис.7.1.a).

7.1.3. Переходные процессы в последовательной RLC-цепи

Переходную характеристику колебательного контура рассмотрим на примере схемы рис.7.3, когда выходное напряжение снимается с емкости.

При воздействии скачка напряжения в контуре возникает затухающий колебательный процесс, вызванный периодическим зарядом и разрядом емкости через индуктивность и сопротивление (рис.7.4).

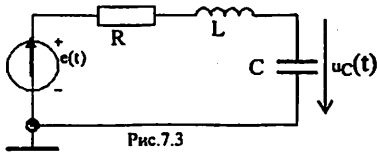


Рис.7.3

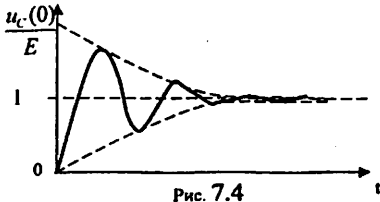


Рис. 7.4

Аналитическое выражение переходной характеристики напряжения на емкости имеет вид:

$$h_c(t) = \frac{u_C(t)}{E_0} = 1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega_1 t + \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right)$$

где

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \left(\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \right) \cdot \omega_0 - \text{частота собственных колебаний}, \quad (7.7)$$

$$\delta = \frac{R}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} - \text{коэффициент затухания}, \quad (7.8)$$

$Q = \sqrt{L/C} / R$ - добротность колебательного контура,

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - резонансная частота колебательного контура.

Амплитуда колебаний со временем затухает за счет потери энергии в сопротивлении R. Скорость затухания колебаний зависит от коэффициента затухания δ (7.8).

Вид переходной характеристики зависит от величины добротности Q контура. С увеличением добротности частота собственных колебаний ω_1 стремится к резонансной частоте ω_0 , а скорость затухания переходного процесса уменьшается.

При малых значениях добротности ($Q < 0,5$) переходной процесс имеет не колебательный (апериодический) характер.

2. Предварительный расчёт

2.1. Рассчитать постоянную времени τ цепи RC или RL (рис. 7.1,а) по формуле $\tau = RC$ или $\tau = L/R$ и частоту генератора $f=1/8\tau$. Значение R и C или L определяется номером варианта в соответствии с табл. 7.1.

Таблица 7.1

Параметры RC и RL-цепей для предварительного расчёта и измерений

Вариант №	R, Ом	C, мкФ	L, мГн	Вариант №	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	L, Гн
1	2	1		12	100	60		
2	4	2		13	90	70		
3	3	3		14	80	80		
4	2,5	4		15	70	90		
5	2	5		16	60	100		
6	1,5	6		17	50	60		
7	1,3	7		18	40	70		
8	1	8		19	30	80		
9	1,1	3		20	20	90		
10	5	2		21	10	100		
11	2	3		22	20	50		

2.2. Для RC (см.рис.6.1) или RL (см.рис.7.2) рассчитать временные зависимости напряжения на ёмкости $u_C(t)$ или индуктивности $u_L(t)$ и сопротивлении $u_R(t)$, для $t=(0; 0,5; 1; 1,5; 2; 4)\tau$. Для всех вариантов $E(t)$ использовать $E=6$ В. Результаты расчёта занести в табл.7.2.

Таблица 7.2

Результаты предварительного расчёта и измерений

t	Схема	0	0,5 τ	τ	1,5 τ	2 τ	4 τ
t, мс	Рис.....						
u _R , В	Расчёт						
	Измерение						
u _L , В	Расчёт						
	Измерение						
u _C , В	Расчёт						
	Измерение						

3. Выполнение работы

3.1. Исследование переходных процессов в RC-цепи

Производится загрузка программы Electronics Workbench.

Раскрывается папка Lab-7. Загружается файл Lb7-1, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема рис.7.5. Она позволяет исследовать переходные процессы в последовательной RC-цепи при включении её на постоянное напряжение и при её коротком замыкании.

Zapusk razvertki osc

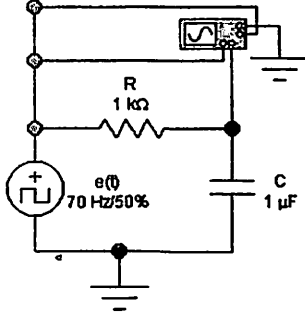


Рис.7.5.

Для того чтобы запуск развёртки происходил в начале импульса на осциллографе, должна быть нажата левая кнопка . Чтобы запуск развёртки происходил в конце импульса на осциллографе, должна быть нажата правая кнопка .

Для того чтобы процесс был не периодическим, а однократным, устанавливается режим приостановки расчёта после каждого заполнения экрана осциллографа (Analysis/ Analysis Options/Instruments/Pause after each screen - отметить птичкой). Для продолжения расчёта надо мышкой щёлкнуть по кнопке **Payse**.

На рис.7.6. представлена лицевая панель осциллографа, на которой изображен процесс заряда ёмкости $u_c(t)$ -экспоненциальный рост напряжения от нуля до 6 В. Горизонтальная линия сверху —

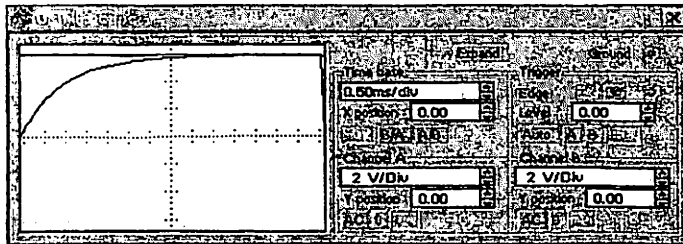


Рис.7.6

горизонтальная линия сверху — верхняя часть входного положительного импульса с максимальным напряжением 6 В. По горизонтали — время t с масштабом $m_t=0,5$ мс/деление. По вертикали — напряжение с масштабом $m_u=2$ В/деление. Учитывая масштабы по горизонтали и вертикали, можно приблизительно измерить зависимость $u_c(t)$ и заполнить таблицу экспериментальными данными (табл.7.2)

Гораздо более точные результаты моделирования можно получить, если выполним большее расширение передней панели осциллографа. Если щёлкнуть

мышкой по кнопке **Expand**, то на рабочем поле EWB появится расширенная передняя панель осциллографа (рис.7.7).

На рис.7.7. изображен процесс разряда ёмкости $u_c(t)$ от $u_c(0) = 6$ В до практически нулевого значения. Также на осциллограмме имеются две вертикальные визирные линии с треугольниками вверху, обозначенными цифрами «1» и «2». Ниже экрана расположены три окошка, заполненные цифрами.

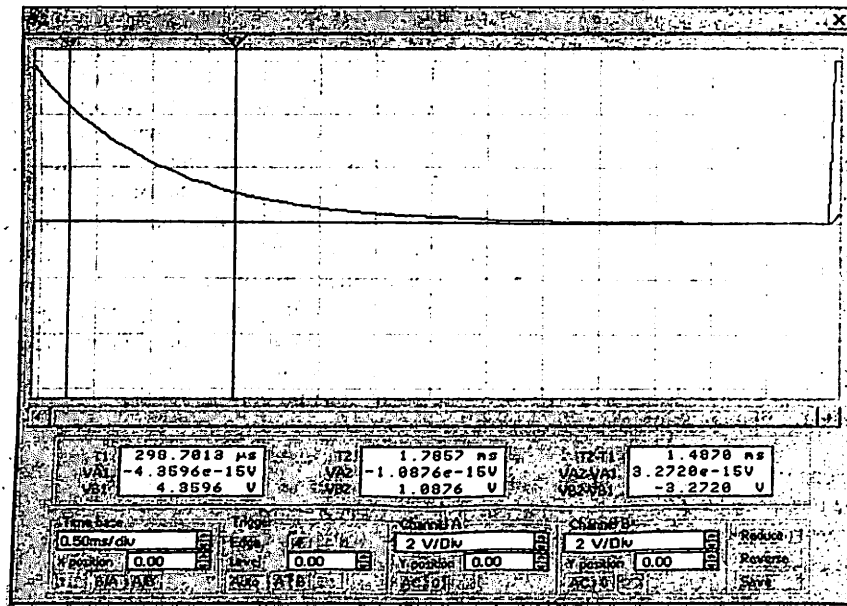


Рис.7.7.

В левом окошке:

$T1=298,7013$ мкс - отражает интервал времени от начала расчёта до точки, расположения визирной линии 1;

$VA1 = -4,3596 \text{ e-}15$ В – минимальное напряжение, соответствующее «нулевому» значению входного импульса в интервале $0 > t > t_1$;

$VB1 = 4,3596$ В – значение напряжения на ёмкости в момент $T1$.

В среднем окошке:

$T2 = 1,7857$ мс отражает интервал времени от первого визира 1 до визирной линии 2;

$VA2 = -1,0876 \cdot 10^{-15}$ В – минимальное напряжение, соответствующее «нулевому» значению входного импульса в интервале $0 > t > t_1$;

$VB2 = 1,0876$ В – значение напряжения на ёмкости в момент $T2$.

В правом окошке:

$T2 - T1 = 1,4870$ мс отражает интервал времени от начала расчёта до момента расположения визирной линии 2;

$VA2 - VA1 = 3,2720 \text{ e-15 В}$ – разность между вторым и первым минимальным значением напряжения, соответствующие «нулевому» значению входного импульса в интервале $0 > t > t_1$;

$VB2 - VB1 = - 3,2720 \text{ В}$ – разность значений напряжений на ёмкости в момент $T2$ и $T1$

По измеренным двум значениям напряжений на ёмкости при её разряде $u_c(t_1)$ и $u_c(t_2)$ можно определить постоянную времени цепи по формуле:

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln[|u_c(t_1) / u_c(t_2)|] = \quad (7.9)$$

$$= 1,487 / \ln(4,3596 / 1,0876) = 2,0646 \text{ мс.}$$

3.2. Исследование переходных процессов в последовательной RL-цепи

Zapusk razvertki osc

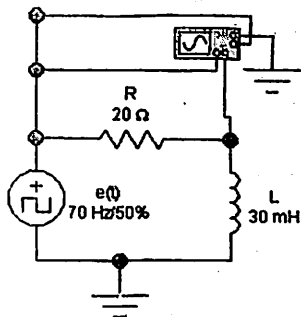


Рис.7.9.

Загружается файл Lb 7.2, при этом на дисплее монитора ПК появляется схема, приведённая на рис.7.9. Она позволяет исследовать переходные процессы в последовательной RL-цепи при включении её на постоянное напряжение и при её коротком замыкании. Далее раскрывается передняя панель осциллографа и выполняется его настройка, аналогично тому, как это описано в предыдущем пункте. Устанавливается частота генератора $f = 1/8t$. После настройки передняя панель осциллографа может выглядеть так, как показано на рис. 7.10. На нём мы видим напряжение переходного

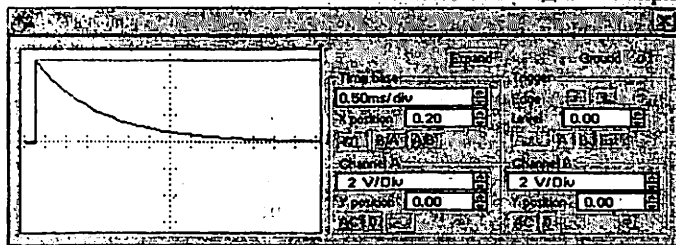


Рис.7.10.

процесса на индуктивности $u_L(t)$ при включении RL-цепи на постоянное напряжение. Как видно из графика, $u_L(t)$ сначала скачком возрастает от нуля до входного

напряжения $E=6 \text{ В}$, и дальше плавно уменьшается до нуля по экспоненциальному закону. Методика измерения напряжения и определение постоянной времени RL – цепи описана в предыдущем пункте.

3.1. Исследование переходных процессов в последовательной RLC-цепи

Загружается файл Lb 7-3, при этом на дисплее монитора ПК появляется схема, приведённая на рис.7.11. Она позволяет исследовать переходные процессы в последовательной RLC-цепи при включении её на постоянное напряжение и при её коротком замыкании.

Далее раскрывается передняя панель осциллографа и выполняется его настройка, аналогично тому, как это описано в предыдущих пунктах.

Запуск развёртки osc

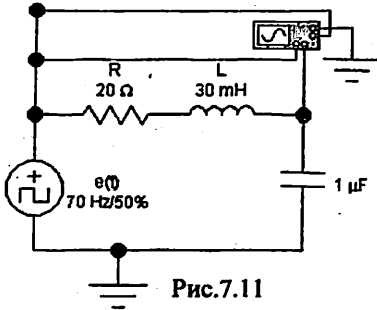


Рис.7.11

Устанавливается частота генератора

$$f = 1/8\tau, \text{ где } \tau = 1/\delta.$$

После настройки передняя панель осциллографа может выглядеть так, как показано на рис. 7.12. На нём мы видим напряжение переходного процесса на ёмкости $u_C(t)$ при включении RLC на постоянное напряжение.

Для увеличения точности измерения напряжения и времени, выполним полное раскрытие передней панели осциллографа, щёлкнув мышью по

кнопке **Expand**. В результате чего на рабочем поле EWB появится рис. 7.13.

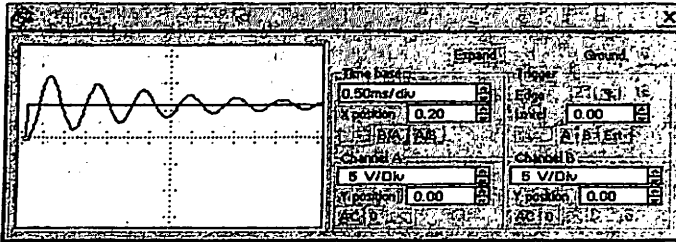


Рис.7.12

Мышкой устанавливаются вертикальные визирные линии на максимумы $u_C(t)$ и выполнить измерение периода колебаний

$$T_c = 1,1007 \text{ мс } (T_2 - T_1),$$

а из 1-го и 2-го окошек - максимальные значения напряжений на ёмкости

$$u_{C1}(t) = 11,3679 \text{ В. } u_{C1}(t+T_1) = 9,7620 \text{ В.}$$

По этим данным определяем частоту свободных затухающих колебаний

$$f_1 = 1/T_1 = 1/1,1007 \cdot 10^{-3} = 908,13 \text{ Гц;}$$

угловую частоту свободных затухающих колебаний

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi 908,13 = 5705,95 \text{ 1/с;}$$

коэффициент затухания

$$\delta = f_1 \ln[u_C(t) - E] / [u_C(t+T_1) - E] = 908,13 \cdot \ln(11,3679/9,7620) = 908,13 \cdot 0,15296 = 138,3 \text{ 1/с}$$

и постоянную времени

$$\tau = 1/\delta = 1/138,3 = 7,23 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 7,23 \text{ мс.}$$

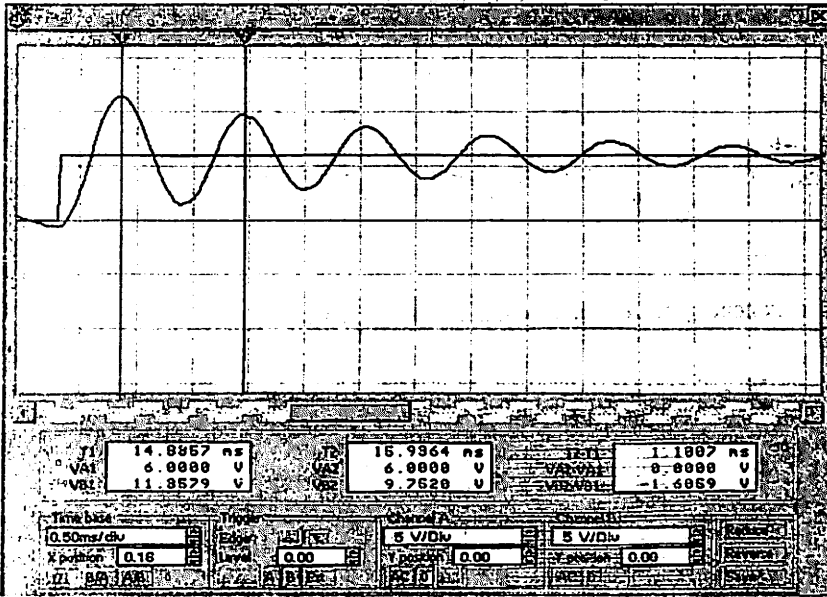


Рис. 7.13

4. Содержание отчёта

В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены:

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Электрическая схема исследуемой цепи и её исходные данные.
- 4.3. Расчётные формулы и результаты предварительного расчёта и моделирования.
- 4.4. Графики, полученные в результате моделирования (осциллограммы).
- 4.5. Выводы по результатам исследований.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Постоянная времени цепи RL определяется по формуле:

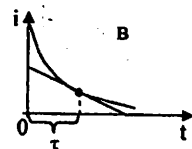
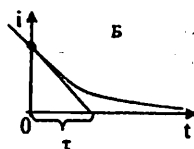
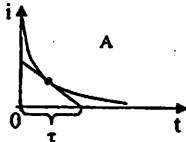
Ответы: А. L/R ; Б. LR ; В. R/L ;

- 5.2. Постоянная времени цепи RC определяется по формуле:

Ответы: А. $1/(RC)$; Б. RC ; В. C/R ;

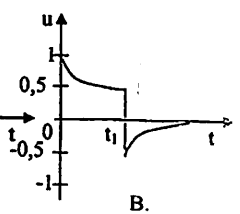
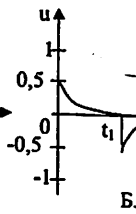
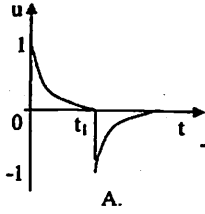
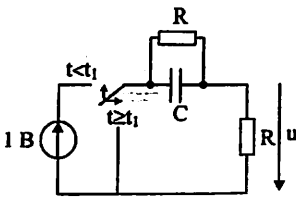
- 5.3. Графическое определение τ ведётся согласно рисунку:

Ответы:

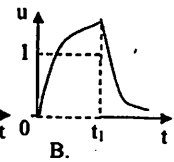
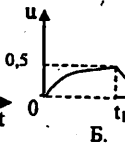
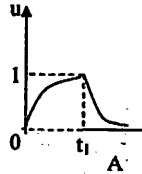
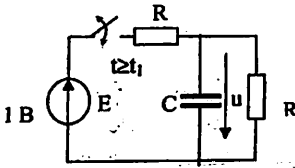


5.4. График переходного напряжения u на выходе цепи

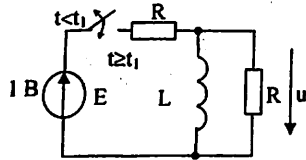
Отвѣты:



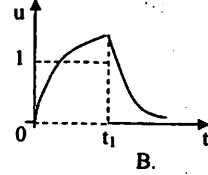
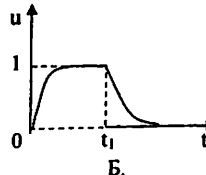
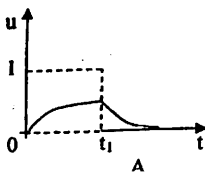
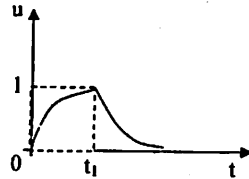
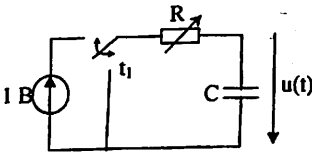
5.5. График переходного напряжения u на выходе цепи



5.6. Используя ответы задания 5.4, указать график переходного напряжения u для цепи



5.7. Цепи RC соответствует выходное напряжение вида $u(t)$. Как изменится форма этого напряжения при уменьшении R в 2 раза?



8. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы - изучить принцип работы выпрямительных полупроводниковых диодов и их основные параметры;

- освоить методику измерения статических вольтамперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых диодов с помощью вольтметра и амперметра;
- освоить расчёт статического R_0 и дифференциального сопротивления $R_{\text{диф}}$ диода в заданной рабочей точке (РТ);
- освоить получение изображения ВАХ полупроводникового диода на экране осциллографа.

1.1. Теоретические сведения

Полупроводниковый диод представляет собой двухслойный полупроводник с n - и p -типом электропроводности, как показано на рис.8.1,а. Левый слой содержит донорную примесь и обладает электропроводностью n -типа, а правый - акцепторную примесь и обладает электропроводностью p -типа,

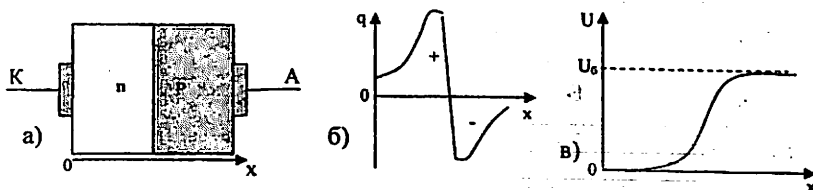


Рис.8.1. Структура диода (а); распределение объемных зарядов q в области n - p перехода(б) и распределение потенциалов U в области n - p перехода (в)

В области, прилегающей к границе перехода, образуется заборный слой, обладающий выпрямительными свойствами. Такой слой называется электронно-дырочным или n - p - переходом.

Электрический процесс в n - p -переходе с резким изменением типа проводимости на границе изображён на рис.8.1,б.

Под влиянием разности концентраций дырки диффундирует из p -области в n -область. Аналогичным образом электроны из n -области диффундируют в p -область. При этом в n -области накапливаются положительные заряды, а в p -области - отрицательные (рис.8.1,б). По указанным причинам на n - p переходе появляется контактная разность потенциалов E_x (составляющая $0,2 \div 0,4$ В для германия и $0,5 \div 0,8$ В для кремния) и возникает электрическое поле, препятствующее диффузии. В результате в области n - p -перехода возникает двойной электрический слой, образующий потенциальный барьер U_0 (рис.8.1,в). Образование двойного электрического слоя происходит в результате обеднения приконтактного слоя n - и p -областей свободными носителями тока, вследствие чего приконтактные области обладают повышенным сопротивлением. Эту область называют заборным слоем. Ширина заборного слоя зависит от проводимости полупроводника.

Высота потенциального барьера U_0' зависит от напряжения U_0 , прикладываемого к диоду между его внешними контактами. Когда положительный полюс

источника U_0 соединен с n-областью, а отрицательный – с p-областью (рис.8.2,а), то высота потенциального барьера возрастает $U'_s = U_s + U_0$ (рис.8.2,б).

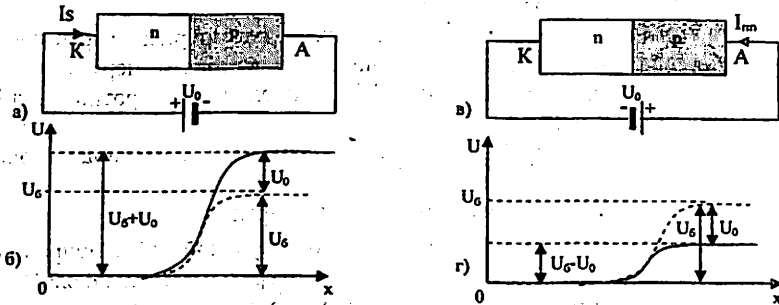


Рис.8.2. Влияние внешнего напряжения U_0 на высоту потенциального барьера: запирающего (обратного) (а, б); отпирающего (прямого) (в, г)

Это приводит к расширению запирающего слоя. Такое включение называют обратным. Диффузионное перемещение основных носителей из одной области в другую прекращается. В этом случае через переход протекает только небольшой обратный ток I_s , обусловленный неосновными носителями (рис.8.2,а).

При приложении к n-p-переходу прямого напряжения (рис.8.2,в), когда минус батареи присоединен к n-области, а плюс к p-области, высота потенциального барьера уменьшается $U'_s = U_s - U_0$ (рис.8.2,г). При этом диффузионный ток дырок увеличивается, так как количество дырок, которые могут преодолеть потенциальный барьер и перейти в n-область, возрастает. Аналогичная картина имеет место и для электронов. В этом случае через переход протекает прямой ток, равный сумме дырочной и электронной составляющих. Зависимость тока через p-n-переход от напряжения можно аппроксимировать с помощью экспоненциальной функции

$$I = I_s [\exp(U/mU_T) - 1], \quad (8.1)$$

где I_s – теоретический обратный ток диода, текущий через переход при обратном смещении (обычно $10^{-12} < I_s < 10^{-8}$ А для кремниевых диодов и $10^{-8} < I_s < 10^{-2}$ А для германиевых диодов), $U_T = kT/e$ – термический потенциал, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, U – напряжение на переходе. Поправочный коэффициент m ($m=1$ – для германиевых, $m=2$ – для кремниевых диодов) учитывает отклонение от теории диода Шокли. При комнатной температуре ($T=296$ К) $U_T = kT/e = 0,0255$ В – температурный потенциал, поэтому при положительных напряжениях, больших 1 В, величина прямого тока может достигать нескольких сотен ампер на квадратный сантиметр.

При отрицательных напряжениях величина $\exp(eU/kT)$ уменьшается и ток через переход стремится к току насыщения I_s (рис.8.3).

Следует отметить, что уравнение (8.1) описывает ВАХ реального диода только в прямом направлении и для небольших токов. Реальный обратный ток диода значительно больше, чем I_s .

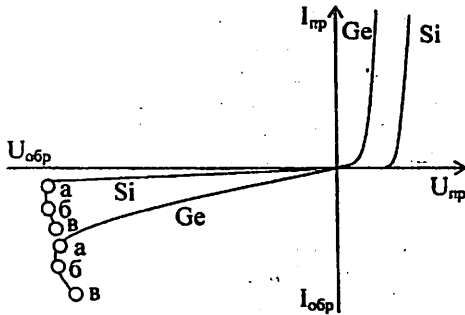


Рис. 8.3. ВАХ германиевого Ge и кремниевое Si диодов

Анализ типовых ВАХ германиевого и кремниевое диодов (рис.8.3)

позволяет сделать следующие выводы:

- прямое падение напряжение $U_{пр}$ на германиевом диоде почти в два раза меньше, чем на кремниевом, при одинаковых значениях прямого тока $I_{пр}$;

- германиевый диод начинает проводить ток при прямом

напряжении $U_{пр}=0,2-0,4$ В, а кремниевые - только при $U_{пр}=0,5-0,8$ В;

- обратный ток $I_{обр}$ кремниевое диода примерно на порядок меньше обратного тока германиевого при одинаковых обратных напряжениях.

Эти выводы позволяют разграничить назначение германиевых и кремниевых диодов. Кремниевые диоды распространены шире, чем германиевые и применяются в тех случаях, когда обратные ток недопустим. Кроме того, они сохраняют работоспособность до температуры окружающей

среды 125-150 °С, тогда как германиевые могут работать только до 70°С.

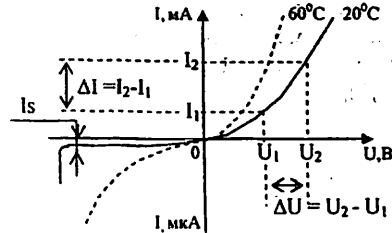


Рис.8.4. Зависимость ВАХ ПП диода от температуры

При $U \geq 1$ В единицей в уравнении (8.1) пренебречь и прямой ток будет нарастать по экспоненте. Прямая ветвь ВАХ p-n-перехода располагается в первом квадранте (рис. 8.3).

При увеличении обратного напряжения, величина обратного тока реальных диодов плавно увеличивается.

Обратная ветвь ВАХ p-n-перехода располагается в третьем квадранте (рис.8.3).

К основным параметрам ПП диода относятся его статическое сопротивление (сопротивление постоянному току) $R_{01}=U_1/I_1$, $R_{02}=U_2/I_2$ и дифференциальное сопротивление $R_{диф} = dU/dI \approx \Delta U/\Delta I = (U_2-U_1)/(I_2-I_1)$. Эти параметры можно определить по ВАХ диода (рис.8.4).

Параметры полупроводниковых выпрямительных диодов:

- среднее значение прямого $I_{пр,ср}$ и обратного $I_{обр}$ токов. Прямой и обратный токи зависят от типа и размера диода. Для разных диодов прямые токи изменяются от нескольких миллиампер до сотен ампер. Обратный ток во много раз меньше прямого;

- постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при определенном среднем токе $I_{пр,ср}$ оно составляет 0,1+1,3 В;

- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\ max}$, для различных типов диодов изменяется от единицы до сотен вольт. Превышение $U_{обр\ max}$ переводит диод в режим пробоя. Различают электрический и тепловой пробой p-n – перехода. Электрический пробой может быть лавинным или туннельным и не сопровождается разрушением p-n – перехода (участок а-б на рис.8.3). Тепловой пробой, как правило, приводит к разрушению p-n –перехода и выходу диода из строя (участок б-в на рис. 8.3).

По мощности выпрямительные диоды подразделяются на маломощные

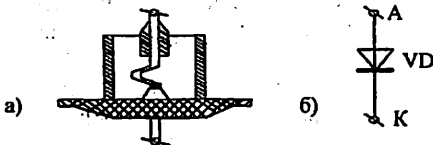


Рис.8.5. Разрез диода и его условное обозначение (б)

(прямой ток до 0,3 А), средней(ток от 0,3 до 10 А) и большой мощности (ток от 10 А до 1000 А и выше). Максимальное обратное напряжение диодов достигает нескольких тысяч вольт.

Конструкция германиевого сплавного диода типа Д7 показана на рис.8.5,а, условное обозначение выпрямительного полупроводникового диода - рис. 8.5,б.

2. Задания на предварительные расчёты

2.1. Рассчитать теоретическую ВАХ по формуле $U = U_T L_n (I/I_s + 1)$, и приняв $I_s = 0,1 \text{ мА}$, $U_T = 0,026 \text{ В}$. При расчёте прямой ветви ВАХ подставить положительные значения токов от $I = 0$ до 10 мА с шагом $\Delta I = 0,1 \text{ мА}$. Статическое и дифференциальное сопротивление диода для n-го номера расчёта или измерения рассчитываются соответственно по формулам $R_{ст\ n} = U_n / I_n$,

$$R_{диф\ n} = \Delta U_n / \Delta I_n = (U_n - U_{n-1}) / (I_n - I_{n-1}).$$

Результаты расчета занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Результаты предварительного расчёта прямой ВАХ, $R_{ст}$, $R_{диф}$ диода											
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{пр}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_{пр}$, мА											
$R_{ст}$, Ом											
$R_{диф}$, Ом											

Обратную ветвь ВАХ рассчитывать по формуле $I_{обр} = I_s \exp[(U/mU_T) - 1]$, подставляя в неё значения обратных (отрицательных) напряжений $U_{обр} = 0$ до -100 В и вычисляя значения обратных токов $I_{обр}$. Далее рассчитываются статическое и дифференциальное сопротивления диода, аналогично пункту 2.1.

Результаты расчётов занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2.

Результаты предварительного расчёта обратной ВАХ, $R_{ст}$, $R_{диф}$ диода													
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{обр}$	0	30	60	100	100,1	100,2	100,3	100,4	100,5	100,6	100,7	100,8	100,9
$I_{обр}$, мА													
$R_{ст}$, Ом													
$R_{диф}$, Ом													

3. Выполнение работы

3.1. Измерить прямую ветвь ВАХ диода (1N3064). Для её измерения необходимо собрать или загрузить готовую схему - файл Lb8-1.ewb (рис.8.6). Последовательно устанавливая значения прямого напряжения диода, задаваемого источником напряжения U_{pr} , равным: $U_{pr} = 0 - 1,0$ В, запишите в табл. 8.3 измеренные значения прямого тока диода $I_{пр}$. По результатам измерений рассчитать статические и дифференциальные сопротивления диода $R_{ст}$

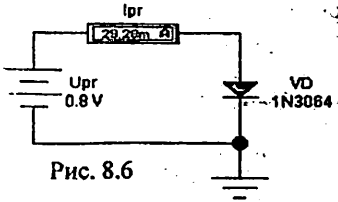


Рис. 8.6

$R_{диф}$ аналогично тому, как это было сделано при выполнении предварительного расчёта (см. п.2.1).

Таблица 8.3

Результаты измерения прямой ВАХ диода и расчёта по ним $R_{ст}$, $R_{диф}$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{пр}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_{пр}$, МА											
$R_{ст}$, Ом											
$R_{диф}$, Ом											

3.2. Измерение обратной ветви ВАХ диода на основе кремния (1N3064).

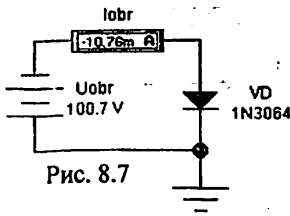


Рис. 8.7

Для её измерения необходимо собрать или загрузить готовую схему - файл Lb8-2.ewb (рис.8.7). Последовательно устанавливая значения напряжения источника, равными $U_{обр} = 0 - 100,9$ В, записать полученные значения тока $I_{обр}$ в табл. 8.4. По результатам измерений рассчитать статические и дифференциальные сопротивления диода $R_{ст}$, $R_{диф}$ аналогично тому, как это было сделано при выполнении предварительного расчёта (см. п.2.1). Результаты расчёта занести в табл. 8.4,

Таблица 8.4

Результаты измерения обратной ВАХ, $R_{ст}$, $R_{диф}$ диода

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{обр}$	0	30	60	100	100,1	100,2	100,3	100,4	100,5	100,6	100,7	100,8	100,9
$I_{обр}$, МА													
$R_{ст}$, Ом													
$R_{диф}$, Ом													

По полученным данным постройте графики $I_{пр}(U_{пр})$, $I_{обр}(U_{обр})$, $R_{ст}(U)$, $R_{диф}(U)$.

3.3. Измерение статической ВАХ диода с помощью осциллографа

Это наиболее быстрый и наглядный способ исследования ВАХ, путём непосредственного наблюдения её на экране осциллографа. Для этого надо собрать схему, приведенную на рис.8.8 или загрузить готовый схемный файл Lb8-3.ewb. На выходе функционального генератора(рис.8.9) установить

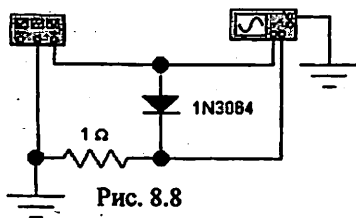


Рис. 8.8

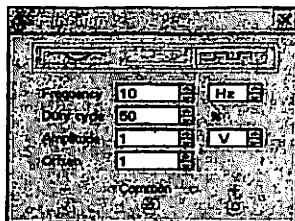


Рис. 8.9

треугольный сигнал с амплитудой 1 В, установить смещение **Offset** 1 В частотой 10 Гц и скважностью 50%. Осциллограф (рис.8.10) поставить в

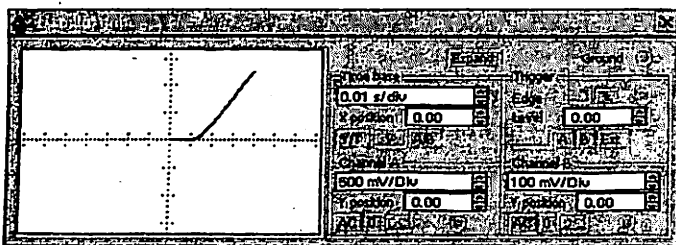


Рис.8.10

режим В/А. При таком подключении координата точки луча по горизонтальной оси осциллографа будет пропорциональна напряжению, подаваемому на А-вход, а по вертикальной – току через диод. Поскольку напряжение в вольтах на резисторе 1 Ом численно равно току через диод в амперах ($I=U/R=U/1=U$), то по вертикальной оси можно непосредственно считывать значения тока. Это и позволит получить вольтамперную характеристику непосредственно на экране осциллографа. Таким образом, ток и напряжение в каждой точке ВАХ вычисляются из соотношений: $I = Y K_{y, канВ}$, $U = X K_{y, канА}$, где Y, X – координата точки луча, в делениях шкалы осциллографа; $K_{y, канА}$, $K_{y, канВ}$ – масштабные множители осциллографа по оси Y каналов А и В, причем в размерности множителя канала В $K_{y, канВ}$ 1мВ соответствует 1мА. Подобрать значения $K_{y, канА}$, $K_{y, канВ}$ так, чтобы луч не выходил за пределы экрана, а изображение ВАХ было по возможности максимальным. Осевые линии на сетке экрана совпадают с осями ВАХ.

3.4. Снять статическую ВАХ диода в режиме большого сигнала, когда амплитуда сигнала превышает максимальное допустимое обратное напряжение, т.е. $U_m > |U_{обр,max}|$. Установить на выходе генератора треугольный сигнал с амплитудой 52 В, смещением -50 В, частотой 1 Гц (рис.8.11) и получить на экране осциллографа изображение ВАХ (рис.8.12).

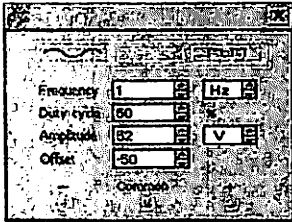


Рис.8.11

Зарисовать статическую ВАХ с нанесением по осям координат масштабов соответствующих значениям токов и напряжений.

Определить максимальное допустимое обратное напряжение ($U_{обр,max} = _$).

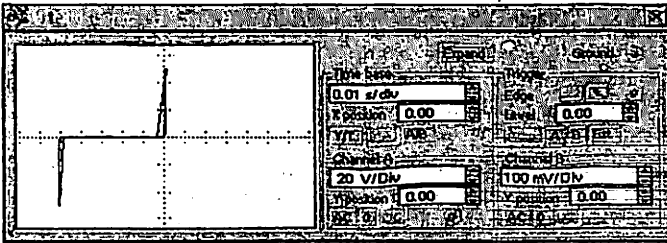


Рис.8.12

3.5. Исследование схемы двухполупериодного выпрямителя

Собрать схему (рис.8.13) или загрузить готовую схему Lb8-4.ewb двухполупе-

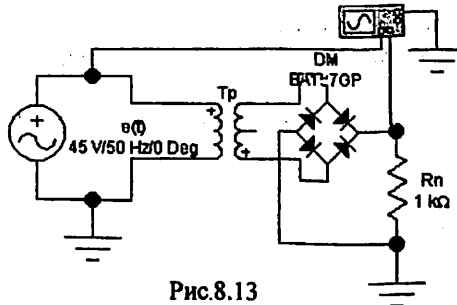


Рис.8.13

риодного выпрямителя. Зарисовать временные диаграммы: входного и выходного напряжения. Показать на схеме направления токов, протекающих в положительный и отрицательный полупериоды через сопротивление нагрузки. Открыть переднюю панель осциллографа и запустить программу EWB на расчет. В результате на экране осциллографа появится картина, представленная на рис. 8.14, на которой изображен график напряжения на входе (первичной обмотке трансформатора) - синусоида и график напряжения на выходе выпрямителя.

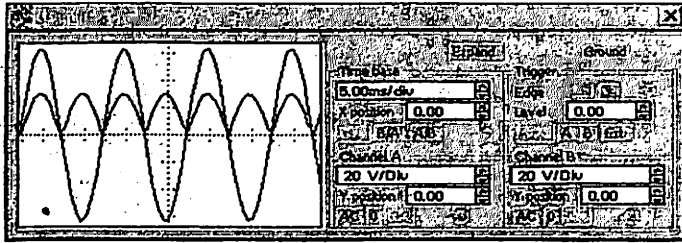


Рис.8.14

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Как возникает р-п переход при идеальном контакте полупроводников с разным типом электропроводности?
- 4.2. Нарисовать схему и объяснить способ снятия ВАХ диодов с помощью амперметра и вольтметра.
- 4.3. Нарисовать схему и объяснить способ снятия ВАХ диодов с помощью осциллографа.
- 4.4. Объяснить работу р-п перехода при прямом и обратном включении.
- 4.5. Чем отличаются ВАХ идеального р-п перехода и реального диода?
- 4.6. Дать определение дифференциального сопротивления диода и объяснить графически способ его определения.
- 4.7. Записать уравнение ВАХ выпрямительного диода, график ВАХ и его пояснение.
- 4.8. Нарисовать ВАХ стабилитрона и определить рабочий участок ВАХ при стабилизации напряжения.
- 4.9. Почему величина барьерной емкости зависит от приложенного напряжения?
- 4.10. Перечислить основные параметры диодов.
- 4.11. Нарисовать схему и объяснить работу однополупериодного выпрямителя.
- 4.12. Нарисовать схему и объяснить работу двухполупериодного выпрямителя.

9. ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы - ознакомление с принципом работы биполярных транзисторов (БПТ), получение навыков измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) для схемы включения с общим эмиттером (ОЭ) и методиками определения их параметров.

1. Теоретические сведения

1.1. Принципы работы, характеристики и параметры транзистора

Транзистором называется трехэлектродный полупроводниковый прибор, структура которого содержит два электронно-дырочных перехода. Транзистор представляет собой монокристаллическую пластину полупроводника, в которой с помощью особых технологических приемов созданы три области, две из них имеют одинаковый тип электропроводности и разделены между собой областью с иной электропроводностью. Эта средняя область называется базой, а две другие, крайние – эмиттером и коллектором.

Эмиттер осуществляет инжекцию (т.е. введение) неосновных носителей зарядов в базу, а коллектор – экстракцию (сбор) носителей. Транзистор, у которого эмиттер и коллектор имеют электропроводность р-типа относятся к р-п-р-типу (рис.9.1,а). Если же база р-типа, а коллектор и эмиттер п-типа, то это транзистор п-р-п-типа (рис.9.1,б). Так, если коллектор транзистора р-п-р-типа подключается к отрицательному полюсу источника, то коллектор транзистора п-р-п-типа к положительному. В условных графических изображениях эмиттер изображается в виде стрелки, которая указывает прямое направление тока эмиттерного перехода.

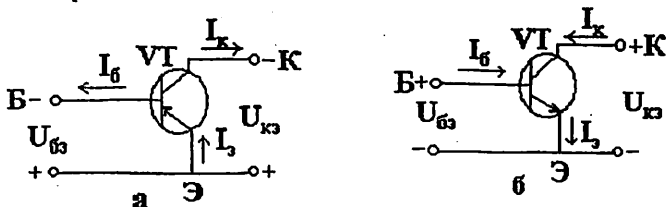


Рис.9.1

Принцип работы транзисторов обоих типов одинаков, различие заключается лишь в том, что в транзисторе п-р-п-типа через базу к коллектору движутся

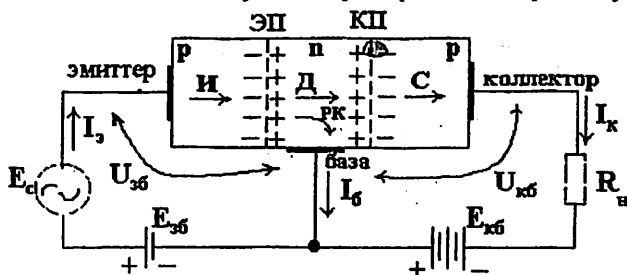


Рис.9.2

электроны, инжектированные эмиттером, а в транзисторе р-п-р-типа – дырки. Для этого к электродам транзистора подключают источники напряжения обратной полярности.

Принцип работы БПТ рассмотрим на примере транзистора р-п-р типа, включенного по схеме с общей базой (ОБ) (рис.9.2). Между р- и п-областями возникают р-п переходы. Переход между эмиттером и базой называется эмиттерным (ЭП), а переход между коллектором и базой - коллекторным (КП). Как показано на рис.9.2, КП смещен в обратном направлении. Под действием $E_{кб}$ образуется обратный ток $I_{к0}$ в коллекторной цепи, обусловленный движением неосновных носителей зарядов. Этот ток возрастает с увеличением температуры, поэтому его называют тепловым током коллектора - $I_{к0}$.

ЭП смещен в прямом направлении (рис.9.2). Через ЭП возникает инжекция дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. Ток эмиттера равен сумме токов базы $I_б$ и коллектора $I_к$:

$$I_э = I_к + I_б \quad (9.1)$$

Ток коллектора состоит из потока дырок инжектируемых эмиттером за вычетом тока базы и собственного теплового тока коллекторного перехода:

$$I_к = \alpha I_э + I_{к0}, \quad (9.2)$$

где $\alpha = I_к/I_э$ - коэффициент передачи тока эмиттера; $I_{к0}$ - тепловой ток обратно включенного коллекторного перехода. Отсюда, ток базы равен:

$$I_б = I_э - I_{к0} = (1 - \alpha) I_э - I_{к0} \quad (9.3)$$

Этот ток составляет не более 1% от тока эмиттера.

Все сказанное справедливо также для транзистора п-р-п-типа с учетом перемены на противоположное направление движения токов при смене знаков источников питания схемы транзистора.

В зависимости от того, какой из выводов транзистора является общим между входным источником сигнала и выходной цепью транзистора существуют три схемы включения транзистора в электрическую цепь: с общим эмиттером (ОБ), с общим коллектором (ОЭ), с общей базой (ОК) (рис. 9.3).

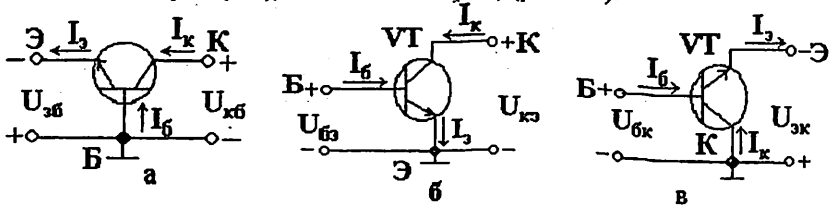


Рис.9.3.

Основными ВАХ транзистора являются входная и выходная характеристики. Зависимость $U_{вх} = f_1(I_{вх})|_{U_{вых} = const}$ называют входной статической ВАХ.

Зависимость $I_{вых} = f_2(U_{вых})|_{I_{вх} = const}$ выходной статической ВАХ.

При анализе работы транзистора и расчетах разных схем. используется система параметров малого сигнала. Наиболее употребительна система h-параметров, связывающая малые приращения (дифференциалы) напряжения на входе транзистора dU_1 и выходного тока dI_2 с малым приращением входного тока dI_1 и выходного напряжения dU_2 транзистора:

$$\begin{aligned} dU_1 &= h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2, \\ dI_2 &= h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2. \end{aligned} \quad (9.4)$$

Наиболее часто на практике применяют схему включения транзистора с ОЭ. При таком включении входным электродом является база, эмиттер заземляется (общий электрод), а выходным электродом является коллектор (рис.9.3,б).

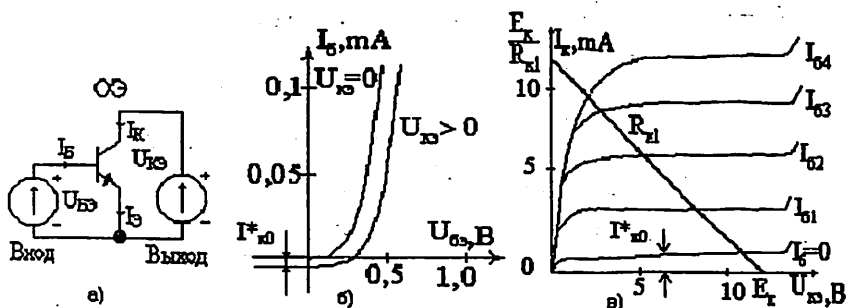


Рис. 9.4

Основным параметром для схемы с ОЭ является коэффициент усиления тока

$$h_{213} = \beta = \Delta I_k / \Delta I_6 \text{ при } U_{кэ} = \text{const} \quad (9.5)$$

Параметр β связан с коэффициентом передачи тока эмиттера соотношением

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha). \quad (9.6)$$

Величина β изменяется в интервале значений $\beta = 10 \div 200$.

При расчётах схем используется входное дифференциальное сопротивление

$$h_{113} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_6 \text{ при } U_{кэ} = \text{const} \quad (9.7)$$

и выходная дифференциальная проводимость

$$h_{223} = \Delta I_k / \Delta U_{кэ} \text{ при } I_6 = \text{const}. \quad (9.8)$$

Для схемы с ОЭ входное сопротивление составляет единицы кОм, а выходная проводимость - $10^{-4} - 10^{-5}$ См.

Входной характеристикой транзистора, включенного по схеме с ОЭ, является зависимость напряжения $U_{бэ}$ от входного тока I_6 , $U_{бэ} = f_1(I_6)$ при заданном напряжении $U_{кэ}$. Совокупность таких зависимостей называется семейством входных характеристик транзистора (рис.9.4, б).

Выходной характеристикой транзистора по схеме с ОЭ считается зависимость $I_k = f_2(U_{кэ})$ при заданном токе I_6 (рис.9.4, в).

1.2. Методика графического определения h-параметров транзистора

Располагая вольт-амперными характеристиками транзистора, можно графическим путем определить низкочастотные значения h-параметров. Для определения h-параметров необходимо задать рабочую точку, например А ($I_{6А}$, $U_{кэА}$), в которой требуется найти параметры.

Параметры h_{113} и h_{123} находят по входной характеристике $U_{бэ} = f_1(I_6)|_{U_{кэ} = \text{const}}$. Определим h_{113} для заданной рабочей точки А ($I_{6А}$, $U_{кэА}$). На входной характеристике выбираем точку А, соответствующую заданной рабочей точке (рис.9.5). Выбираем вблизи рабочей точки А две вспомогательные точки А₁ и А₂ (приблизительно на одинаковом расстоянии), определим по ним $\Delta U_{бэ}$ и ΔI_6 и рассчитаем входное дифференциальное сопротивление, по формуле: $h_{113} = (\Delta U_{бэ} / \Delta I_6)|_{U_{кэ} = \text{const}}$.

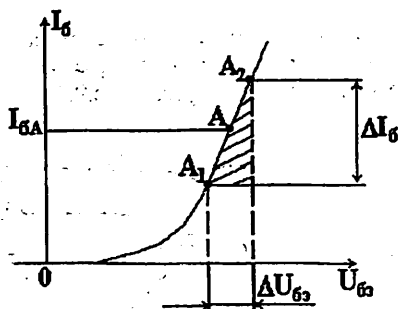


Рис. 9.5

Приращения ΔU_{63} и ΔI_6 выбирают так, чтобы не выходить за пределы линейного участка, их можно примерно принять за (10-20)% от значений рабочей точки.

Графическое определение параметра $h_{123} = \Delta U_{63} / \Delta U_{к3}$ затруднено, так как семейство входных характеристик при различных $\Delta U_{к3} > 0$ практически сливается в одну (рис.9.4 а).

Параметры h_{223} и h_{213} определяют из семейства выходных характеристик транзистора $I_k = f_1(U_{к3})$ (рис.

9.6).

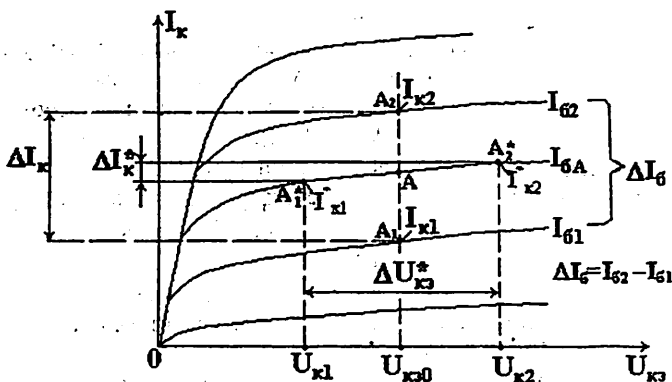


Рис. 9.6

Параметр $h_{213} = (\Delta I_k / \Delta I_6) |_{U_{к3} = \text{const}}$ находится в заданной рабочей точке А (I_{6A} , $U_{к3A}$). Для нахождения приращений выбирают две вспомогательные точки A_1 и A_2 вблизи рабочей точки А при постоянном $U_{к3} = U_{к30}$. Приращению тока базы ΔI_6 следует брать, как $\Delta I_6 = I_{62} - I_{61}$, где I_{62} и I_{61} определены как токи базы в точках A_2 и A_1 . Этому приращению ΔI_6 соответствует приращение коллекторного тока $\Delta I_k = I_{k2} - I_{k1}$, где I_{k2} и I_{k1} определены в точках A_2 и A_1 . Тогда дифференциальный коэффициент передачи тока базы рассчитаем по формуле

$$h_{213} = (\Delta I_k / \Delta I_6) |_{U_{к3} = \text{const}}$$

Параметр $h_{223} = (\Delta I_k / \Delta U_{к3}) |_{I_6 = \text{const}}$ определяется по наклону выходной характеристики (рис. 9.6) в заданной рабочей точке А (I_{6A} , $U_{к3A}$), при постоянном токе базы I_6 . Для нахождения приращений выбирают две вспомогательные точки A_1 и A_2 . Для этих точек определяют $\Delta U_{к3} |_{I_6 = I_{6A}} = U_{к2} - U_{к1}$ - приращение коллекторного напряжения и приращение коллекторного тока $\Delta I_k = I_{k2} - I_{k1}$. При этом из семейства выходных характеристик следует выбирать ту характеристику, которая снята при выбранном значении тока базы $I_6 = I_{6A}$.

2. Задания на подготовку к выполнению работы

Ознакомиться со схемами включения биполярного транзистора, с методикой исследования и снятия статических вольт-амперных характеристик с ОЭ; с методикой графического определения h -параметров транзистора.

3. Выполнение работы

Задание 3.1. Исследование статических ВАХ транзистора, включённого по схеме с ОЭ с помощью амперметра и вольтметра.

3.1.1. Измерить семейство входных ВАХ $-I_B = F(U_{B3})|_{U_{K3} = \text{const}}$.

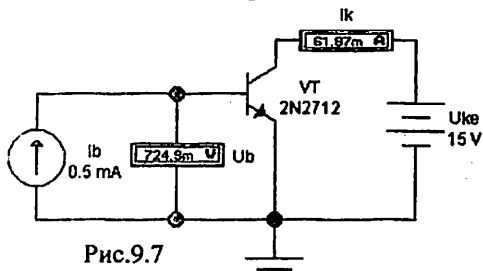


Рис.9.7

Собрать схему (рис.9.7) или взять готовую, загрузив файл Lab8-1.ewb. Измерения проводить при $I_B = (0; 0.001; 0.01; \dots; 1)$ мА, при трёх значениях $U_{K3} = (0; 5; 15)$ В. Результаты измерений U_{B3} занести в табл. 9.1

Таблица 9.1

$U_{K3}, \text{В}$	$I_B, \text{мА}$	0	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
0	$U_{B3}, \text{мВ}$											
5												
20												

По результатам измерений построить графики входных ВАХ $I_B(U_{B3})$.

3.1.2. Измерить семейство выходных ВАХ $-I_K = F(U_{K3})|_{I_B = \text{const}}$.

Для измерения выходных ВАХ используется та же схема, что и при измерении входных ВАХ (рис 9.7). Измерения проводить при напряжениях коллектор-эмиттер $U_{K3} = (1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 15; 20)$ В, при пяти значениях тока базы $I_B = (0,01; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8)$ мА. Результаты измерений U_{B3} занести в табл.9.2

Таблица 9.2

$I_B, \text{мА}$	$U_{K3}, \text{В}$	1	2	3	4	6	8	10	15	20
0,01	$I_K, \text{мА}$									
0,2										
0,4										
0,6										
0,8										

По результатам измерений построить графики семейства выходных ВАХ.

Задание 3.2. Исследование статических ВАХ транзистора, включённого по схеме с ОЭ с помощью осциллографа

3.2.1. Снять входную ВАХ – $I_c = F(U_{бэ})|_{U_{кэ} = const}$

Загрузить схемный файл Lab8-2.ewb в результате на экране монитора ПК появится схема, представленная на рис.9.8.

На входе схемы содержится источник напряжения (тока) базы, закон изме-

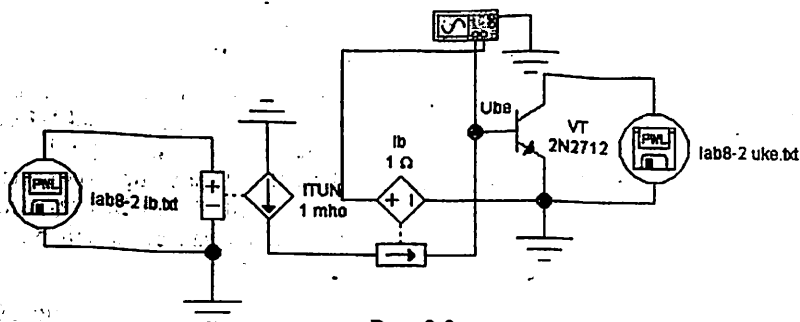


Рис. 9.8

нения которого определяется текстовым файлом lab8-2 ib.txt (рис.9.9 а). На входе схемы содержится источник коллекторного напряжения, закон изменения которого определяется текстовым файлом lab8-2 uke.txt (рис.9.9 б). Для преобразования источника напряжения в источник тока служит источник напряжения, управляемый током (INUT). После включения осциллографа, схемы на расчёт и соответствующей настройки осциллографа на его экране можно получить изображения семейства входных ВАХ транзистора (рис.9.10)

0 0	0 0
0.1 0.001	0.1 0
0.2 0	0.1 0.1
0.3 0.001	0.2 0.1
0.4 0	0.2 5
1 0	0.3 5
	0.3 20
	0.4 20
	1 20

Рис. 9.9

Более удобное для снятия показаний входной ВАХ можно получить путём выбора соответствующих пределов изменения по оси «х», «у» а также правильный выбор сетки, меток и числовых значений на указанных осях.

Методика работы с двухканальным осциллографом приведена в приложении П1 в конце данного методического пособия. В результате соответствующей настройки осциллографа было получено изобра-

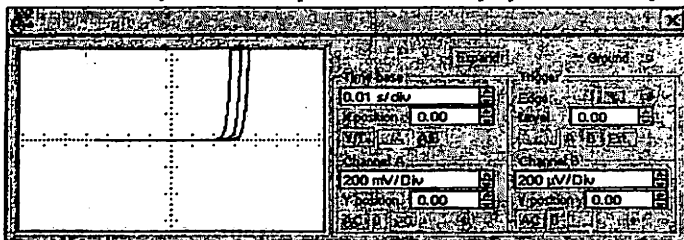


Рис.9.10.

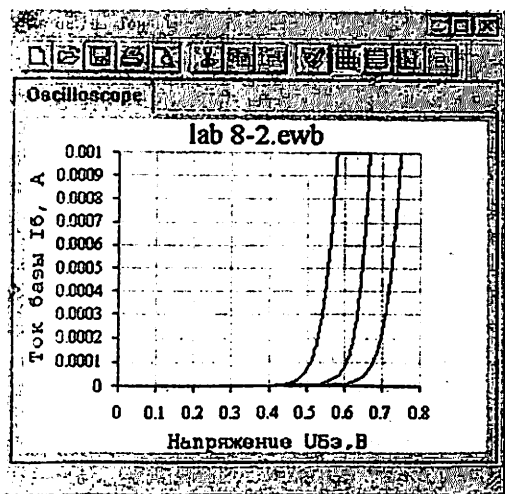


Рис.9.11

ВАХ при

$U_{кэ} = 0,1$ В и правая при $U_{кэ} = 5$ В и $U_{кэ} = 20$ В. Видно, что входные ВАХ при $U_{кэ} = 5$ В и $U_{кэ} = 20$ В совпадают, что свидетельствует о том, что уже при $U_{кэ} > 5$ В влияние коллекторного напряжения на ток базы практически отсутствует..

3.2.2. Снять семейство выходных ВАХ – $I_{к} = F(U_{кэ})|_{I_{б} = const}$

Собрать схему рис.9.12 или использовать готовую схему, загрузив файл Lab8-4.ewb.

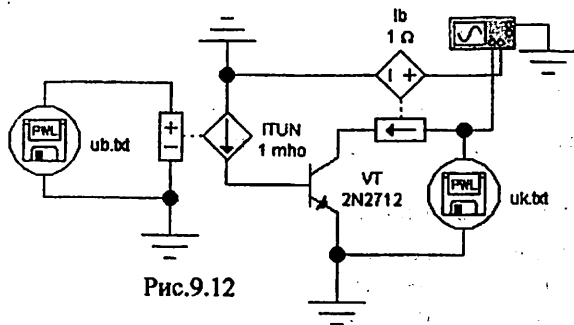


Рис.9.12

0 0
0 0.0001
0.1 0.0001
0.1 0.002
0.2 0.002
0.2 0.004
0.3 0.004
0.3 0.006
0.4 0.006
0.4 0.008
10 0.008

Рис.9.13

На входе схемы содержится источник напряжения, закон изменения которого определяется текстовым файлом ub.txt (рис.9.13,а). На выходе схемы - источник коллекторного напряжения, закон которого определяется текстовым файлом uk.txt (рис.9.13,б). Для преобразования источника напряжения в источник тока служит источник напряжения, управляемый током (INUT). После включения осциллографа, схемы на расчёт и соответствующей настройки осциллографа на его экране можно получить изо-

бражение семейства выходных ВАХ транзистора (рис.9.14). Более удобное для снятия показаний выходных ВАХ можно получить путём выбора соответствующих пределов изменения по оси «х», «у», а также правильный выбор сетки, меток и числовых значений на указанных осях

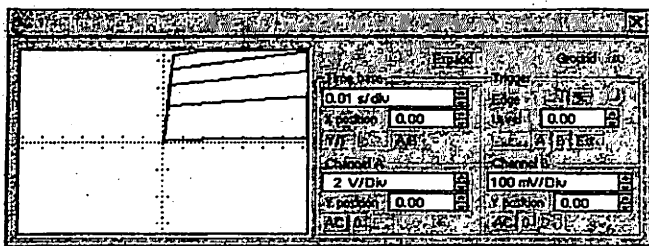


Рис.9.14

В результате соответствующей настройки осциллографа было получено изображение входных ВАХ (рис.9.15), из которого с достаточной точностью можно снять её цифровые значения.

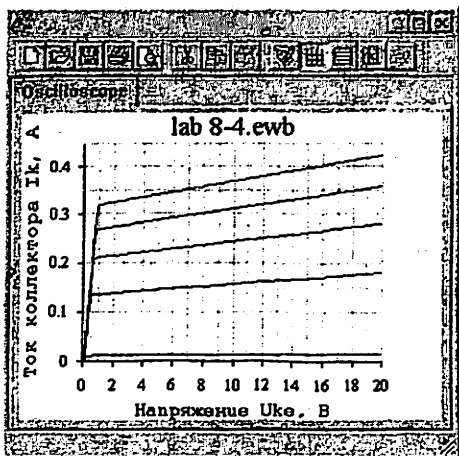


Рис. 9.15

Данные занести в таблицу, аналогичную табл.9.2, и сравнить их с результатами измерений, полученными с помощью вольтметра и амперметра. Целесообразно убедиться в их соответствии. На вертикальной оси (рис.9.15) содержатся цифры 0; 0,1; 0,2;...0,4 отображающие значение тока коллектора I_b в амперах. Цифры по горизонтали 0; 2;...;20 отображают напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$, в вольтах. На рис.9.9 верхняя кривая линия- ВАХ при $I_b = 0,8$ мА ; ниже - $I_b = 0,6$ мА , затем - $I_b = 0,4$ мА, $I_b = 0,2$ мА и $I_b = 0,01$ мА. Полученное изображение ВАХ, доста-

5. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое входные и выходные ВАХ для схемы с ОЭ?
2. Какова схема и методика исследования ВАХ транзистора с ОЭ?
3. Перечислить статические h-параметры транзистора и описать методику их определения по ВАХ.
4. Объяснить методику и схему измерения входной и выходной ВАХ биполярного транзистора, с помощью амперметра-вольтметра.
5. Объяснить методику и схему измерения входной и выходной ВАХ биполярного транзистора с помощью осциллографа в режиме характериографа.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы - изучить принципа работы и основные характеристики полевого транзистора (ПТ); методику измерения статических ВАХ ПТ, включённого по схеме с общим истоком (ОИ); методику определения дифференциальных параметров ПТ по измеренным ВАХ.

1. Теоретические сведения

ПТ – это трехэлектродный полупроводниковый прибор, в канале которого, представляющем полупроводник одного типа проводимости, ток создается внешним продольным напряжением, а управление током осуществляется поперечным электрическим полем напряжения, приложенным к управляющему электроду – *затвору*.

Все полевые транзисторы делят на две группы: полевые транзисторы с управляющим *p-n*- переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором. В обеих группах полевых транзисторов электроды называют *истоком* И (соответствует эмиттеру Э биполярного транзистора), *затвором* З (соответствует базе Б) и *стоком* С (соответствует коллектору К).

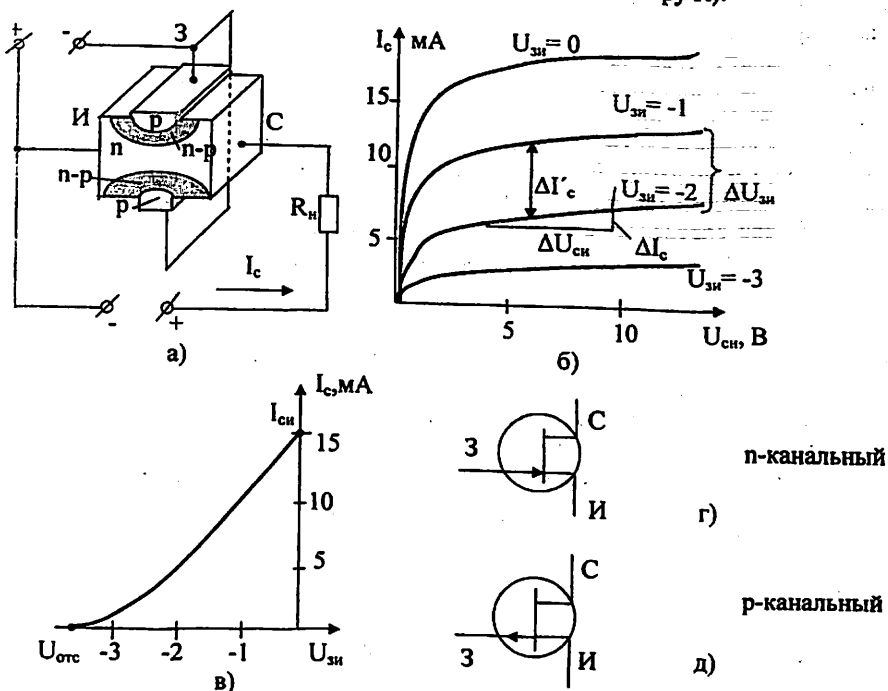


Рис. 10.1

1.1. Полевые транзисторы с $p-n$ - переходом

На рис.10.1,а схематически изображен ПТ с $p-n$ - переходом и каналом n - типа. Исток, сток и затвор (образованный параллельно соединенными p - областями) включаются в цепь с помощью выводов с n - и p - областями. Подача на затвор отрицательного напряжения относительно истока приводит к обеднению электронами участков канала, примыкающих к затвору. Ширина $p-n$ -перехода возрастает, а сечение канала уменьшается, что приводит к увеличению его сопротивления.

Рассмотрим выходные характеристики полевого транзистора (рис.10.1,б). При малых значениях напряжения между стоком и истоком $U_{си}$ ток I_c пропорционален напряжению $U_{си}$ и определяется исходным сечением канала. С увеличением его положительный потенциал, приложенный к стоку, являясь обратным для $p-n$ - переходов, расширяет их в области, примыкающей к стоку, в результате чего канал принимает форму воронки у стокового конца с повышенным сопротивлением для тока I_c . В итоге наступает режим насыщения (рис.10.1,б).

При подаче на затвор отрицательного напряжения $U_{зи}$ исходное сечение канала уменьшается и режим насыщения наступает раньше. Поэтому выходные характеристики лежат ниже.

Зависимость тока на выходе I_c от напряжения на входе называется *проходной, передаточной или стокозатворной характеристикой* (рис.10.1,в). Напряжение $U_{зи}$, при котором канал полностью перекрывается ($I_c=0$), называется *напряжением отсечки* $U_{отс}$. Так как $U_{зи}$ является обратным для $p-n$ - переходов, ток во входной цепи представляет обратный ток для $p-n$ -перехода и ввиду его малости ПТ можно считать прибором, управляемым напряжением. Это свойство определяет высокое входное сопротивление ПТ. При величинах напряжений $U_{зи}$ больших $U_{отс}$ передаточная характеристика описывается

$$\text{уравнением} \quad I_c = I_{си} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}}\right)^2, \quad (10.1)$$

где $I_{си}$ – ток стока при $U_{зи} = 0$. На практике эта величина тока для ПТ является предельной, так как положительных напряжений затвор – исток стараются избегать, чтобы не потерять преимуществ, обеспечиваемых очень малым током затвора (большое входное сопротивление).

По передаточной характеристике транзистора может быть определен такой его параметр, как крутизна: $S = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}}$ при $U_{си} = \text{const}$.

Дифференцированием выражения $I_c = I_{си} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}}\right)^2$ можно определить

$$\text{крутизну} \quad S = \frac{2I_{си}}{U_{отс}^2} (U_{зи} - U_{отс}) = \frac{2}{|U_{отс}|} \sqrt{I_{си} \cdot I_c}. \quad (10.2)$$

Особый интерес представляет значение крутизны при $I_c = I_{си}$. Для ПТ с управляющим $p-n$ -переходом это максимальное значение крутизны.

$S_{\max} = \frac{2I_{\text{сн}}}{U_{\text{отс}}}$. Можно отметить, что при равных токах стока полевого и коллектора биполярного транзисторов, крутизна полевого транзистора существенно меньше, чем у биполярного.

По выходным характеристикам можно определить выходное или внутреннее сопротивление транзистора $r_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{сн}}}{\Delta I_{\text{с}}}$ при $U_{\text{зи}} = \text{const}$.

Наряду с рассмотренным транзистором с n-каналом имеются транзисторы с p-каналом. Принцип действия их аналогичен; различие заключается лишь в противоположной полярности источников питания и в соответствующих условных обозначениях (рис.10.1, г, д). ПТ с p-n-переходом применяют в основном для усиления сигналов.

1.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором

В этой группе транзисторов затвор представляет собой тонкую пленку металла, изолированную от полупроводника, в котором формируется проводящий канал. В зависимости от вида изоляции различают МДП и МОП – транзисторы.

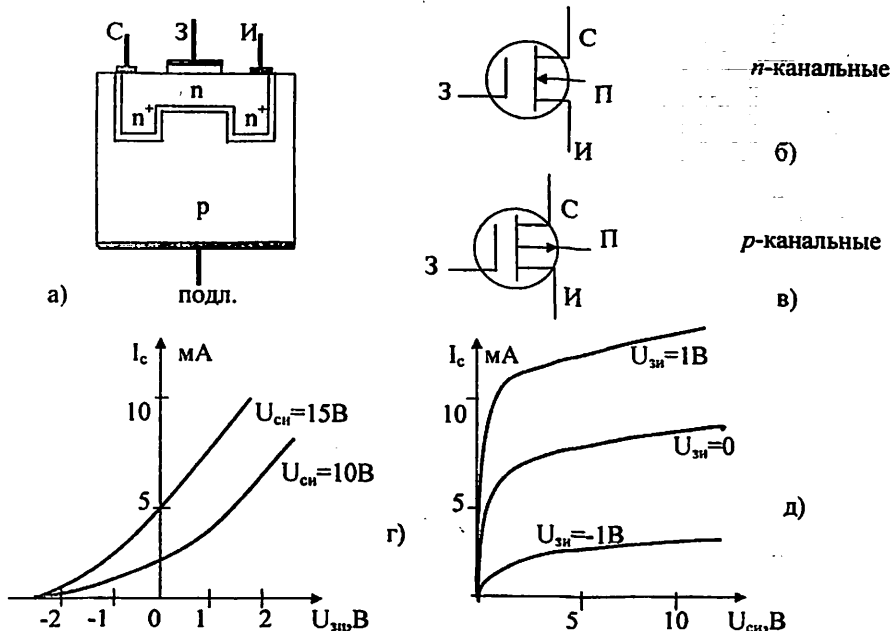


Рис. 10.2.

Исток и сток формируют в сильно легированных областях полупроводника. Как МДП, так и МОП – транзисторы могут быть выполнены с каналом p- и n-типов. Канал в этой группе транзисторов может быть встроенным (т.е.

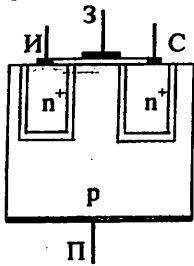
созданным при изготовлении) и индуцированным (т.е. наводимым под воздействием напряжения, приложенного к затвору).

На рис.10.2,а изображен МДП – транзистор со встроенным каналом p -типа, соединяющим исток и сток (n^+ - области). Эти области образованы в подложке – полупроводнике p -типа. В зависимости от полярности напряжение $U_{зп}$, приложенное

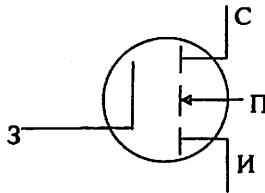
к затвору относительно истока, может обедняться и обогащаться основными носителями – электронами. При отрицательном напряжении на затворе $U_{зп}$ электроны выталкиваются из области канала в подложку, канал обедняется носителями и ток I_c снижается. Положительное напряжение на затворе втягивает электроны из подложки в канал и I_c через канал возрастает. В отличие ПТ с p - n -переходом, МДП – транзистор со встроенным каналом может управляться как отрицательным, так и положительным напряжением, что отражено на его передаточных и выходных характеристиках (рис.10.2, г, д).

1.3. Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом

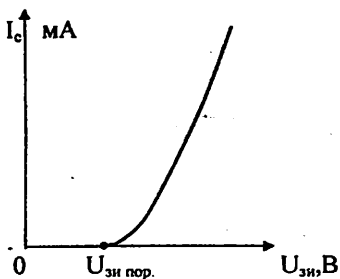
Этот вид транзистора отличается от предыдущего тем, что при отсутствии напряжения на затворе канал отсутствует (рис.10.3).



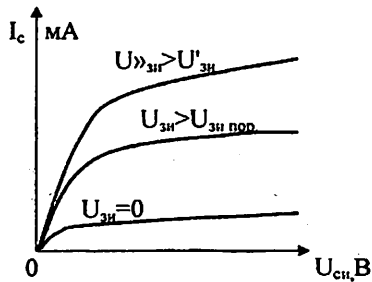
а)



б)



в)



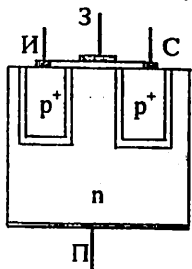
г)

Рис. 10.3

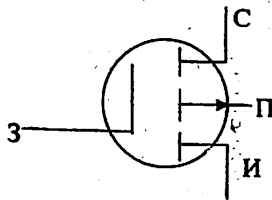
Подача на затвор отрицательного напряжения не изменяет картины. Если же на затвор подать положительное напряжение больше порогового $U_{зп} > U_{зп\text{ пор}}$, то созданное им электрическое поле “втягивает” электроны из n^+ областей,

образуя тонкий слой *p*-типа в приповерхностной области *p*-подложки (рис.10.3, а). Этот слой соединяет исток и сток, являясь каналом *p*-типа. От подложки канал изолируется возникшим обедненным слоем. Таким образом, ПТ с индуцированным *p*-каналом, в отличие от транзисторов со встроенным каналом, управляются только положительным напряжением $U_{зп} > U_{зп\text{ пор}}$. Значение $U_{зп\text{ пор}} \approx 0,2 \div 0,1$ В.

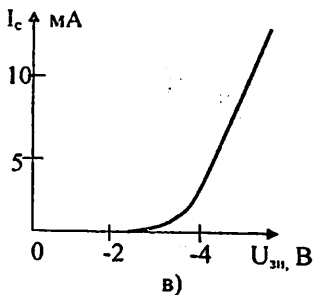
Значительно больше пороговое напряжение у транзисторов с индуцированным *p*-каналом. Значение $U_{зп\text{ пор}} \approx -(2 \div 4)$ В. Управляются они отрицательным входным сигналом (рис.10.4, в).



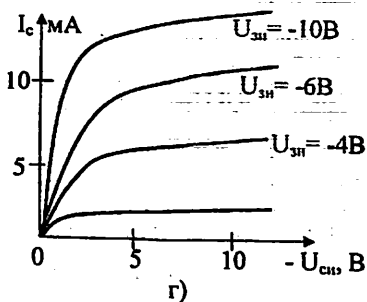
а)



б)



в)



г)

Рис. 10.4.

1.4. Преимущества полевых транзисторов

- высокое входное сопротивление для транзисторов с *p-n*- переходом $10^6 \div 10^9$ Ом, а для МДП или МОП транзисторов $10^{13} \div 10^{15}$ Ом;
- малый уровень собственных шумов, нет рекомбинационного шума;
- высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных микросхем.

2. Предварительный расчёт

Для заданного варианта (см. табл. 10.1) выполнить расчёт проходной ВАХ $I_c(U_{зи})$ по формуле (10.1) и крутизну $S(U_{зи})$ по формуле (10.2).

Таблица 10.1

Варианты исходных данных для предварительного расчёта

n	Тип ПТ	$U_{отс.}$ В	$S_{м.}$ мА/В	$I_{см.}$ мА
1	J2N3970	-4,514	4,032	6,154
2	J2N3971	-2,598	6,313	46,40
3	J2N3972	-1,403	9,109	18,50
4	J2N4092	-2,933	4,032	37,17
5	J2N4093	-1,989	5,695	23,75
6	J2N4392	-3,018	5,101	49,47
7	J2N4393	-1,422	9,109	19,00
8	J2N4857	-3,050	6,313	61,67
9	J2N4858	-2,387	7,748	45,25
10	J2N4860	-2,998	6,313	59,88
11	J2N4861	-2,308	8,362	46,17

n	Тип ПТ	$U_{отс.}$ В	$S_{м.}$ мА/В	$I_{см.}$ мА
12	J2N5078	-3,970	8,508	14,21
13	J2N5432	-5,397	9,105	341,3
14	J2N5433	-4,160	12,42	160,5
15	J2N5434	-1,906	18,37	76,61
16	J2N5564	-1,447	9,109	19,94
17	NF5101	-0,741	12,42	6,901
18	NF5102	-1,001	14,28	14,99
19	NF5103	-1,400	14,28	29,23
20	J2N4859	-5,431	5,084	98,03
21	J2N4391	-5,803	2,658	97,55
22	J2N4392	-3,018	5,1013	49,47

Результаты расчета занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2

$U_{зи}$	$U_{отс}$	$0,8 U_{отс}$	$0,6 U_{отс}$	$0,4 U_{отс}$	$0,2 U_{отс}$	0
$U_{зи}, В$						
$I_c, мА$						
$S, мА/В$						

По результатам расчета (табл. 10.2) построить графики $I_c(U_{зи})$ и $S(U_{зи})$.

3. Выполнение работы

3.1. Исследование ВАХ n-канального полевого транзистора с p-n-переходом и определение его основных параметров

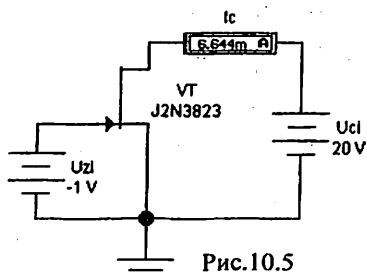


Рис.10.5

Для изучения работы ПТ с управляющим p-n переходом необходимо собрать или загрузить готовую цепь (файл Lab10-1.ewb), схема которой представлена на рис. 10.5. На ней: $U_{зи}$ – источник постоянного напряжения между затвором и истоком ($0=5$ В); $U_{си}$ – источник постоянного напряжения между стоком и истоком ($0=20$ В); I_c – ток стока, измеряемый миллиамперметром “Ic”.

Задание 1. Снять передаточную характеристику полевого транзистора.

Передаточная (сток – затворная) характеристика полевого транзистора представляет собой зависимость тока стока от величины напряжения на затворе при $U_{си} = \text{const}$: $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$.

Для получения семейства этих передаточных характеристик $I_c = f(U_{зи})$ в схеме рис. 10.5 установить постоянное напряжение между стоком и истоком $U_{си} = 2 \text{ В}$ и, изменяя напряжение на затворе в диапазоне $U_{зи} = U_{отс} \dots 0$. Записать в табл. 10.3 значения тока стока “ I_c ”. Далее выполнить аналогичные измерения при $U_{си} = 4 \text{ В}$ и $U_{си} = 8 \text{ В}$. Произвести измерения в приемлемом количестве точек (5-7) для каждого $U_{си}$.

Таблица 10.3

№ п/п	$U_{си} = 2 \text{ В}$		$U_{си} = 4 \text{ В}$		$U_{си} = 8 \text{ В}$	
	$U_{зи}, \text{ В}$	$I_c, \text{ мА}$	$U_{зи}, \text{ В}$	$I_c, \text{ мА}$	$U_{зи}, \text{ В}$	$I_c, \text{ мА}$
1.						
2.						
...						
$U_{отс}$						
$S_{эксп}$						
S_{max}						

По передаточной характеристике транзистора определить крутизну:

$$S_{кр} = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} \approx \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const}.$$

Зная напряжение отсечки $U_{отс}$ при $I_c = 0$ и, учитывая уравнение

$$I_c = I_{сн} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}}\right)^2, \text{ определить максимальное значение крутизны: } S_{max} = \frac{2I_{сн}}{|U_{отс}|},$$

где $I_{сн}$ – ток стока при $U_{зи} = 0$. Результаты расчета свести в табл. 10.3.

Задание 2. Снять семейство выходных характеристик ПТ.

Выходная характеристика – это зависимость тока стока I_c от напряжения сток – исток $U_{си}$ при постоянном напряжении затвор–исток $U_{зи}$: $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$.

Устанавливая в схеме рис.10.5 постоянные значения $U_{зи} = 0; -0,5; -1$ и, изменяя напряжение сток-исток в диапазоне $U_{си} = U_{отс} \dots 0$, записать значения тока стока I_c по миллиамперметру “ I_c ”. Результаты эксперимента свести в табл. 10.4.

Таблица 10.4

№ п/п	$U_{зи} = 0 В$		$U_{зи} = -0,5 В$		$U_{зи} = -1 В$		$U_{зи} = -2 В$	
	$U_{си}, В$	$I_{сг}, мА$	$U_{си}, В$	$I_{сг}, мА$	$U_{си}, В$	$I_{сг}, мА$	$U_{си}, В$	$I_{сг}, мА$
1.								
2.								
...								
$\Gamma_{вых}$								
K_u								

Построив семейство выходных характеристик, определить:

1. Дифференциальное выходное сопротивление

$$\Gamma_{вых} = \Gamma_{си} = \frac{\partial U_{си}}{\partial I_{сг}} \approx \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_{сг}} \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

2. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \text{ при } I_{сг} = \text{const.}$$

Результаты расчетов свести в таблицу 10.2.

Задание 3. Выполнить компьютерное моделирование ВАХ с использованием осциллографа

Используя возможности компьютерного измерителя ВАХ Electronics Workbench 5.0с, наблюдать семейства исследуемых ПТ J2N3823 и сравнить их с полученными с помощью амперметра и вольтметра.

Для получение изображения передаточной ВАХ $I_{сг}(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ можно воспользоваться схемой, приведённой на рис. 10.6. Её можно собрать или воспользоваться готовой, загрузив файл Lb10-2.ewb.

В цепи затвора ПТ J2N3823 содержится источник, напряжение которого определяется текстовым файлом uz1.txt (рис.10.7), т.е. за 0,1 сек. линейно нарастает от -3 В до 0. К стоку приложено

0-3
0.1 0
1 0

Рис.10.7

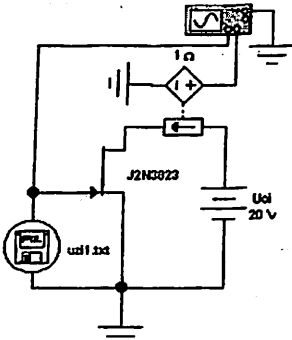


Рис.10.6

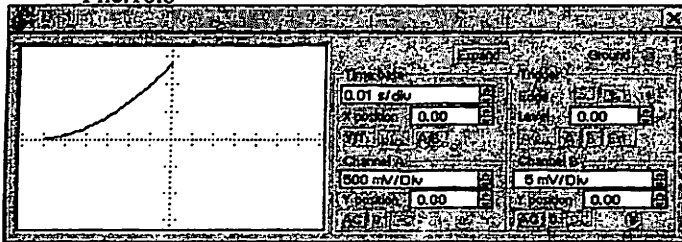


Рис.10.8

постоянное напряжение $U_{ст}=20 В$. В стоковой цепи содержится источник напряжения, управляемый током (ИНУТ) стока. Напряжению на его выходе, равному

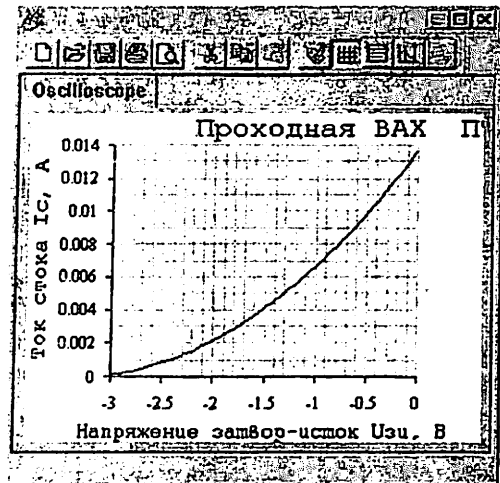


Рис.10.9

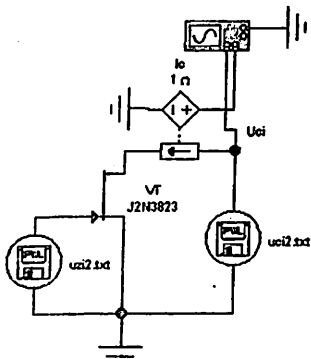


Рис.10.10

0 -3
0.1 -3
0.1 -2.5
0.2 -2.5
0.2 -2
0.3 -2
0.3 -1.5
0.4 -1.5
0.4 -1
0.5 -1
0.5 -0.5
0.6 -0.5
0.6 0
0.7 0

Рис.10.11

0 0
0.1 20
0.2 0
0.3 20
0.4 0
0.5 20
0.6 0
0.7 20
3 20

Рис.10.12

1В соответствует ток стока, равный 1 А. После раскрытия передней панели осциллографа и запуска программы на расчёт на экране осциллографа появится изображение проходной ВАХ ПТ (рис.10.8). После соответствующей настройки можно получить достаточно подробное изображение проходной ВАХ ПТ J2N3823 (рис.10.9). Методика настройки изображения ВАХ изложена в приложении П1.

Для получения изображения семейства выходных ВАХ $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = const$ можно воспользоваться схемой, приведённой на рис. 10.10. Её можно собрать или воспользоваться готовой, загрузив

файл Lb10-3.ewb.

В цепи затвора ПТ J2N3823 содержится источник, напряжение которого определяется текстовым файлом uzi2.txt (рис.10.11). К стоку приложено напряжение $U_{си}$, закон изменения которого определяется текстовым файлом uc2.txt (рис.10.12). В стоковой цепи содержится также источник напряжения, управляемый током (ИНУТ). Одному вольту выходного напряжения ИНУТ

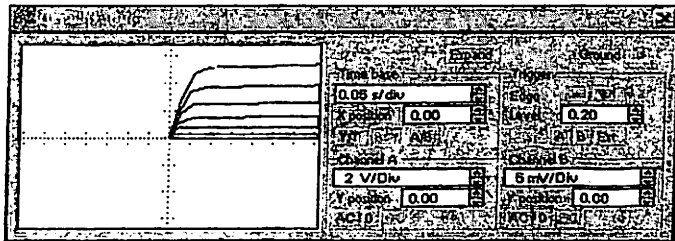


Рис.10.13

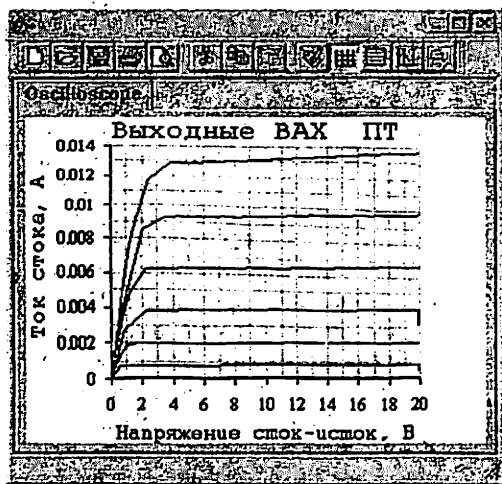


Рис.10.14

соответствует току стока, равному 1 А. После раскрытия передней панели осциллографа и запуска программы на расчёт на экране осциллографа появится изображение семейства выходной ВАХ ПТ (рис.10.13). После соответствующей настройки можно получить достаточно подробное изображение семейства выходных ВАХ ПТ J2N3823 (рис.10.14). Методика настройки изображения ВАХ изложена в приложении П1.

Задание 4. С помощью генератора гармонического напряжения, вольтметра и амперметра измерить основные дифференциальные параметры ПТ (крутизну

S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления напряжения μ) в заданной рабочей точке (РТ).

Используя возможности программы EWB, можно с высокой точностью измерить перечисленные выше основные дифференциальные параметры ПТ (S , R_i , μ) в заданной РТ, не измеряя его проходных и выходных ВАХ. Значение $U_{отс}$ берутся из табл. 10.1 согласно требуемого типа транзистора, определяемого номером варианта.

Таблица 10.5

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{z0}/U_{отс}$	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6
$U_{z0}, В$											
$U_{со}, В$	10	10	10	10	15	15	15	15	20	20	20

4.1. Измерение крутизны S может быть выполнено с помощью схемы, приведённой на рис. 10.15. В этой схеме источник постоянного напряжения $U_{z0}=1,5 В$ создаёт требуемое напряжение смещение на затворе ПТ; источник $U_{со}$ определяет требуемое напряжение на стоке ПТ (10 В); источник гармонического напряжения dU_z небольшой амплитуды (0,1 В – действующее значение) с частотой $f=1 кГц$ создаёт достаточно малые изменения напряжения между затвором и стоком. Вызванные этим источником гармонический ток в цепи стока измеряется

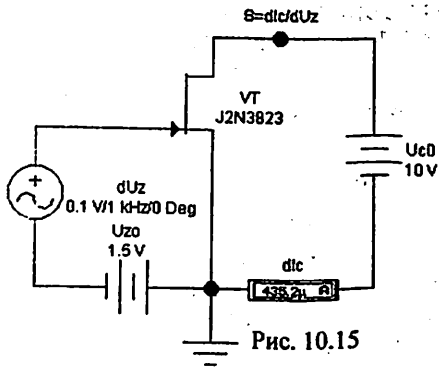


Рис. 10.15

амперметром $dI_c = 435,2 \text{ мкА}$. Крутизна рассчитывается по формуле $S = dI_c/dU_z = 435,2 \cdot 10^{-6} / 0,1 = 4,352 \cdot 10^{-3} \text{ А/В} = 4,352 \text{ мА/В}$.

4.2. Измерение внутреннего сопротивления ПТ R_i может быть выполнено с помощью схемы, приведённой на рис. 10.1.6. В этой схеме источник постоянного напряжения $U_{zo} = 1,5 \text{ В}$ создаёт требуемое напряжение смещения на затворе ПТ; источник U_{co} определяет требуемое напряжение на стоке ПТ (10 В); источник гармонического напряжения $dU_c = 1 \text{ В}$ (действующее значение) с частотой $f = 1 \text{ кГц}$ создаёт изменения напряжения между стоком и истоком. Вызванный этим источником гармонический ток в цепи стока измеряется амперметром $dI_c = 15,05 \text{ мкА}$. Внутреннее сопротивление ПТ рассчитывается по формуле

$$R_i = dU_c/dI_c = 1/15,03 \cdot 10^{-6} = 66,53 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 66,53 \text{ кОм.}$$

Коэффициент усиления напряжения μ можно рассчитать через измеренные значения крутизны S и внутреннего сопротивления R_i по формуле $\mu = SR_i$.

После выполнения всех заданий сделайте выводы по работе и ответьте на следующие контрольные вопросы:

1. Объясните усилительные свойства полевых транзисторов.
2. Какие усилительные электронные приборы управляются напряжением? Управляются током?
3. Назовите параметры, описывающие транзистор как четырехполюсник. Каков их физический смысл?
4. Проведите сравнительный анализ биполярных и полевых транзисторов, а также полевых транзисторов с $p-n$ -переходом и МДП транзисторов.

11. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА БПТ ТРАНЗИСТОРЕ С ОЭ И RC СВЯЗЯМИ

Цель работы - изучить принцип работы усилительного каскада на биполярном транзисторе с RC связями и исследовать влияния элементов принципиальной схемы на его частотные характеристики.

1. Теоретические сведения

1.1. Основные понятия и расчетные соотношения

При решении многих технических задач возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Это осуществляется электронными усилителями. Усилителем электрических сигналов называют устройство, в котором сравнительно маломощный электрический сигнал управляет передачей гораздо большей энергии от источника питания в нагрузку. Структурная схема усилителя приведена на рис.11.1. К входу усилителя (зажимы 1'-1) подключен источник сигнала с действующим значением ЭДС E_r и внутренним сопротивлением R_r . Он

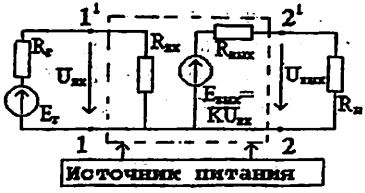


Рис.11.1

создает на выходе усилителя напряжение $U_{вых}$. К выходу усилителя (зажимы 2'-2) подключена нагрузка с сопротивлением R_n .

Усилитель, управляемый входным сигналом, преобразует энергию источника питания и создает в выходной цепи на нагрузке усиленный сигнал $U_{вых}$, что отражено на схеме наличием источника напряжения $K_u U_{вх}$ с выходным

сопротивлением $R_{вых}$ (где $K_u = U_{вых} / U_{вх}$ - коэффициент усиления по напряжению).

1.2. Схема усилителя и назначение ее элементов

Усилитель представляет собой многокаскадное устройство, состоящее из ряда последовательно соединенных простейших каскадов. Схема одного из усилительных каскадов выполненного на биполярном транзисторе (БПТ) с резистивно-емкостными (RC) связями приведена на рис.11.2. Такой усилитель обычно предназначен для предварительного усиления непрерывных или импульсных сигналов по напряжению, а RC связь между усилителем и источником сигнала и нагрузкой является наиболее распространенной.

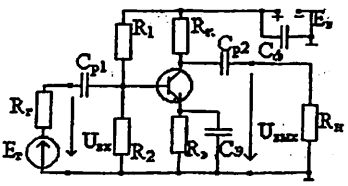


Рис.11.2

Основными элементами каскада являются: источник питания E_k , БПТ типа п-р-п и резистор коллекторной цепи R_k . Эти элементы образуют главную усилительную цепь. В ней за счет протекания управляемого тока базы I_b коллекторного тока $I_k = \beta I_b$ на

коллекторе транзистора создается усиленное переменное напряжение $U_{кз} = E_{к} \cdot I_{к} \cdot R_{к}$. Оно через разделительный конденсатор C_{p2} передается на нагрузочное сопротивление $R_{н}$.

Резисторы R_1, R_2, R_3 играют вспомогательную роль - обеспечивают необходимый режим работы транзистора по постоянному току (режим покоя или рабочую точку транзистора). Кроме того, за счет включения в эмиттерную цепь резистора R_3 , возникает отрицательная обратная связь (ООС) по постоянному и переменному току. Она осуществляет температурную стабилизацию рабочей точки транзистора.

Полярность напряжения источника питания $E_{к}$ положительна. Это обеспечивает для транзистора п-р-п типа смещение коллекторного перехода в обратном, а эмиттерного перехода в прямом направлении, т.е. активный (усилительный) режим работы транзистора.

Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} называются разделительными. Они обеспечивают изоляцию (разделение) источника сигнала и нагрузки от каскада по постоянному току и соединении (связь) их по переменной составляющей между собой.

Для устранения ООС по переменной составляющей, которая возникает из-за эмиттерного резистора R_3 его шунтируют конденсатором C_3 , сопротивление которого $X_{C3} = 1/\omega C$ на низшей частоте усиливаемого сигнала должно быть на порядок меньше R_3 ($R_3 \gg X_{C3}$). Это ослабляет ООС в каскаде по переменному току и устраняет влияние R_3 на коэффициент усиления по переменной составляющей.

Кроме перечисленных элементов принципиальной схемы при усилении импульсных или высокочастотных сигналов необходимо учитывать паразитную емкость $C_0 = C_{кз} + C_{м} + C_{сл.каскада}$, состоящую из 3-х составляющих: $C_{кз}$ - емкость коллектор-эмиттер транзистора; $C_{м}$ - емкость монтажа; $C_{сл.каскада}$ - емкость следующего каскада, или прибора подключаемого к усилителю, например, осциллографа, которая включена параллельно нагрузке.

Идеальный усилитель должен увеличивать входной сигнал в заданное число раз K без изменения формы сигнала. В реальных усилителях этого не происходит. Всегда есть отличия, которые и составляют искажения создаваемые усилителем. Искажения бывают двух видов: линейные и нелинейные.

Анализ и расчет параметров усилительного каскада в режиме усиления малых сигналов целесообразно проводить, представив его эквивалентной схемой

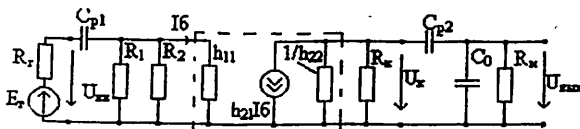


Рис.11.3

(рис.11.3) по переменному току, в которой транзистор изображается схемой замещения в системе h -параметров: h_{11} , $1/h_{22}$ - входное и выходное

сопротивление транзистора, $h_{21} = \beta$ – коэффициент передачи (усиления) тока базы.

Эквивалентная схема получается из принципиальной, если считать, что по переменному сигналу внутреннее сопротивление источника питания E_K и сопротивление эмиттерной цепи равны нулю ($X_{C\phi} = 1/\omega C_\phi \rightarrow 0$, $X_{C_3} = 1/\omega C_3 \rightarrow 0$).

Это всегда выполняется при правильном выборе C_3 и C_ϕ в рабочем диапазоне частот.

1.3. Усилитель с RC-связью в режиме усиления непрерывных сигналов

При усилении непрерывных сигналов характеристики усилителя рассматривают в предположении, что входной сигнал – гармонический. Одной из основных характеристик усилителя, характеризующей его способность усиливать различные гармонические составляющие является комплексный коэффициент усиления $K(j\omega)$. Он представляет собой зависимость от частоты отношения комплексных амплитуд выходного $U_2(j\omega)$ и входного $U_1(j\omega)$ напряжений

$$K(j\omega) = U_{\text{вых}}(j\omega)/U_{\text{вх}}(j\omega) = K(\omega)\exp[j\varphi(\omega)],$$

где $K(\omega) = |K(j\omega)| = U_{m2}/U_{m1}$ – модуль комплексной функции или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента усиления – зависимость отношения амплитуд выходного и входного напряжений от частоты;

$\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика (ФЧХ) – зависимость сдвига фаз между выходным и входным напряжениями от частоты $\varphi(\omega) = \psi_2 - \psi_1$.

На рис.11.4 и 11.5 приведены АЧХ и ФЧХ реального усилителя. Для идеального усилителя АЧХ не зависит от частоты $K(\omega) = K_0 = \text{Const}$. Для реального усилителя АЧХ $K(\omega)$ зависит от частоты. Уменьшение коэффициента усиления в области НЧ и ВЧ представляют собой линейные частотные искажения, создаваемые усилителем. Они оцениваются коэффициентом частотных искажений

$$M_H = K_0 / K(f_H).$$

Весь диапазон частот разбивают на 3 участка: область средних частот, где коэффициент усиления $K = K_0$ практически не зависит от частоты – это область рабочих частот, область низких частот $f < f_H$, где $K \leq K_0 / \sqrt{2}$ и область высоких частот $f > f_B$, где $K \leq K_0 / \sqrt{2}$. Частоты f_H и f_B , являющиеся границами рабочего диапазона, называют граничными частотами в области нижних и области верхних частот.

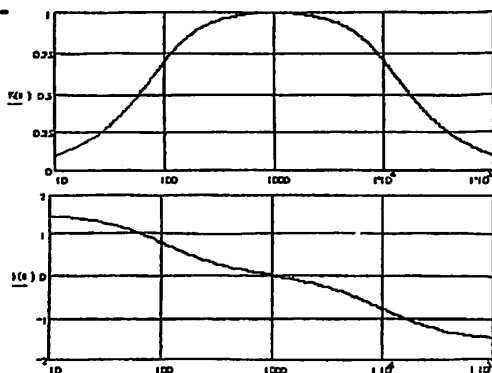


Рис.11.4 – 11.5

1.3.1. Область средних частот

Здесь влиянием C_{p1} , C_{p2} и C_o можно пренебречь, т.к. $X_{co} \gg R_n$, а $X_{cp1} \ll h_{11}$ и $X_{cp2} \ll R_n$, а потому эквивалентная схема (рис. 11.3) для области средних частот упрощается (см. рис. 11,6), коэффициент усиления по напряжению определяется выражением

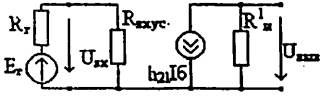


Рис.11.6

где h_{21} коэффициент усиления тока базы для транзистора, включенного по схеме с ОЭ; $R_{вх.усл} = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{11}$ - входное сопротивление усилителя (т.к. обычно R_1 и $R_2 > h_{11}$, то $R_{вх.усл} = h_{11}$);

$R_{н.экв} = (1/h_{22}) \parallel R_n \parallel R_n$ - эквивалентное сопротивление нагрузки транзисторного каскада; R_r - выходное сопротивление источника сигнала.

Коэффициент усиления K_0 действительное число. Величина его зависит от выбора транзистора (h_{11} , h_{21}) и резисторов $R_{н.экв}$, $R_{вх.усл}$, R_r . Знак (-) говорит о том, что происходит инвертирование выходного сигнала (сдвиг по фазе на 180°) относительно сигнала на входе.

1.3.2. Область низких частот

Здесь необходимо учитывать разделительные конденсаторы C_{p1} и C_{p2} , т.к. на низких частотах их сопротивления становятся соизмеримыми с $R_{вх.усл}$ и $R_{н.экв}$, а паразитной емкостью C_o можно пренебречь, т.к. $X_{co} \gg R_n$ (рис.11.7). На низких частотах часть усиливаемого входного сигнала $U_{вх}$ падает на разделительных конденсаторах (C_{p1} и C_{p2}), причем с уменьшением частоты оно возрастает, выходное напряжение уменьшается, а, следовательно, это приводит к уменьшению коэффициента усиления по сравнению с его значением K_0 в

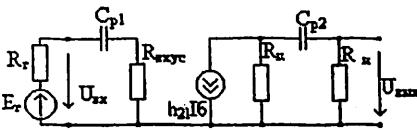


Рис.11.7

диапазоне средних частот. Коэффициент усиления в области низких частот имеет вид

$$K_n(j\omega) = K_0 / [(1 + 1/j\omega\tau_{n1})(1 + 1/j\omega\tau_{n2})] \approx K_0 / (1 + 1/j\omega\tau_n),$$

где $\tau_{n1} = C_{p1} R_{вх.усл}$ - постоянная времени в области НЧ, определяемая C_{p1} ;

$\tau_{n2} = C_{p2} R_n$ - постоянная времени в области НЧ, определяемая C_{p2} ;

$\tau_n = \tau_{n1} \tau_{n2} / (\tau_{n1} + \tau_{n2})$ - эквивалентная постоянная времени каскада в области НЧ, определяемая разделительными конденсаторами C_{p1} и C_{p2} .

Нормированная АЧХ в области НЧ определяется выражением:

$$M_n(\omega) = K_n(\omega) / K_0 = 1 / \sqrt{1 + (1/\omega\tau_n)^2}.$$

Отсюда следует, что нижняя граничная частота определяется из выражения $\omega_n = 1/\tau_n$. Для уменьшения неравномерности АЧХ в области НЧ (расширения полосы пропускания), т.е. уменьшения ω_n , необходимо увеличивать τ_n . Это

достигается путем увеличения значений C_{p1} и C_{p2} , а также увеличением значений $R_{вх.ус}$ и $R_{н.экр}$.

1.3.3. Область верхних частот

Эквивалентная схема для области верхних частот приведена на рис.11.8.

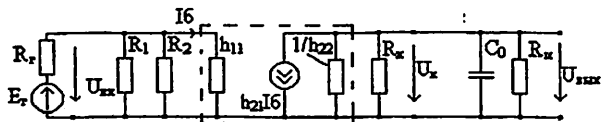


Рис.11.8

Здесь из общей схемы исключены C_{p1} и C_{p2} т.к. $X_{cp1} \ll R_{вх.ус}$, $X_{cp2} \ll R_{н.}$

В этом диапазоне частот необходимо учитывать:

1) инерционные свойства транзистора, т.е. уменьшение коэффициента передачи тока базы транзистора $\beta(j\omega) = \beta_0 / (1 + j\omega\tau_\beta)$ от частоты;

2) паразитную емкость C_0 , которая шунтирует эквивалентное сопротивление нагрузки $R_{н.экр}$, а следовательно уменьшает коэффициент усиления транзисторного каскада. В результате с увеличением частоты амплитуда выходного напряжения и, следовательно, коэффициент усиления уменьшаются. Комплексный коэффициент передачи каскада в области высоких частот (ВЧ) с учетом обоих факторов имеет вид $K_n(j\omega) = K_0 / (1 + j\omega\tau_n)$, где $\tau_n = \tau_\beta + \tau_0$; $\tau_\beta = \beta_0 / (2\pi f_\alpha)$ - постоянная времени транзистора по схеме с ОЭ, f_α - верхняя граничная частота транзистора в схеме с ОБ; $\tau_0 = C_0 R_{н.экр}$ - постоянная времени области высоких частот, определяемая C_0 . Отсюда нормированная АЧХ для области ВЧ имеет вид $M_n = K(\omega) / K_0 = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau_n)^2}$, а верхняя граница частота $\omega_n = 1 / \tau_n$.

Для уменьшения неравномерности АЧХ в области ВЧ (расширения полосы пропускания) необходимо уменьшить τ_n . Однако значительно уменьшить τ_n рациональным выбором элементов схемы невозможно, т.к. τ_n определяется и параметрами транзистора. Поэтому для расширения диапазона усиливаемых частот в области ВЧ необходимо выбирать транзистор с малой τ_n .

1.4. Работа усилительного каскада в режиме большого сигнала

Режим работы усилительного каскада при малом входном сигнале, когда $U_{п.вых} \ll E_k / 2$, где $U_{п.вых}$ - амплитуда выходного сигнала, E_k - напряжение коллекторного питания, можно считать линейным. При этом форма выходного сигнала соответствует форме входного сигнала.

При большом входном сигнале, когда $U_{п.вых} \gg E_k / 2$, т.е. когда эти величины соизмеримы, форма выходного сигнала отличается от входного. Эти отличия обусловлены нелинейностью ВАХ транзистора и называются нелинейными искажениями усилителя. Диапазон изменения выходного сигнала, усиливаемого

без искажений, можно оценить по амплитудной характеристике (АХ). АХ представляет собой зависимость амплитуды (действующего значения) выходного напряжения от входного $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ (рис.11.9).

Для идеального усилителя АХ- прямая (прямая А на рис.11.9). Для реального усилителя она нелинейная. Линейный участок АХ (0-n) позволяет определить входной максимальный сигнал $U_{\text{вх,max}}$, а также и выходной максимальный сигнал $U_{\text{вых,max}}$ при котором нелинейные искажения допустимы. По АХ, в линейной ее части, можно определить коэффициент усиления усилителя (рис.11.9) $K_u = U_{\text{м.вых}} / U_{\text{м.вх}}$.

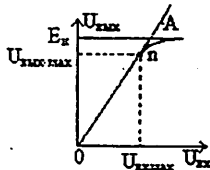


Рис.11.9

2. Задания на предварительную подготовку

2.1. Запомнить схему усилительного каскада (рис.11.1) и изучить назначение её элементов.

2.2. Построить схематично на одном графике АЧХ коэффициентов усиления для случаев а-г и сделать выводы о влиянии:

а) R_n и R_k на значение f_n ; б) R_n и R_k на значение f_v ;

в) C_p на значение f_n и f_v ; г) C_0 на значение f_n и f_v .

2.3. Нарисовать графики, поясняющие появление нелинейных искажений в усилителях.

2.4. Показать, что эмиттерное сопротивление $R_э$, создающее ООС, практически не влияет на коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот.

3. Выполнение работы

3.1. Исследовать формы входного и выходного напряжения каскада предварительного усиления с РС связями на БПТ, включённого по схеме с ОЭ при малом и большом входном напряжении

Собрать, а лучше использовать готовую схему, загрузив схемный файл Lab11-1.ewb. В результате на рабочем поле программы EWB появится схема, приведённая на рис.11.10. На входе усилителя содержится функциональный генератор, являющимся источником периодического напряжения разной формы: синусоидального, треугольного и прямоугольного. Для установки требуемых параметров этого генератора надо дважды щёлкнуть по значку генератора, в результате откроется его передняя панель (см. рис. 11.11). Щёлкнув мышкой на соответствующие клавиши, установить: синусоидальное напряжение частотой $f=5N$, кГц и амплитудой $U_m = 10+N$, мВ (N-номер варианта).

Раскрыв переднюю панель осциллографа и запустив программу на расчёт, после соответствующей настройки осциллографа, можно получить на его экране изображения напряжений на входе и выходе усилителя (входное-красного цвета) (см. рис. 11.12). Аккуратно срисовать с экрана осциллографа $u_{\text{вх}}(t)$ и $u_{\text{вых}}(t)$ на клетчатую бумагу с соблюдением масштаба.

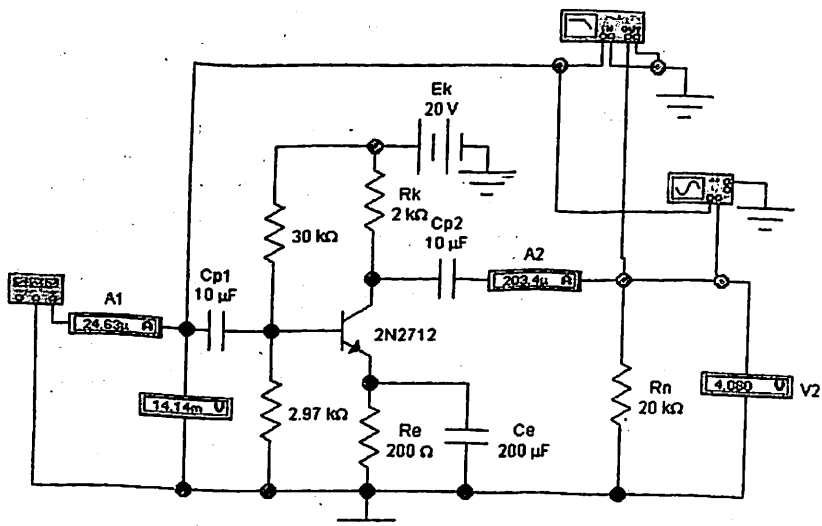


Рис. 11.10

Гораздо более удобно, проще и точнее можно скопировать $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$, если выполнить большее раскрытие передней панели осциллографа, щёлкнув мышкой по клавише **Expand** на панели осциллографа. В результате на рабочем поле EWB появится изображение передней панели осциллографа в виде, представленном на рис.11.13. На этом графике изображения кривых входного и выходного напряжений $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$ значительно больше и расположены они на чёткой

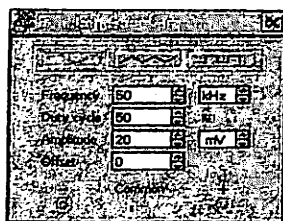


Рис.11.11

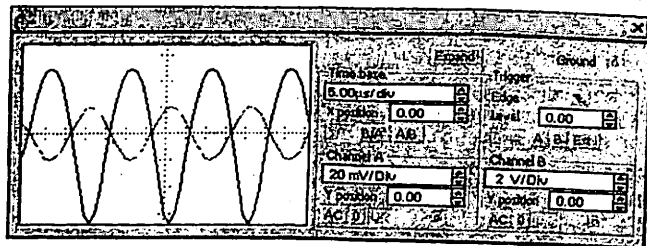


Рис.11.12

координатной сетке, что существенно упрощает проблему их копирования.

Самой характерной особенностью исследуемого усилителя является то, что входное и выходное напряжения находятся в противофазе и амплитуда выходного напряжения много больше входного. Надо также отметить, что даже при небольшом входном напряжении ($U_m=20$ мВ) форма и амплитуда положительного и отрицательного полупериодов отличаются друг от друга, т.е. имеют место

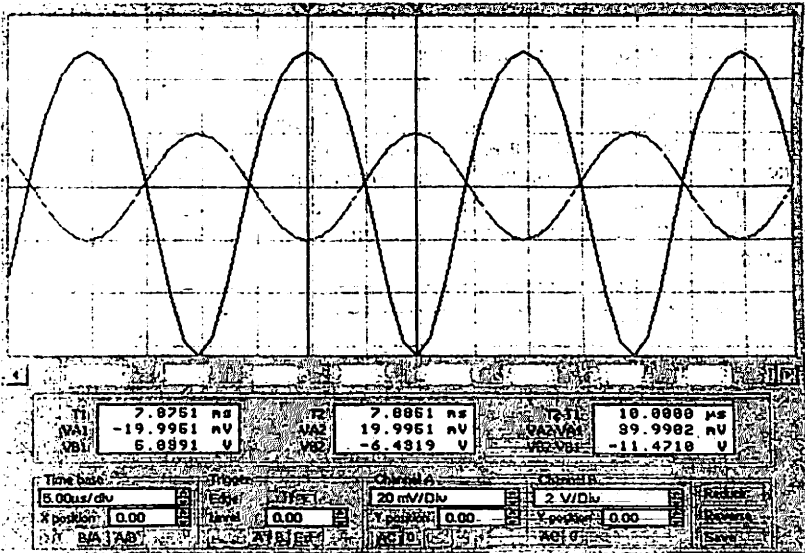


Рис.11.13

нелинейные искажения выходного сигнала. Измеряя амплитуды входного и выходного сигнала с помощью вертикального визира (см. рис.11.13), можно измерить коэффициент усиления по напряжению: $U_{\text{пвых}} = (5,0391 + 6,4319) / 2 = 5,7355 \text{ В}$, $U_{\text{пвх}} = 20 \text{ мВ}$ откуда $|K_0| = U_{\text{пвых}} / U_{\text{пвх}} = 5,7355 / 20 \cdot 10^{-3} = 286,775$.

3.2. Измерить коэффициенты усиления по напряжению, току, мощности и входного сопротивления усилителя с помощью вольтметров и амперметров.

После включения схемы на расчёт и установления процесса, записать значения входных и выходных напряжений и токов. В рассматриваемом случае из рис.11.10 имеем: $U_{\text{вх}} = 14,14 \text{ мВ}$; $I_{\text{вх}} = 24,63 \text{ мкА}$; $U_{\text{вых}} = 4,080 \text{ В}$; $I_{\text{вых}} = 203,4 \text{ мкА}$.

Коэффициент усиления по напряжению: $K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = 4,080 / 14,14 \cdot 10^{-3} = 288,54$.

Коэффициент усиления по току: $K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = 203,4 / 24,63 = 8,258$.

Коэффициент усиления по мощности: $K_p = K_u \cdot K_I = 288,54 \cdot 8,258 = 2382,76$.

Входное сопротивление усилителя: $Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}} = 14,14 \cdot 10^{-3} / 24,63 \cdot 10^{-6} = 574 \text{ Ом}$.

3.2. Снять осциллограммы выходного сигнала усилителя при $U_{mвх}=100$ мВ,

С выхода генератора гармонических колебаний на вход "Вход усилителя" подать сигнал величиной $U_{mвх}=100$ мВ с частотой 50 кГц. Величину сигнала контролировать вольтметром или осциллографом. Вход осциллографа подключить к выходу усилителя и добиться на экране осциллографа устойчивого изображения сигнала с помощью синхронизации. В результате на экране осциллографа можно получить изображения (рис.11.14) входного синусоидального и выходного напряжения, сильно отличающегося от синусоиды напряжения.

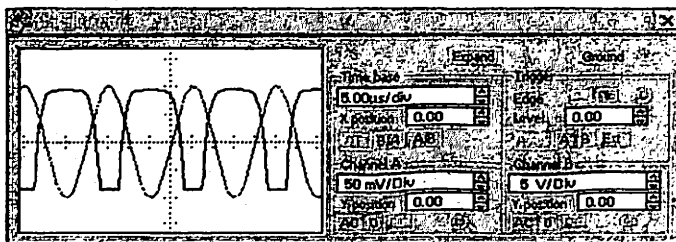


Рис. 11.14

Зарисовать в отчет входной и выходной сигналы и рассчитать коэффициент усиления $K_0 = U_{вых} / U_{вх}$. В нашем случае $=70,8$ мВ; $U_{вых}=7,398$ В, поэтому $K_0 = 7,398/70,8 \cdot 10^{-3} = 104,5$, т.е. видно, что при входном сигнале $U_{вх} = 70,8$ мВ коэффициент усиления значительно уменьшился по сравнению с первым случаем, когда $U_{вх} = 14,14$ мВ, $K_0 = 288,54$.

3.4. Снять амплитудную характеристику усилителя

Измерения проводить в диапазоне изменения амплитуды входного сигнала 0-100 мВ с шагом 20 мВ. Величину входного и выходного напряжений измерять вольтметром. Результаты измерений записать в табл.11.1

Таблица 11.1

$U_{m.вх},$ мВ	1	10	20	40	60	80	100
$U_{m.вых},$ В							

По результатам измерений построить график АХ. Указать линейные участки АХ. Рассчитать коэффициенты усиления K_0 .

3.5. Снять АЧХ усилительного каскада

Схема измерений АЧХ аналогична схеме измерений АХ.

Изменяя частоту гармонического сигнала на входе усилителя в диапазоне 10 Гц – 100 МГц и, поддерживая его амплитуду равной 10 мВ, измерять амплитуду выходного напряжения. Результаты измерений заносить в табл. 2 и рассчитать

коэффициент усиления $K=U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, при $U_{\text{вх}}=10$ мВ.

Таблица 11.2

f, Гц	10	20	50	100	500	10 ³	2.10 ³	10 ⁴	5.10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸
Lg(f)	1	1.3	1.7	2	2.7	3	3.3	4	4.7	5	6	7	8
U _{2m} , В													
K													
φ, град													

Построить зависимости K(f). Определить графически граничные частоты (f_н, f_в).

3.6. Измерить АЧХ и ФЧХ усилителя с помощью измерителя Bode Plotter

Собрать схему рис.11.10. Установить в режим измерения АЧХ, масштаб по оси Y – линейный, X - логарифмический, диапазон частотного анализа 10 Гц-100 ГГц. Открыть переднюю панель Bode Plotter. Запустить схему на расчёт. В результате на дисплее Bode Plotter появится изображение АЧХ усилителя (рис. 11.15)

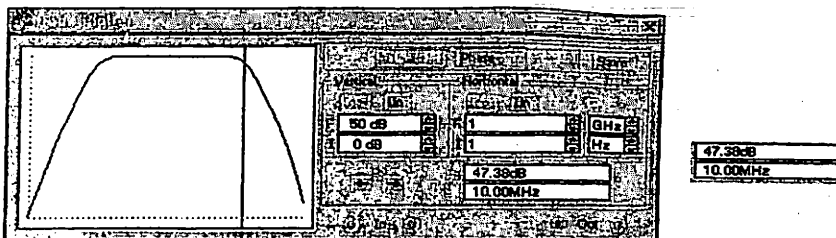


Рис. 11.15

Зацепив курсором мыши вертикальную визирную линию у левого края окна Bode Plotter и установив его на требуемую частоту f (значение которой отражается в нижнем окошке) можно измерить АЧХ (значение которой K(f) отражается в расположенном над окном частоты). В нашем случае на частоте f=10 МГц усиление усилителя составляет K(f)=47,38 дБ. С помощью визирной линии произвести измерения коэффициентов передачи на частотах, указанных в табл.11.2..

Измерение ФЧХ. Установить измеритель диаграмм Bode Plotter в режим измерения ФЧХ, масштабы и диапазон анализа прежние.

С помощью визирной линии произвести измерения фазовых сдвигов на частотах, указанных в табл. 11.2. Результаты измерений занести в табл. 11.2.

По результатам измерения построить графики АЧХ $K(f)$ и ФЧХ $\varphi_K(f)$.
Используя измеритель частотных характеристик, можно сразу получить АЧХ и

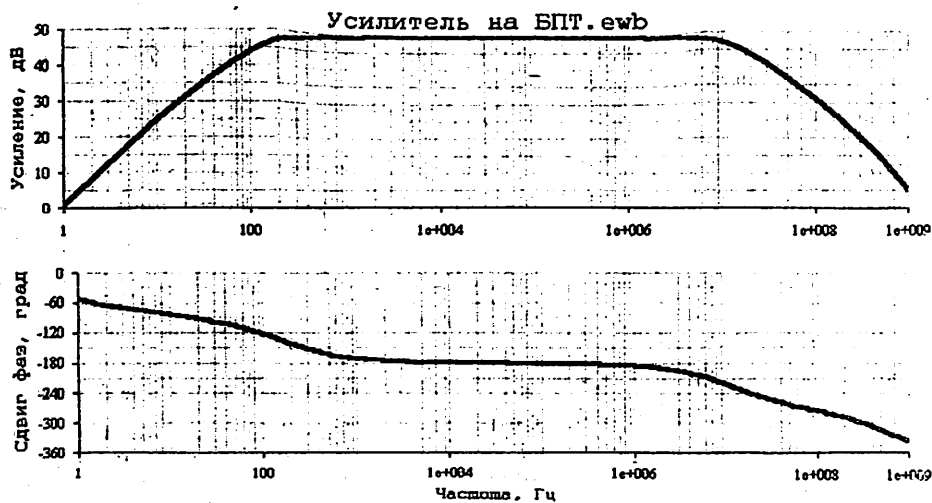


Рис. 11.16

ФЧХ усилителя (см. рис.11.16)

4. Вопросы для самопроверки

- 4.1. Что такое усилитель? Какова его структурная схема?
- 4.2. Нарисовать принципиальную схему усилителя и объяснить назначение элементов.
- 4.3. Какие показатели характеризуют работу усилителя?
- 4.4. Нарисовать эквивалентную схему и объяснить, как она составлена.
- 4.5. Какие элементы схемы влияют на коэффициент передачи в области средних частот?
- 4.6. Какие элементы создают искажения в области низких частот? Как их уменьшить?
- 4.7. Какие элементы создают искажения в области высоких частот? Как их уменьшить?
- 4.8. Как влияют цепь RC на АЧХ усилителя?
- 4.9. Амплитудная характеристика. Ее параметры. Нелинейные искажения.
- 4.10. Объяснить методику измерения АЧХ с помощью осциллографа (вольтметра).
- 4.11. Объяснить методику измерения АЧХ с помощью измерителя диаграмм Бодэ.
- 4.12. Объяснить методику измерения АХ.

12. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ С ЦЕПЬЮ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

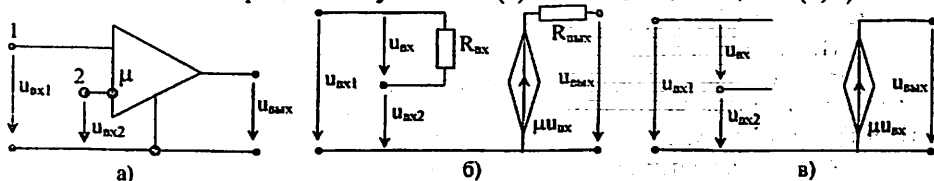
Цель работы - исследовать работу неинвертирующего и инвертирующего усилителей, построенных на базе операционного усилителя (ОУ) с внешней глубокой отрицательной обратной связью (ООС); инвертирующего сумматора на ОУ; использование ОУ в качестве компаратора.

1. Теоретические сведения

1.1. Общие свойства ОУ

Наиболее распространенной усилительной интегральной микросхемой (ИМС) является операционный усилитель (ОУ), в котором сосредоточены основные достоинства аналоговых усилительных схем. ОУ принято называть дифференциальный усилитель постоянного тока (УПТ) с двумя входами и одним выходом, с большим коэффициентом усиления по напряжению μ , а также большим входным и малым выходным сопротивлениями. Обычно ОУ используется с внешней глубокой ООС, определяющей его результирующие характеристики. На рис. 12.1,а показано условное графическое обозначение ОУ.

Рис. 12.1. Операционный усилитель (а) и его схемы замещения (б, в).



При подаче сигнала напряжения $u_{вх1}$ на вход 1 на выходе получается напряжение

$$u_{вых} = \mu u_{вх1}$$

При подаче сигнала напряжения $u_{вх2}$ на инвертирующий вход 2 на выходе ОУ получается напряжение

$$u_{вых} = -\mu u_{вх2}$$

При подаче на оба входа напряжений $u_{вх1}$ и $u_{вх2}$ на выходе ОУ образуется напряжение $u_{вых} = \mu(u_{вх1} - u_{вх2}) = \mu u_{вх}$, где $u_{вх} = u_{вх1} - u_{вх2}$.

Свойства реального ОУ приближаются к свойствам идеального ОУ, имеющего

$$\mu = u_{вых}/u_{вх} \rightarrow \infty, R_{вх} \rightarrow \infty, R_{вых} \rightarrow 0.$$

Так ОУ типа КР140УД8 имеет следующие параметры:

$\mu = 5 \cdot 10^4$ - коэффициент усиления напряжения на низкой частоте (НЧ);

$f_1 = 1$ МГц - частота, при которой $\mu = 1$; $R_{вх} \geq 103$ МОм - входное сопротивление.

Обобщенная линейная схема замещения ОУ по переменной составляющей представлена на рис. 12.1,б. Во многих случаях можно использовать идеализированную схему замещения ОУ (рис. 12.1,в), на которой не учитываются входное и выходное сопротивления.

1.2. Неинвертирующая схема усилителя

с конечным коэффициентом усиления напряжения, построенная на базе ОУ, показана на рис. 12.2,а.

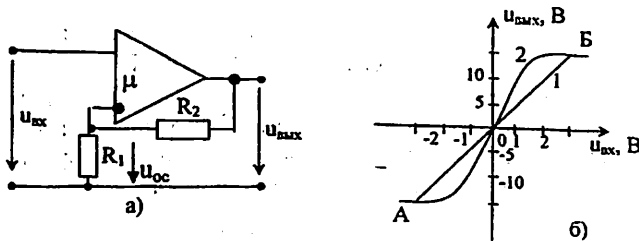


Рис. 12.2. Неинвертирующий усилитель на ОУ (а) и его передаточная характеристика (б).

Полагая, что $R_{\mu} \gg R_{\text{вых}}$, $R_{\text{вх}} \gg R_1, R_2 \gg R_{\text{вых}}$ (эти условия легко выполняются в реальном ОУ), получим напряжение на инвертирующем входе

$$u_{\text{ос}} = R_1 u_{\text{вых}} / (R_1 + R_2) = \beta u_{\text{вых}} \quad (12.1)$$

где $\beta = u_{\text{ос}} / u_{\text{ос}} = R_1 / (R_1 + R_2)$ – коэффициент передачи напряжения цепи ОС. Выходное напряжение определяется выражением

$$u_{\text{вых}} = \mu (u_{\text{вх}} - u_{\text{ос}}) = \mu (u_{\text{вх}} - \beta u_{\text{вых}}). \quad (12.2)$$

Результирующий коэффициент усиления напряжения с учётом ОС

$$K = u_{\text{вых}} / u_{\text{вх}} = \mu / (1 + \beta \mu), \quad (12.3)$$

т.е. меньше, чем без ОС.

При $\mu \rightarrow \infty$ получим $K = 1/\beta = 1 + R_2/R_1$. (12.4)

При введении глубокой ООС выходное сопротивление усилителя становится много меньше выходного сопротивления самого ОУ ($R_{\text{вых ос}} \ll R_{\text{вых}}$) и определяется по формуле

$$R_{\text{вых ос}} = R_{\text{вх}} (1 + \beta \mu). \quad (12.5)$$

Входное сопротивление усилителя, охваченного глубокой ООС, становится много больше входного сопротивления самого усилителя ($R_{\text{вх ос}} \gg R_{\text{вх}}$) и определяется по формуле

$$R_{\text{вх ос}} = R_{\text{вх}} / (1 + \beta \mu). \quad (12.6)$$

Выходное напряжение ОУ сверху и снизу ограничено пределами

$$U_{\text{вых, max}} = \pm (0,9 \div 0,95) U_{\text{п}}$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания ИМС.

В схеме рис.12.2,а режим линейного усиления выполняется при входных напряжениях $u_{\text{вх}} \leq U_{\text{вых, max}}/K$. Поскольку $K \ll \mu$, то ОУ с ООС имеет достаточно большую область линейного усиления. Наклон передаточной характеристики (ПК) на линейном участке АОБ (см. рис. 12.2,б) определяется коэффициентом усиления K : линия 1 проведена для $K \approx 5$; линия 2 – для $K \approx 10$. Таким образом, введение ООС позволяет существенно расширить линейную область ПХ и уменьшить нелинейные искажения сигнала.

1.3. Инвертирующая схема усилителя

В усилительных устройствах, а также в активных RC-фильтрах широкое применение находит инвертирующий усилитель с конечным коэффициентом усиления, построенный на базе ОУ с ООС (рис. 12.3,а).

Если учесть, что на линейном участке ПХ ОУ напряжение между его входами очень мало и, если принять $u = 0$, то

$$u_{\text{вх}} = R_1 i_{\text{вх}} = R_1 i; \quad (12.7)$$

Следовательно

$$u_{\text{вых}} = R_2 i_{\text{ос}} = -R_2 i, \quad (12.8)$$

$$K = u_{\text{вых}} / u_{\text{вх}} = -R_2 / R_1. \quad (12.9)$$

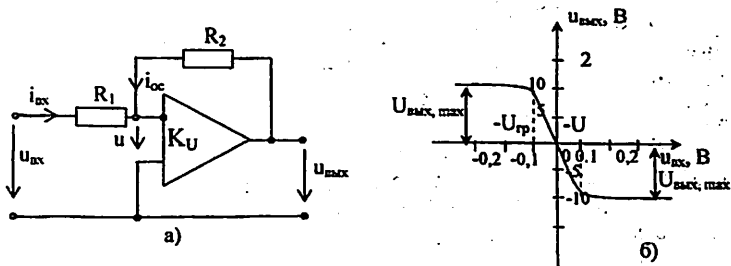


Рис. 12.3. Инвертирующий усилитель (а) и его ПХ (б).

Знак минус указывает на то, что полярность входного и выходного напряжений противоположны по фазе, т.е. сдвинуты между собой на 180° . Коэффициент усиления $|K| \ll \mu$, но при этом K зависит только от отношения сопротивлений R_2/R_1 , поэтому его стабильность очень высока.

Входное сопротивление рассматриваемой схемы инвертированного усилителя с ООС (рис.12.3,а) $R_{вх\text{ ос}}=R_1$ существенно меньше входного сопротивления неинвертирующего усилителя (рис.12.2,а).

Введение ООС в инвертирующий ОУ существенно снижает его выходное сопротивление $R_{вых\text{ ос}}=R_{вых}/(1+\beta\mu)$. (12.10)

При $\mu \rightarrow \infty$ и $R_{вых\text{ ос}} \rightarrow 0$ Передаточная характеристика (ПХ) инвертирующего усилителя (рис.3.9,б) отличается от ПХ неинвертирующего усилителя (рис.12.2,б) тем, что расположена во 2-ом и 4-м квадрантах.

На ОУ создаются схемы, предназначенные для выполнения различных математических операций над входными электрическими сигналами (сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование и т.д.). Такие устройства находят широкое применение в системах автоматического управления (САУ). Они также составляют основу аналоговых ЭВМ.

1.4. Схема инвертирующего сумматора трёх напряжений приведена на рис.12.4,а.

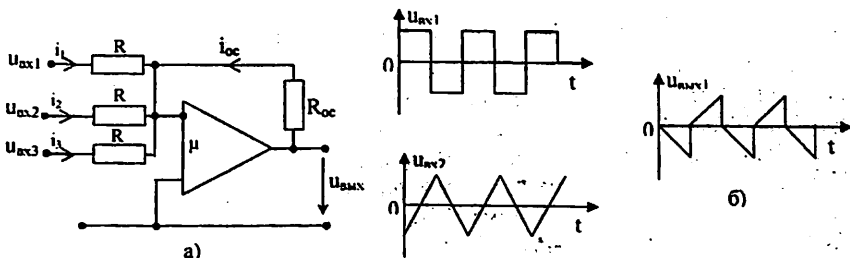


Рис. 12.4. Инвертирующий сумматор на ОУ на три входа (а) и напряжения на входе и выходе сумматора (б).

Она собрана на базе ОУ с инвертирующим входом и цепью ООС.

Так как $R_{вх}$ ОУ велико, то $i_1+i_2+i_3=-i_{ос}=i$.

$$(12.11)$$

Как и в схеме, рис. 12.3,а $i_{oc} = u_{вых}/R_{oc}$.
 Входные токи $i_1 = u_{вх1}/R$; $i_2 = u_{вх2}/R$; $i_3 = u_{вх3}/R$,
 тогда с учётом (12.11), следует $(u_{вх1} + u_{вх2} + u_{вх3})/R = -u_{вых}/R_{oc}$, (12.12)

следовательно $u_{вых} = \frac{-(u_{вх1} + u_{вх2} + u_{вх3})R_{oc}}{R}$. (12.13)

При $R=R_{oc}$ $u_{вых} = -(u_{вх1} + u_{вх2} + u_{вх3})$. (12.14)

Знак минус показывает, что наряду с суммированием в схеме (рис.12.4,а) происходит *инвертирование полярности сигналов*. На рис.12.4,б приведены временные диаграммы, иллюстрирующие работу инвертирующего сумматора.

1.5. Схема сравнения напряжений (компаратор)

ОУ в нелинейном режиме работы без внешних ОС может быть использован в качестве компаратора, который является одним из основных элементов импульсных схем.

Поскольку в реальном ОУ на ИМС μ очень велик, то входное напряжение срабатывания (переключения) компаратора $u_{ср} = U_{вых, max}/\mu$ весьма мало и составляет не более нескольких милливольт. В идеальной ОУ $\mu \rightarrow \infty$ и $u_{ср} \approx 0$. Таким образом, можно считать, что при $u_{вх1} - u_{вх2} > 0$, т.е. при $u_{вх1} > u_{вх2}$ имеет место $u_{вых} = U_{вых, max}$, а при $u_{вх1} - u_{вх2} < 0$, т.е. при $u_{вх1} < u_{вх2}$ имеет место $u_{вых} = -U_{вых, max}$ (рис. 12.5). Значит выходное напряжение ОУ при $|u_{вх1} - u_{вх2}| > u_{ср}$ и зависит от того, какое из входных напряжений больше и следовательно ОУ является схемой сравнения двух напряжений (компаратором).

На рис.12.5,а напряжение на входе компаратора $u_{вх1}$ - синусоидальное, $u_{вх2}$ - постоянное. Компаратор переключается в моменты равенства $u_{вх1} \approx u_{вх2}$ и

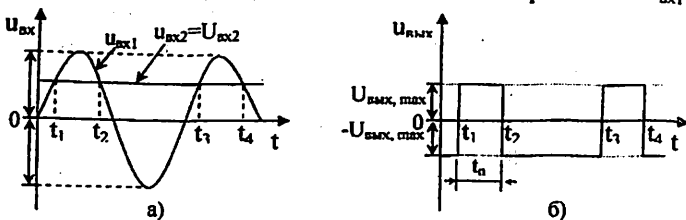


Рис. 12.5. Напряжения на входе и выходе компаратора на ОУ.

выходное напряжение имеет форму прямоугольных импульсов (см. рис. 12.5,б). Ширина этих импульсов при заданной амплитуде синусоиды U_m зависит от величины $u_{вх2}$. Таким образом, простейший компаратор на ОУ может служить преобразователем синусоидального напряжения в прямоугольные импульсы.

Промышленность выпускает компараторы в виде специальных ИМС. Они отличаются от схем ОУ в нелинейном режиме тем, что у них меньше время переключения и выходное напряжение у них стабилизировано.

1.6. Частотные свойства ОУ с внешней ОС

Работа реальных ОУ на ИМС при широком диапазоне частот осложняется тем, что его коэффициент усиления существенно уменьшается с увеличением частоты сигнала. На рис.12.6,а даётся схема измерения, а на рис.12.6,б график

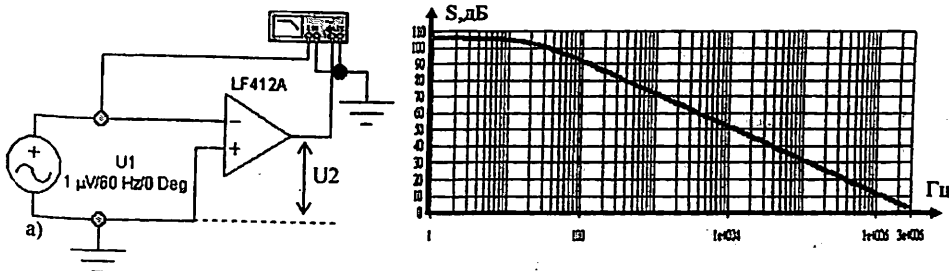


Рис.12.6. Схема измерения (а) и АЧХ ОУ LF412A без ООС (б)

АЧХ логарифмического коэффициента усиления ($S=20Lg(U_2/U_1)$, дБ) типового усиления ОУ типа LF412A без ООС. Уменьшение усиления с повышением частоты объясняется инерционностью процессов прохождения зарядов в активных компонентах усилителя (в биполярных и полевых транзисторах) и наличию в схеме ОУ неконтролируемых ёмкостных связей. Особое место в семействе ОУ занимают быстродействующие импульсные ОУ. В таких ОУ время установления импульса составляет сотые доли мкс, а полоса пропускания может простирается от постоянного напряжения до нескольких сотен МГц – единиц ГГц при коэффициенте усиления до 10^4 .

2. Предварительный расчёт

2.1. Для схемы неинвертирующего усилителя (см. рис.12.2,а) при $R_1=1$ кОм определить коэффициент усиления K при трёх значениях $R_1=(1; 2; 3)$ кОм по формуле (12.4). Результаты расчётов занести в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Результаты расчёта и измерений

		R_2 кОм		
		1	2	3
Схема рис. 12.2,а	Расчёт			
	Измерения			
	Относительная погрешность	$\delta, \%$		
Схема рис. 12.3,а	Расчёт			
	Измерения			
	Относительная погрешность	$\delta, \%$		

2.2. Для схемы инвертирующего усилителя (см. рис. 12.3,а) при $R_1=1$ кОм и двух значениях $R_2=(1; 2; 3)$ кОм определить коэффициент усиления K по формуле (12.9). Результаты расчёта занести в табл. 12.1.

3. Выполнение работы

3.1. Исследование неинвертирующего усилителя. Загружается файл схемы ОУ с инверсией Lb12-1, в результате чего на рабочем поле EWB появится схема усилителя (рис.12.7,а).

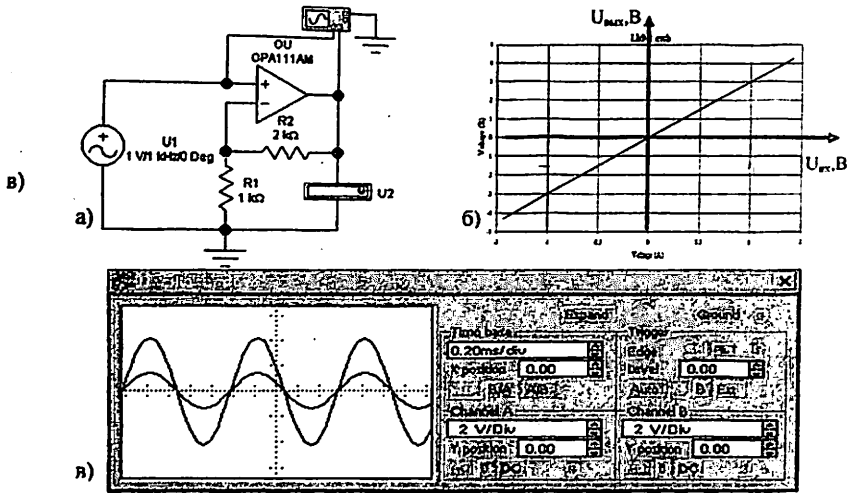


Рис. 12.7. Схема исследования неинверсного усилителя с конечным усилением (а) на ОУ, его передаточная характеристика (б), передняя панель двухканального осциллографа, на экране которого видны осциллограммы входного и выходного напряжений (в).

Зарисовать схему усилителя (рис.12.7,а), передаточные характеристики и диаграммы мгновенных значений напряжений на входе и выходе усилителя при трёх значениях сопротивлений $R_2=1,2,3$ кОм. Измерить коэффициенты усиления по напряжению усилителя $K=U_2/U_1$ при трёх значениях сопротивлений R_2 , указанных выше. Измеренные значения K записать в табл.12.1.

3.2. Исследование инвертирующего усилителя

Загружается файл схемы ОУ с инверсией Lb12-2, в результате чего на экране монитора ПК появится схема усилителя (рис.12.8,а).

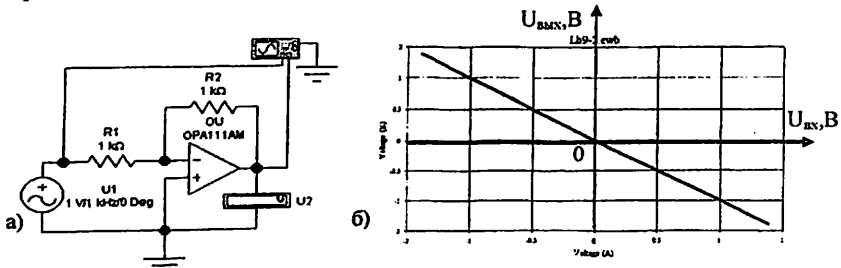


Рис. 12.8. Схема исследования инвертирующего усилителя с конечным усилением (а) на ОУ, его передаточная характеристика (б)

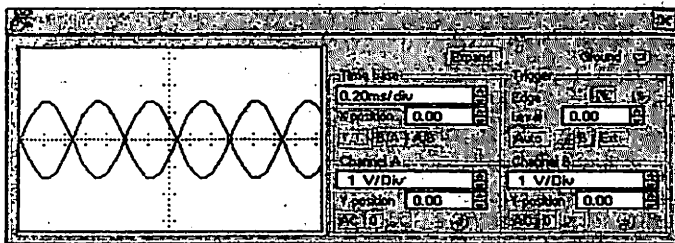


Рис. 12.9. Передняя панель осциллографа, на экране которого видны осциллограммы входного и выходного напряжений (в) инвертирующего усилителя.

Зарисовать схему усилителя (рис.12.8,а), передаточные характеристики и диаграммы мгновенных значений напряжений на входе и выходе усилителя (рис.12.9) при трёх значениях сопротивлений $R_2=1;2;3$ кОм. Измерить коэффициенты усиления по напряжению усилителя $K=U_2/U_1$ при трёх значениях сопротивлений R_2 , указанных выше. Измеренные значения K записать в табл.12.1.

3.3. Исследование инвертирующего сумматора на ОУ

Загружается файл схемы инвертирующего сумматора на ОУ Lb12-3, в результате чего на рабочем поле EWB появится схема усилителя (рис.12.10,а).

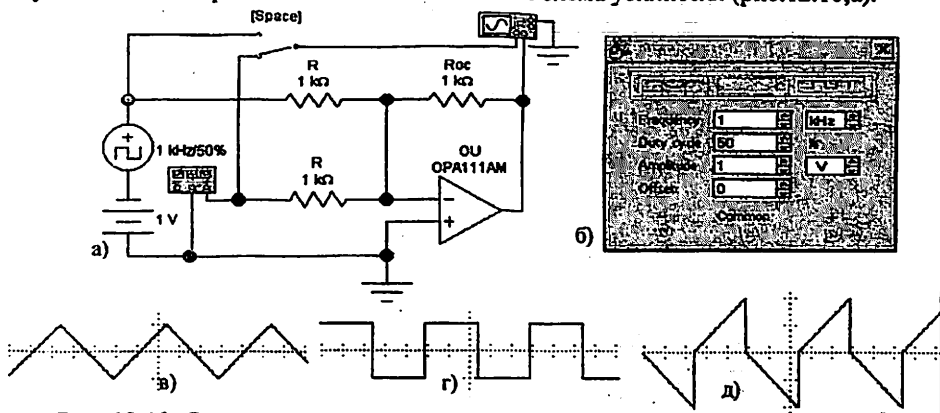


Рис. 12.10. Схема инвертирующего сумматора на ОУ (а), передняя панель функционального генератора (б), напряжение на первом входе сумматора (в), напряжение на втором входе сумматора (г), напряжение на выходе сумматора (д).

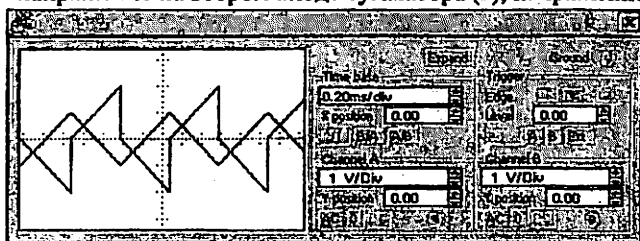


Рис. 12.11. Передняя панель осциллографа, на экране которого видны осциллограммы одного из

входных напряжений (треугольное) и выходное напряжения (е).

Зарисовать схему инвертирующего сумматора на ОУ (рис.12.8,а), временные диаграммы мгновенных значений напряжений на входе и выходе сумматора.

3.4. Исследование компаратора на ОУ

Загружается файл Lb12-4, в результате чего на экране монитора ПК появится схема компаратора на ОУ (рис.12.9,а).

Зарисовать схемы компараторов на ОУ (рис.12.12,а, в), временные диаграммы мгновенных значений напряжений на входе и выходе компаратора.

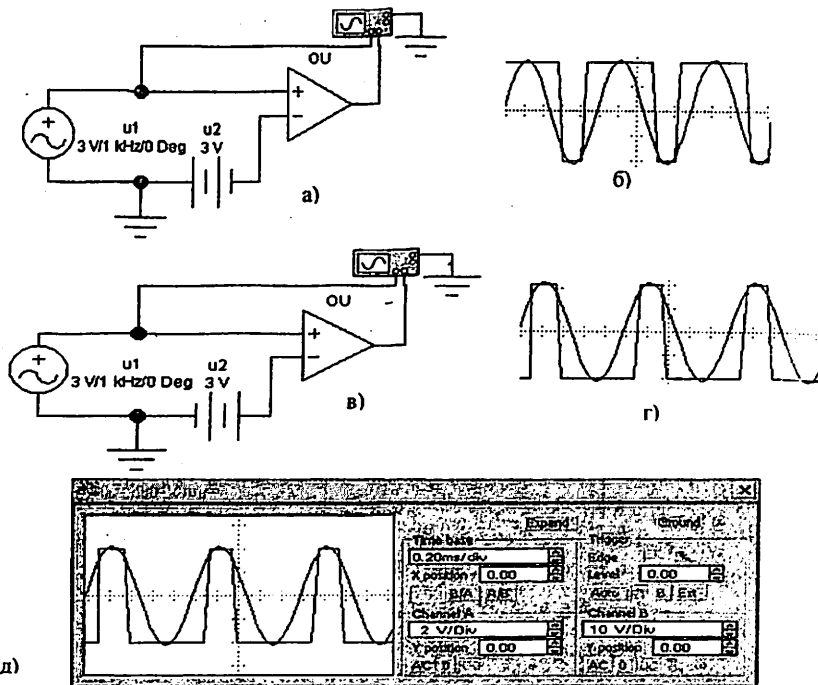


Рис. 12.12. Схемы компараторов на ОУ (а, в), напряжение на входе и выходе компаратора «а» (б), напряжение на входе и выходе компаратора «в» (г), передняя панель осциллографа, на экране которого видны осциллограммы напряжения на входе (синусоидальное) и выходе (прямоугольные импульсы) (д).

3.5. Исследование зависимости АЧХ усилителя с конечным усилением на реальном ОУ от глубины ООС.

Загружается файл Lb12-5, в результате чего на рабочем поле EWB появится схема на ОУ (рис.12.13). По заданию преподавателя установить на схеме требуемый тип ОУ, и измерить полосу пропускания ОУ по уровню 3 дБ

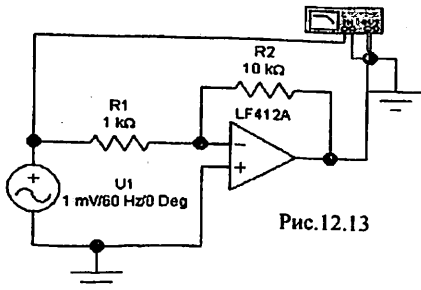


Рис.12.13

при двух-трёх значениях сопротивления ОС $R_2 = 10; 100; 1000$ кОм..

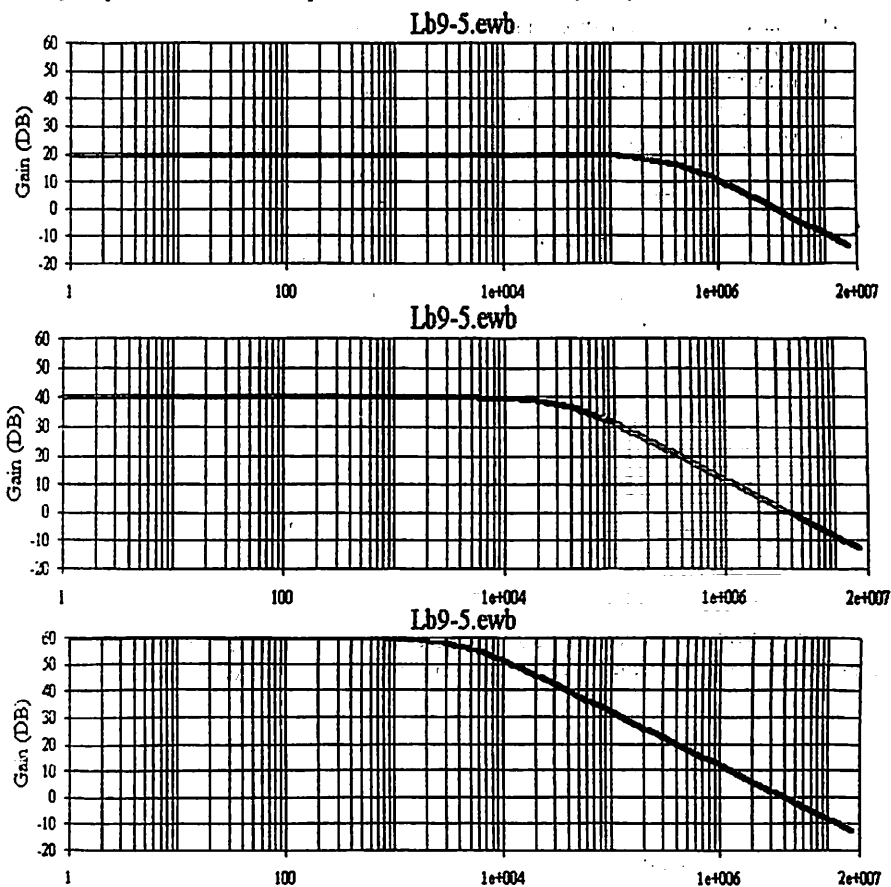


Рис.12.13. Логарифмические АЧХ ($S=20 \lg(U_2/U_1)$, дБ) ОУ (а) при: $R_2 = 10$ кОм (б), $R_2 = 100$ кОм (в), $R_2 = 1000$ кОм (г).

4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Электрические схемы и параметры их элементов.
- 4.3. Предварительный расчёт и его результаты (см. табл. 12.1).
- 4.4. Осциллограммы на входе и выходе усилителей (см. рис. 12.2,а, рис. 12.3,б) и компаратора.
- 4.5. Выводы из результатов расчёта и эксперимента.
- 4.6. Осциллограммы на входе и выходе инвертирующего сумматора

5. Контрольные вопросы и задачи

5.1. Укажите, сколько входов и выходов имеет ОУ.

Ответы:

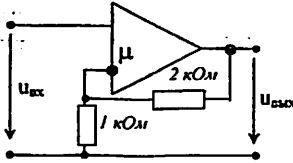
А. входов – 1, выходов – 2.

В. входов – 2, выходов – 2.

Б. входов – 2, выходов – 1.

Г. входов – 1, выходов – 1.

5.2. Укажите, какой коэффициент усиления по напряжению имеет схема



Ответы:

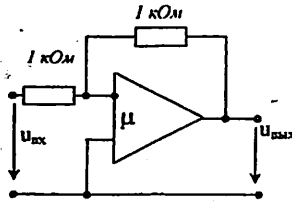
А. $K=1$

Б. $K=-2$

В. $K=2$

Г. $K=-1$

5.3. Укажите, какой коэффициент усиления по напряжению K имеет схема



Ответы:

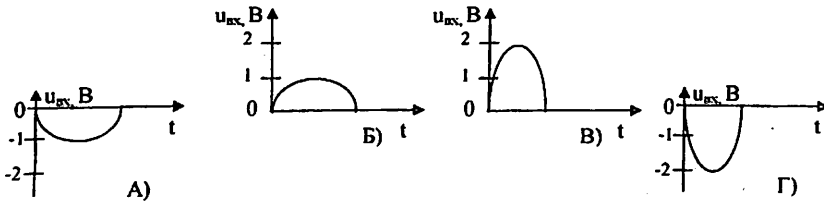
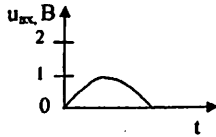
А. $K=1$

Б. $K=-2$

В. $K=2$

Г. $K=-1$

5.4. Укажите, какой сигнал напряжения появится на выходе усилителя $u_{\text{вых}}$, схема которого дана в п.5.2, если на его входе появится сигнал



5.5. Укажите, какой сигнал напряжения появится на выходе усилителя $u_{\text{вых}}$ (см. п.5.3), если на его входе появится сигнал $u_{\text{вх}}$ (см. п.5.4).

13. ИССЛЕДОВАНИЕ RC- АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Цель работы - теоретические и экспериментальные исследования трёх схем RC-автогенераторов на операционном усилителе (ОУ); экспериментальное определение условий самовозбуждения и зависимость частоты генерации от параметров их элементов.

1. Теоретические сведения

1.1. Структурная схема автогенератора и условия возникновения автоколебаний

Автогенераторами называются активные электрические цепи, в которых без постоянных воздействий самостоятельно возникают электрические колебания. В качестве активных элементов в автогенераторах применяют электронные лампы, транзисторы, операционные усилители.

Обобщённая структурная схема автогенератора (для переменного) тока (рис.13.1,а) содержит усилитель с комплексным коэффициентом передачи $K(j\omega) = U_2/U_1 = K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}$ и цепь обратной связи (ОС) с комплексным коэффициентом передачи $\beta(j\omega) = U_3/U_2 = \beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)}$.

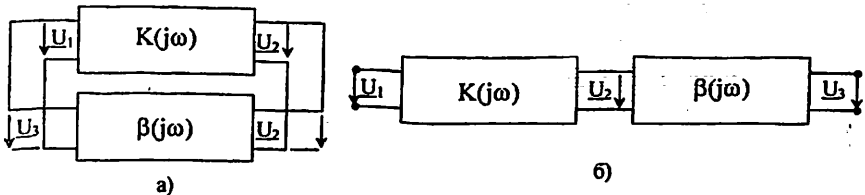


Рис. 13.1. Обобщённая структурная схема автогенератора (а), каскадное соединение усилителя и цепи ОС (б).

Если учесть, что для возникновения гармонических автоколебаний требуется, чтобы в разомкнутой схеме (рис. 13.1,б) напряжение на выходе равнялось напряжению на входе, т.е. $U_3 = U_1$, то комплексный коэффициент передачи разомкнутой системы

$$H(j\omega) = U_3/U_1 = 1, \quad (13.1)$$

или

$$H(j\omega) = K(j\omega)\beta(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}\beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)} = K(\omega)\beta(\omega)e^{j(\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega))} = 1, \quad (13.2)$$

откуда получаем два условия возникновения автоколебаний

$$K(\omega)\beta(\omega) = 1; \quad (13.3)$$

$$\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega) = 0; 2\pi; \dots; k2\pi. \quad (13.4)$$

Первое условие (13.3) называется условием баланса амплитуд, оно означает, что в стационарном режиме величина коэффициента передачи разомкнутой системы равна единице, что означает, что при обходе этой цепи через усилитель и цепь ОС получаются колебания той же амплитуды. Второе условие (13.4) называется условием баланса фаз, что означает, что при обходе этой цепи через усилитель и цепь ОС получаются колебания напряжения в той же фазе.

1.2. Автогенератор на инвертирующем ОУ с RC-ФНЧ в цепи ООС

На рис. 13.2 показан один из способов построения RC-генератора с ис-

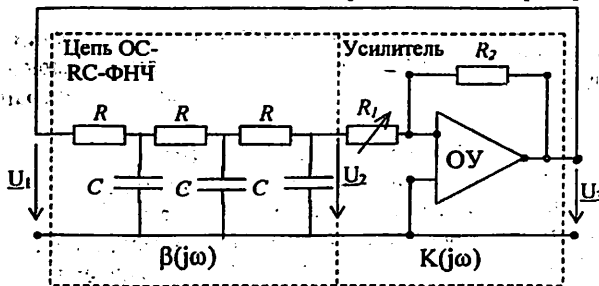


Рис. 13.2. Схема RC-автогенератора на инвертирующем ОУ с цепью ОС, представляющей собой RC – ФНЧ

пользованием ОУ. Генератор состоит из инвертирующего ОУ с комплексным коэффициентом передачи

$$K(j\omega) = \frac{U_3}{U_2} = - (R_2/R_1) = R_2/R_1 \cdot e^{\pm 180^\circ} = K(\omega) e^{j\varphi_K(\omega)}, \quad (13.5)$$

где $K(\omega) = R_2/R_1$; $\varphi_K(\omega) = \pm 180^\circ = \pm \pi$, (13.6)

и RC-цепи ОС, комплексный коэффициент передачи которой

$$\beta(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = 1 / [(5(\omega\tau)^2 - 1) + j\omega\tau((\omega\tau)^2 - 6)] = \beta(\omega) e^{j\varphi_\beta(\omega)}, \quad \text{где } \tau = RC. \quad (13.7)$$

На рис.13.3 представлены графики АЧХ и ФЧХ цепи ОС (рис.13.2),

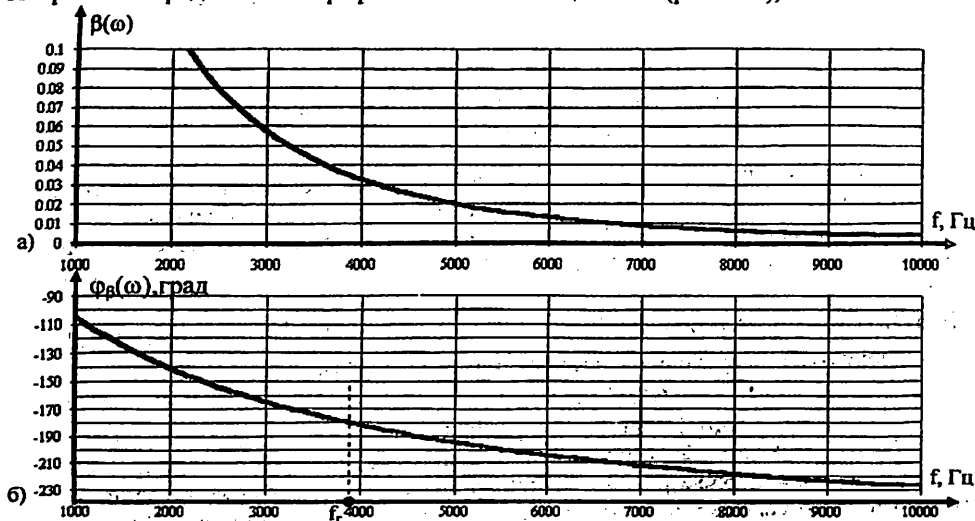


Рис.13.3. АЧХ $\beta(\omega)$ (а) и ФЧХ $\varphi_\beta(\omega)$ (б) цепи ОС (рис.13.2) при $R=1\text{ кОм}$, $C=0,1\text{ мкФ}$ ($\tau = RC=100\text{ мкс}$; $f_r=3,9\text{ кГц}$)

Из АЧХ (рис.13.3,а) видно, что при увеличении частоты от $f = 0$ до $f \rightarrow \infty$ коэффициент передачи цепи ОС $\beta(f)$ уменьшается от 1 до 0, т.е. цепь ОС представляет собой фильтр нижних частот (ФНЧ). Баланс фаз выполняется на частоте ω_r , на которой мнимая часть знаменателя (13.7) равна нулю, то есть $(\omega_r \tau)^2 - 6 = 0$,

$$\text{откуда частота генерации } \omega_r = \frac{\sqrt{6}}{\tau} = \frac{\sqrt{6}}{RC}; \quad f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC}. \quad (13.8)$$

На этой частоте коэффициент передачи цепи ОС, рассчитанный по формуле (13.7), составит величину $\beta(\omega_r) = 1/29$. (13.9)

Для выполнения баланса амплитуд, согласно (13.3), требуется коэффициент усиления $K(\omega_r) = 1/\beta(\omega_r) = 29$, (13.10)

а для возникновения автоколебаний (самовозбуждения) требуется $K(\omega_r) > 29$.

1.3. Автогенератор на инвертирующем ОУ с RC-ФВЧ в цепи ООС
представлен на рис.13.4.

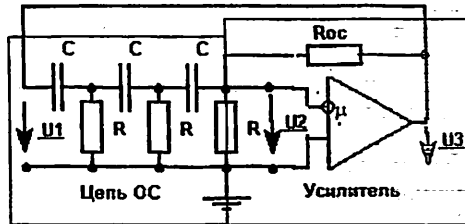


Рис. 13.4. . Схема RC-автогенератора на инвертирующем ОУ с цепью ОС, представляющей собой RC – ФВЧ

В этой схеме в качестве фазобалансной цепи ОС используется трёхзвенная RC цепь фильтра верхних частот (ФВЧ), поворачивающая фазу на 180° . Комплексная передаточная функция такой цепи ОС описывается выражением $\beta(j\omega) = U_2/U_1 = 1/[1 - 5/(\omega RC)^2 + j(1/(\omega RC)^3 - 6/(\omega RC))] = \beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)}$. (13.11)

Колебания в генераторе будут иметь место в том случае, если фазовый сдвиг, создаваемый RC-цепью будет равен 180° , приравняв нулю мнимую часть выражения (13.11) можно определить частоту генерируемых колебаний:

$$\begin{aligned} 1/(\omega RC)^3 - 6/(\omega RC) &= 0; & 1 - 6(\omega RC)^2 &= 0; \\ \omega_r &= 1/\sqrt{6} RC; & f_r &= \omega_r/2\pi = 1/2\pi \sqrt{6} RC. \end{aligned} \quad (13.12)$$

Видно, что при одинаковых параметрах фазосдвигающих RC-цепей частота генерации второй схемы (рис.13.4), содержащей в цепи ОС ФВЧ, в 6 раз меньше частоты генерации первой схемы с ФНЧ в цепи ОС (рис.13.3).

Коэффициент усиления усилителя, необходимый для самовозбуждения генератора на частоте f_r , также как и в первой схеме (рис.13.2) автогенератора, $K > 29$.

На рис.13.4 представлены АЧХ и ФЧХ цепи ОС (рис.13.4).

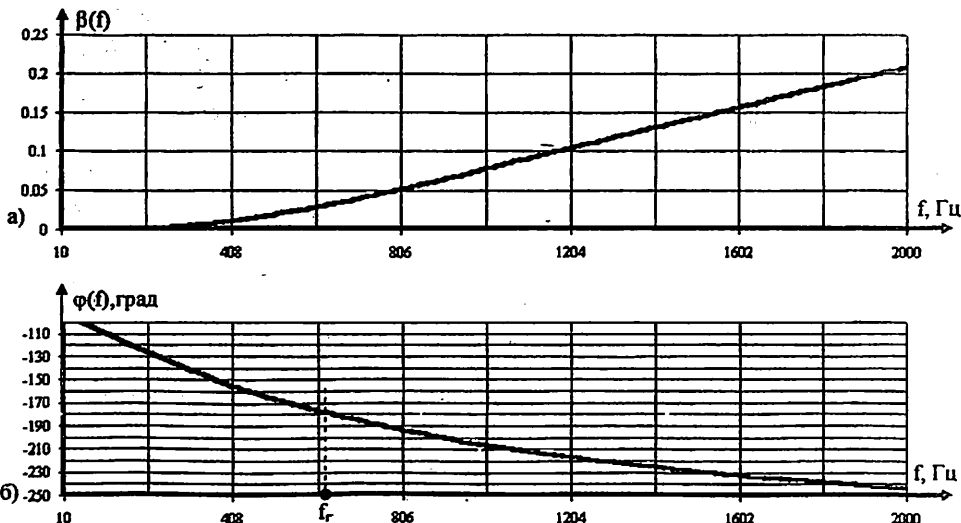


Рис.13.5. АЧХ $\beta(\omega)$ (а) и ФЧХ $\varphi_p(\omega)$ (б) цепи обратной связи (рис.13.4) при $R=1$ кОм, $C=0,1$ мкФ ($\tau = RC=100$ мкс; $f_r = 0,65$ кГц).

1.3. RC-автогенератор на неинвертирующем ОУ с использованием в цепи ОС моста Вина

широко применяется на практике (см. рис.13.6).

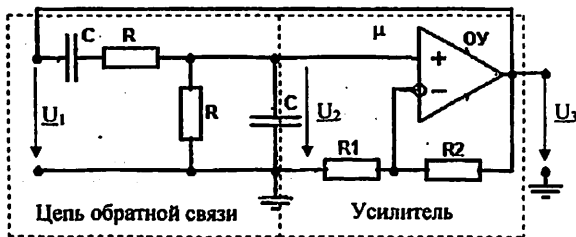


Рис.13.6. Схема RC-автогенератора на неинвертирующем ОУ с использованием в качестве фазобалансной цепи – моста Вина

Комплексная передаточная функция такой цепи ОС описывается выражением

$$\beta(j\omega) = U_2/U_1 = 1/[3 + j(\omega\tau - 1/\omega\tau)] = \beta(\omega)e^{j\varphi_p(\omega)}, \quad (13.13)$$

где

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{9 + (\omega\tau - 1/\omega\tau)^2}} \text{ - АЧХ,} \quad (13.14)$$

$$\varphi_p(\omega) = -\arctan(\omega\tau - 1/\omega\tau)/3. \text{ - ФЧХ} \quad (13.15)$$

АЧХ и ФЧХ цепи ОС (рис.13.6) приведены на рис. 13.7

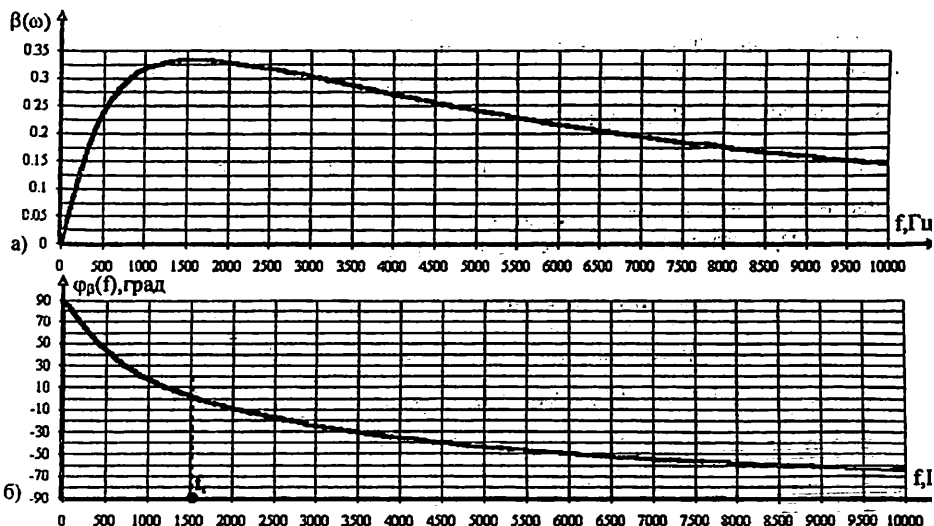


Рис.13.7. АЧХ $\beta(\omega)$ (а) и ФЧХ $\varphi_{\beta}(\omega)$ (б) цепи обратной связи (рис.13.4) при $R=1$ кОм, $C=0,1$ мкФ ($\tau = RC=100$ мкс; $f_r=1,592$ кГц).

Частота генерации RC-автогенератора ω_r (рис.13.6) соответствует нулевому фазовому сдвигу цепи ОС и определяется из решения уравнения $\varphi_{\beta}(\omega) = 0$. Из (13.15) следует $\omega_r \tau - 1/\omega_r \tau = 0$, $\omega_r = 1/\tau = 1/RC$, $f_r = 1/2\pi\tau = 1/2\pi RC$. (13.16)

На частоте генерируемых колебаний коэффициент передачи $\beta(\omega)$ фазобалансной цепи ОС максимален и, как следует из формулы (13.14), равен $\beta(\omega_r) = 1/3 = 0,33333\dots$

Для выполнения условия баланса амплитуд необходимо, чтобы коэффициент усиления усилителя был равен $K(\omega_r) = 1/\beta(\omega_r) = 3$, а для самозбуждения автогенератора необходимо $K(\omega_r) > 3$.

2. Предварительный расчёт

2.1. По заданным параметрам цепи (см. табл. 13.1) для трёх схем RC-автогенераторов определить: частоты генераций f_r , по формулам (13.8), (13.12), (13.16); сопротивления R_2, R_{oc} . Результаты занести в табл. 13.3.

Варианты параметров элементов исследуемых схем Таблица 13.1

Вариант №	R_1 , кОм	Вариант №	R_1 , кОм
1	0,5	9	1,4
2	0,6	10	1,5
3	0,7	11	1,6
4	0,8	12	1,7
5	0,9	13	1,8
6	1,1	14	1,9
7	1,2	15	2,0
8	1,3	16	2,5

Для всех вариантов $R_1=1$ кОм; $C=0,1$ мкФ.

2.2. Рассчитать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) схемы (рис.13.2) при разомкнутой цепи ОС (рис.13.1,б), содержащей каскадное соединение усилителя с коэффициентом усиления $K(\omega)$ и фазосдвигающей RC-цепи ОС, по формуле $H(\omega)=K(\omega)\beta(\omega)=\frac{29}{\sqrt{[5(\omega\tau)^2 - 1]^2 + (\omega\tau)^2[(\omega\tau)^2 - 6]^2}}$. (13.17)

Расчёт АЧХ выполнить на частотах: $f=0; 0,5 f_T; 0,8 f_T; f_T; 1,2 f_T; 1,5 f_T; 2 f_T$.
 Результаты расчёта занести в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

	Предварительный расчёт				Эксперимент			
	f	f, кГц	H(f)	φ(f), град	Измерено		Рассчитано	
					U ₃ , В	φ, град	H(f)	φ(f), град
1	0							
2	0,5 f _T							
3	0,8 f _T							
4	f _T							
5	1,2 f _T							
6	1,5 f _T							
7	2 f _T							

Таблица 13.3

Результаты предварительного расчёта и моделирования

Схема	Предварительный расчёт				Результаты моделирования			
	R ₂ , кОм	f _T , кГц	β(f _T)	K(f _T)	R ₂ , кОм	f _T , кГц	β(f _T)	K(f _T)
13.2			1/29	29				
13.4			1/29	29				
13.6			1/3	3				

3. Выполнение лабораторной работы

3.1. Исследование RC-автогенератора (рис.13.2) на инвертирующем ОУ

Загрузить с дискетки или с HD в ПК текстовый файл Lb-13.doc, записанный в формате Word, ознакомиться с содержанием лабораторной работы и методикой её выполнения. Выполнить предварительный расчёт, согласно исходным данным заданного варианта из методического руководства или текстового файла Lb-13.doc.

Загрузить с дискетки либо с HD схемный файл Lb13-1.ewb в результате чего на рабочем поле программы EWB появится схема, приведенная на рис.13.8.

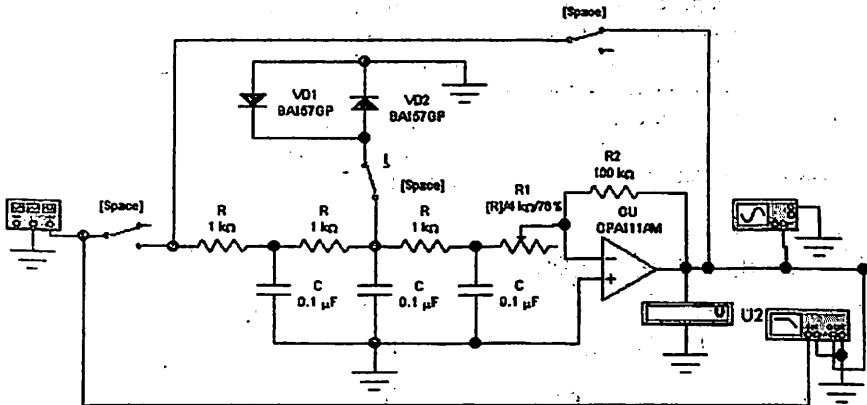


Рис.13.8. Исследование первой схемы ARC-автогенератора на инвертирующем усилителе типа OPA111AM в режиме автоколебаний.

В схеме (рис.13.8) в отличие от схемы (рис.13.2), содержится двухсторонний ограничитель на полупроводниковых диодах VD1 и VD2 типа BA157GP с порогом ограничения 0,34 В. Ограничитель предотвращает нелинейный режим работы ОУ, в результате чего на выходе ОУ, в режиме генерации получается практически синусоидальное напряжение. При отсутствии указанного ограничителя наблюдается не только большие искажения выходного напряжения автогенератора (по форме близки к биполярным прямоугольным импульсам), но и очень большое понижение частоты, существенно отличающегося от теоретического значения (13.8).

Действующее значение гармонического напряжения на выходе генератора измеряется цифровым вольтметром U2.

Установить на схеме генератора параметры сопротивлений R и емкостей C согласно требуемого варианта задания табл. 13.1.

Дважды щелкнув левой клавишей «мыши» по значку осциллографа, откроем переднюю панель осциллографа (рис.13.9).

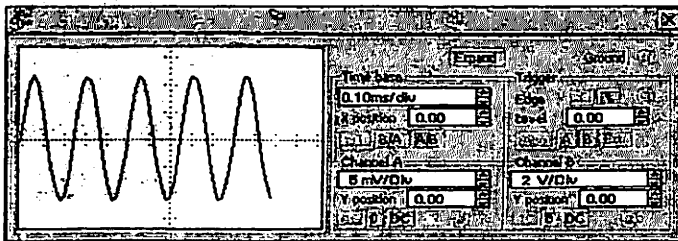


Рис.13.9. Передняя панель осциллографа с изображением напряжения $u_2(t)$

Запустить процесс моделирования схемы автогенератора, щелкнув один раз по клавише . Периодически щелкая левой клавишей мыши по кнопке , расположенной под клавишей, остановить процесс моделирования

тогда, когда на экране осциллографа получится осциллограмма выходного напряжения, удобная для наблюдения и измерения периода генерируемых колебаний T автогенератора. Частота автогенератора является величиной, обратной периоду $f_r=1/T$ и заносится в табл. 13.3.

Более высокую точность измерения длительности периода T можно получить, раскрыв осциллограмму на весь экран монитора. Для этого, после того как процесс возбуждения колебаний установится и процесс моделирования

приостановлен, достаточно один раз щёлкнуть левой клавишей мыши на инструментальной панели по клавише "Display Graphs". В результате чего на экране монитора поверх схемы появится окно, вид которого представлен на рис.13.10. Далее щелкнув левой клавишей мыши по клавише, указанной стрелкой А, получим полное раскрытие (на весь экран монитора) процесса возбуждения автоколебаний в автогенераторе (см. рис 13.11).

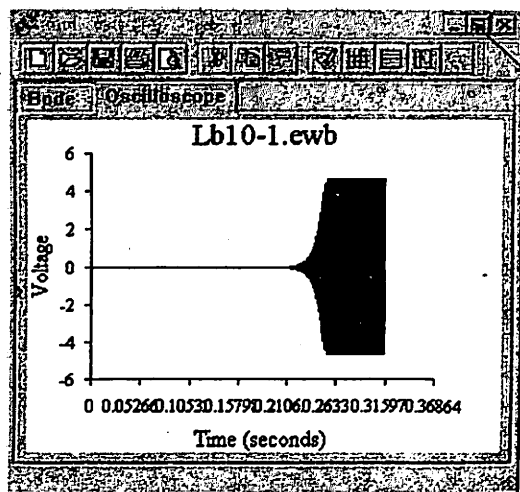


Рис. 13.10. Процесс самовозбуждения автоколебаний

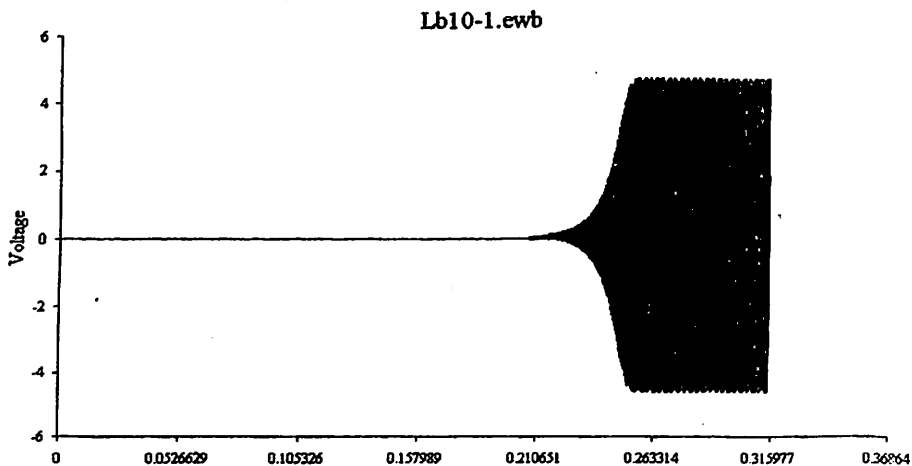


Рис.13.11. Картинка на экране монитора после щелчка левой клавишей мыши по клавише, показанной стрелкой на рис 13.10.

Выделяя с помощью мыши соответствующую часть осциллограммы прямоугольником, можно получить подробную и удобную часть осциллограммы в увеличенном виде, по которой можно с помощью вертикальных курсоров, перемещаемых мышью, с высокой точностью измерить период генерируемых колебаний (см. рис 13.12.).

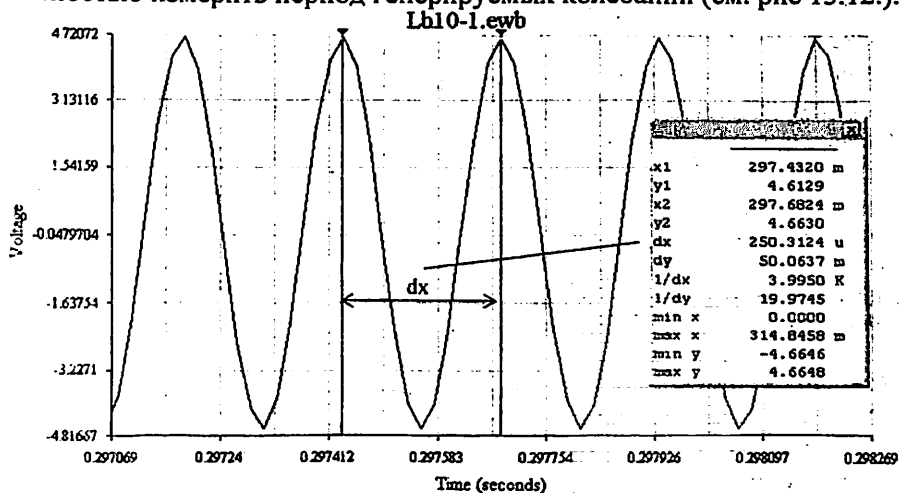


Рис.13.12. Измерение периода колебаний выходного напряжения автогенератора $T=dx=250,3124$ мкс.

После измерения периода генерируемых колебаний необходимо

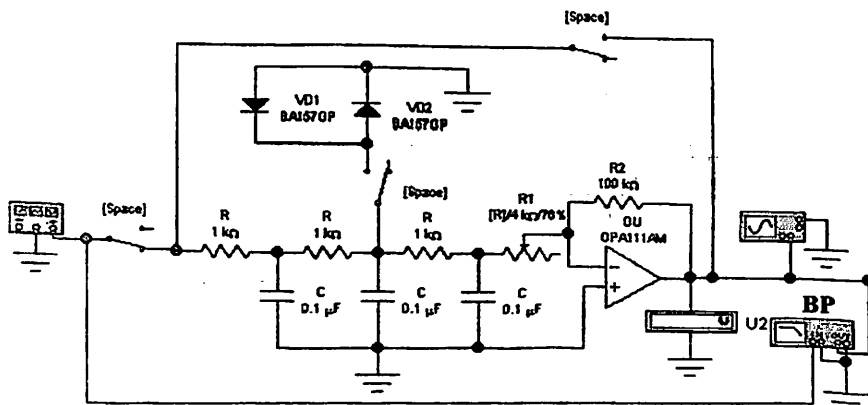


Рис.13.13. Схема измерения АЧХ и ФЧХ автогенератора с разорванной цепью ОС.

вернуться к исходной схеме (рис.13.8) и приступить к исследованию ФЧХ и ФЧХ разомкнутой цепи ОС, содержащей каскадное соедине-

ние усилителя и цепи ОС (см. рис.13.1,б). Для получения требуемой схемы достаточно один раз нажать клавишу «пробел», в результате чего произойдет одновременное переключение трёх одинаковых ключей и получится требуемая схема, приведённая на рис.13.13.

Для измерения АЧХ и ФЧХ автогенератора с разомкнутой цепью ОС необходимо раскрыть переднюю панель измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Bode Plotter (BP), два раза щёлкнуть мышью по его значку, затем запустить моделирование, в результате на экране ИЧХ появится изображение АЧХ или ФЧХ(рис.13.14).

Для измерения АЧХ надо щёлкнуть мышью по клавише **Magnitude**. Для измерения ФЧХ надо щёлкнуть мышью по клавише **Phase**. Перемещая вертикальный курсор-визир к BP с помощью мыши и, уточняя его положение с помощью двух кнопок со стрелками \leftarrow \rightarrow устанавливается требуемая частота (её значение видно в нижнем окошечке), отсчитываем из верхнего окошечка

коэффициента передачи $H(f)=K(f)\beta(f)=U_3/U_1$; значение АЧХ автогенератора с разомкнутой ОС на этой частоте. Перейдя сразу же в режим расчёта ФЧХ, отсчитывают из верхнего окошечка значение $\varphi(f)=\varphi_k+\varphi_\beta$, т.е. ФЧХ на той же частоте (в нижнем окошечке). Результаты измерений АЧХ и ФЧХ автогенератора при разомкнутой ОС заносятся в табл.13.2.

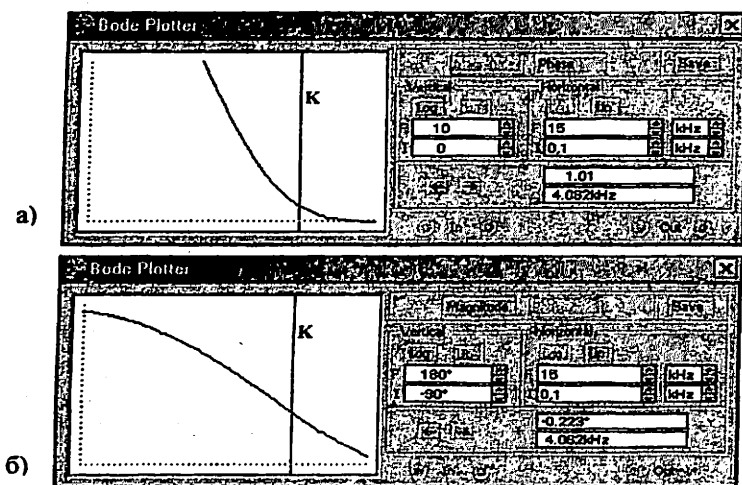


Рис. 13.14. Измерение АЧХ (а) и ФЧХ (б) петлевого коэффициента передачи схемы рис. 13.13 с помощью ИЧХ Bode Plotter

3.2. Исследование второй схемы RC-автогенератора (рис.13.4) на инвертирующем ОУ

Загрузить следующий схемный файл Lb13-2.ewb, в результате чего на экране монитора появится вторая схема RC-автогенератора (рис.13.15) с измерительными приборами, необходимыми для её исследования.

Исследование второй схемы ARC-автогенератора на инвертирующем ОУ производится также, как на первой схеме (см. п.3.1).

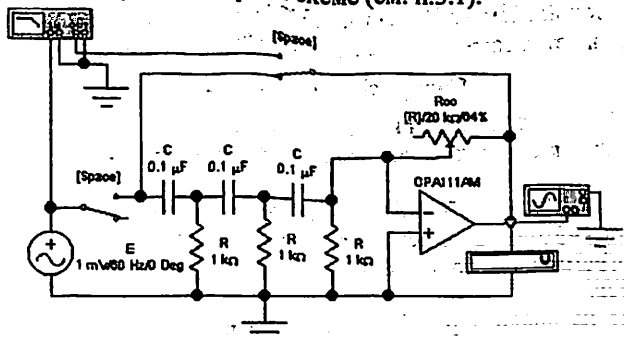


Рис.13.15. Исследование второй схемы ARC-автогенератора на инвертирующем ОУ типа OPA111AM.

3.3. Исследование третьей схемы RC-автогенератора (рис.13.4) на неинвертирующем ОУ с мостом Вина

Загрузить следующий схемный файл Lb13-3.ewb, в результате чего на экране монитора появится третья схема RC-автогенератора на неинвертирующем ОУ с мостом Вина (рис.13.16) и с измерительными приборами, необходимыми для её исследования.

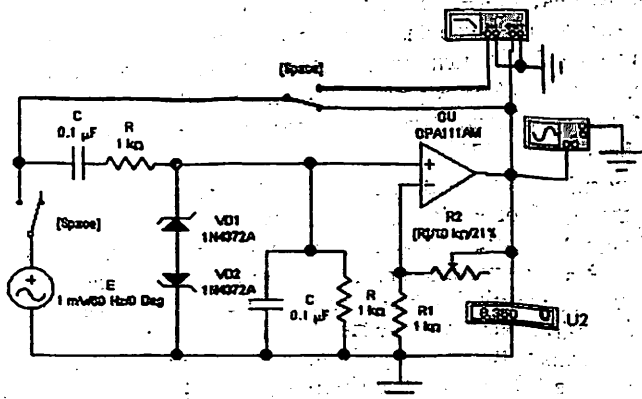


Рис.13.16. Схема исследования ARC-автогенератора на неинвертирующем ОУ типа OPA111AM с мостом Вина

В схеме (рис.13.16) в отличие от схемы (рис.13.6), содержится двухсторонний ограничитель на двух стабилитронах VD1 и VD2 типа 1N4372A с порогом ограничения 3,011 В, который предотвращает нелинейный режим работы ОУ в результате чего на выходе ОУ в режиме генерации получается практически синусоидальное напряжение. При отсутствии указанного ограничителя автогенератора (по форме близки к биполярным прямоугольным импульсам) и очень большое понижение частоты, существенно отличающегося от теоретического значения, рассчитываемого по формуле $f_r = 1/2\pi RC = 1/2\pi RC$.

Исследование второй схемы ARC-автогенератора на неинвертирующем ОУ с мостом Вина выполняется также, как на первой схеме (см. п.3.1).

4. Содержание отчёта

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схемы и расчётные формулы.
- 4.3. Результаты предварительного расчёта и моделирования, сведённые в табл. 13.2 и табл.13.3.
- 4.4. Графики АЧХ и ФЧХ ARC-автогенератора (рис.13.2) на инвертирующем ОУ с разомкнутой ОС по результатам расчёта и моделирования.
- 4.5. Осциллограммы напряжений на выходе исследуемых RC-автогенераторов.
- 4.6. Выводы из анализа результатов предварительного теоретического расчёта и моделирования.

4. Контрольные вопросы

- 5.2. Укажите правильное значение частоты генерации в схеме RC-автогенератора (рис. 13.2) при $R=1$; $C=1$
Ответы: А. $\omega_r=0,39$; Б. $\omega_r=2,45$; В. $\omega_r=15,39$; Г. $\omega_r=0,245$.
- 5.3. Укажите правильное значение условия баланса амплитуд в схеме RC-автогенератора (рис. 13.2). Ответы: А. $K\beta=0,8$; Б. $K\beta=1$; В. $K\beta=0,9$; Г. $K\beta=0,95$.
- 5.4. Укажите правильное значение коэффициента усиления K , при котором выполняется условие баланса амплитуд при $\beta=0,2$.
Ответы: А. $K=4$; Б. $K=5$; В. $K=4,5$; Г. $K=3$.
- 5.5. Укажите правильное значение коэффициента передачи цепи ОС β , при котором в цепи с ОС выполняется условие баланса амплитуд, если $k=4$.
Ответы: А. $\beta=0,1$; Б. $\beta=0,2$; В. $\beta=0,25$; Г. $\beta=0,15$.
- 5.6. Укажите правильное значение сдвига фаз цепью ОС, если усилитель создаёт сдвиг фаз $\varphi_B(\omega) = -170^\circ$.
Ответы: А. $\varphi_B(\omega)=130^\circ$; Б. $\varphi_B(\omega)=190^\circ$; В. $\varphi_B(\omega)=170^\circ$.
- 5.7. В фазосдвигающей RC-цепи ОС (см. рис. 13.2) все сопротивления увеличили в 2 раза. Укажите, как изменится частота генерации f_r автогенератора. Ответы: А. Увеличится в два раза. Б. Уменьшится в два раза. В. Увеличится в четыре раза. Г. Уменьшится в четыре раза.
- 5.8. Как изменится частота генерации автогенератора (см. рис. 13.2), если коэффициент усиления усилителя K увеличится в 1,2 раза? Ответы: А. Увеличится в 1,2 раза. Б. Уменьшится в 1,2 раза. В. Не изменится.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров И.А., Тарасова Н.П.: Электроника в технике почтовой связи: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь. 1990.-280 с.
2. Ушаков В.Н. Электротехника и электроника. Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1997. Бакалов В.П. и др. Основы теории электрических цепей и электроники. Учебник для вузов / В.П. Бакалов, А.Н. Игнатов, Б.Н. Крук. – М.: Радио и связь 1989. – 528 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем.- М.: Мир, 1982. – 512 с.
4. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т./Под общей редакцией Д.И.Панфилова. Т.1: Электротехника. - М.: ДОДЕКА, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Правила работы с двухканальным осциллографом

Осциллограф находится в библиотеке контрольно-измерительных приборов (Instruments). Условное обозначение осциллографа и значение внешних полюсов показано на рис.П.1.

Двухканальный осциллограф предназначен для одновременного исследования двух сигналов.

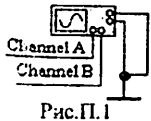


Рис.П.1

- 1) Для управления работой осциллографа нужно открыть переднюю панель прибора. Для этого дважды щелкнуть мышью на изображении осциллографа. На рабочем столе откроется передняя панель прибора, показанная на рис. П.2.

- 2) Земление осциллографа осуществляется с помощью клеммы **GROUND** в правом верхнем углу прибора.

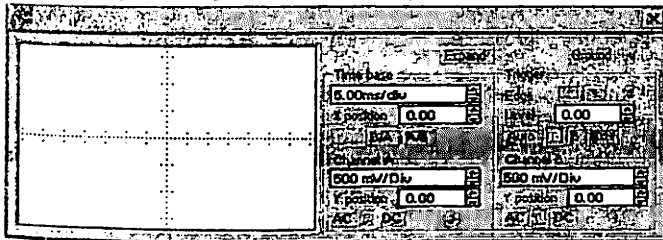


Рис.П.2

- 3) Осциллограф имеет два входных канала: **Channel A** – слева для исследования

одного напряжения и **Channel B** – справа для исследования другого напряжения. Каждый канал имеет отдельную регулировку усиления (чувствительности) в диапазоне от 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5 кВ/дел (kV/Div). Изображение сигналов в каждом канале можно смещать по вертикальной оси «Y» регуляторами «Y position».

4) Осциллограф позволяет по каждому каналу наблюдать сигналы различного вида. Выбор вида сигнала осуществляется нажатием кнопок “АС”, или “0”, или “Dc”, расположенных в нижней части панели каждого канала.

Режим “АС” предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (этот режим еще называют режимом “*закрытого входа*”). В этом режиме усилитель «Y» осциллографа не пропускает постоянную составляющую сигнала. В режиме “0” входной зажим канала соединяется с общим полюсом – «землей». Этот режим используется тогда, когда нужно просмотреть на экране только

один сигнал

В режиме “DC” (включен по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим называют также режимом “*открытого входа*”.

С правой стороны от кнопки “DC” (рис. П.2) расположены входные клеммы каналов, к которым подключаются исследуемые сигналы (см. рис. П.1).

4) Режим скорости горизонтальной развертки устанавливается в блоке «Time base». Скорость развертки двух каналов можно установить в пределах $0.1 \text{ ns/div} - 1.0 \text{ } \mu\text{s/div}$. Можно также смещать изображение по горизонтали кнопкой «X position».

5) В любом осциллографе существует блок *синхронизации*, обеспечивающий режим синхронной работы по фазе напряжения горизонтальной развертки осциллографа и исследуемого сигнала. На передней панели данного прибора блок синхронизации назван «Trigger».

Синхронный режим работы позволяет увидеть на экране осциллографа устойчивое изображение двух сигналов.

Режим синхронизации выбирается кнопками “AUTO”, “A”, “B” и “EXT” В стандартном режиме работы рекомендуется включить “AUTO” (обычный режим включен по умолчанию). Этот режим реализует изображение в координатах: *по вертикали – напряжение исследуемого сигнала, по горизонтали – время*. Остальные режимы в данной работе не используются и поэтому здесь не описываются.

6) При наблюдении сразу двух сигналов (например, при сравнении сигналов между собой по фазе) программа EWB позволяет установить синхронизацию «*в ждущем режиме*». Тогда картинки на экране будут неподвижными.

Для этого в строке меню программы, вызвать меню *Analysis* и включить команду *Analysis Options*. В открывшемся окне щелкнуть мышью на *Instruments* и включить режим «*Pause after each screen*» - остановка моделирования после заполнения экрана. При этом изображение сигналов на экране будет неподвижным.

После остановки моделирования, вызванной изменением параметров цепи или сигнала, изменением режимов осциллографа и.т. нужно обязательно включить кнопку «Пуск» программы.

7) В осциллографе предусмотрен еще один режим, создающий удобство для пользователя – обозначение каждого сигнала цветными линиями. Этот режим позволяет по цвету линий отличить входной сигнал от выходного. Для установки цвета сигнала (проводника) нужно подвести курсор к проводнику нужного сигнала и щелкнуть мышью. Толщина линии увеличится. Щелкнуть еще дважды. На рабочем столе появится окно *Wire Properties*. Для выбора цвета (*Color*) щелкнуть по кнопке *Set Wire Color* и в появившемся еще одном окне выбрать цвет щелчком по соответствующему цветному квадрату, затем – ОК. Цвет проводника сигнала в схеме и на экране будет того цвета, который Вы выбрали.

8) Еще один необходимый для работы осциллографа режим – увеличение размера экрана. Этот режим выполняется кнопкой “EXPAND”. Лицевая панель осциллографа существенно меняется (рис.П.3) – увеличивается размер экрана и появляется возможность подробно сравнить два сигнала по форме. При сравнении форм сигналов нужно учитывать чувствительность прибора по входным каналам.

С помощью прокрутки (перемещения) изображений сигналов по горизонтали и их сканирования вертикальными визирными линиями (красного и синего цвета), можно измерить мгновенные значения переменных напряжений в заданный момент времени. Эти параметры выводятся в два соответствующих прямоугольных окна на панели осциллографа.

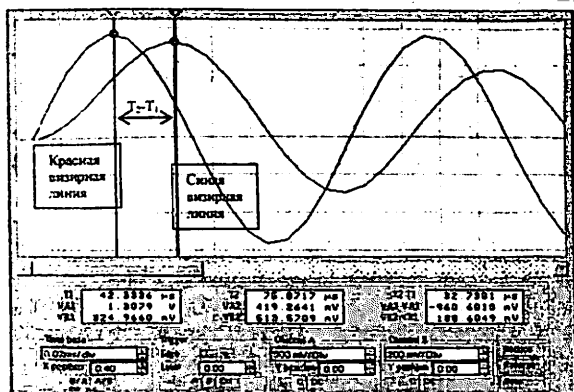


Рис.П.3

окнах приводятся результаты измерения напряжений, временных интервалов и их приращений между соответствующими визирными линиями по их порядковому номеру.

Для измерения разности начальных фаз двух сигналов визирные линии нужно устанавливать в ближайших точках максимальных значений двух сигналов. Красную визирную линию нужно установить на входной сигнал. Это показано на рис.П.3.

В третьем окне выводятся временной интервал ($T_2 - T_1$) между визирными линиями и разности напряжений сигналов в точках визирных линий.

Визирные линии (они показаны на рис.П.3) могут быть установлены за треугольные «ушки» курсором в любое место экрана. Красная визирная линия имеет номер 1, синяя – номер 2. В индикаторных

При расчете разности начальных фаз нужно учитывать, что первый (слева) по оси времени сигнал в данной низкочастотной цепи опережает второй, который справа. Значит если в окне разность $(T_2 - T_1) > 0$, то первый сигнал опережает второй и разность фаз $\varphi(\omega_k) < 0$.

Разность начальных фаз двух сигналов при заданной частоте f_k можно подсчитать по формуле $\varphi(f_k) = -(T_2 - T_1) \cdot f_k \cdot 360^\circ$ [градусы].

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Правила работы с измерителем АЧХ – ФЧХ

Кнопка Измерителя АЧХ-ФЧХ находится в библиотеке Instruments рабочего окна программы. На рис.П.4 показано условное обозначение измерителя

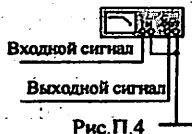


Рис. П.4

и назначение внешних полюсов прибора, также способ подключения его к исследуемой схеме. Измеритель предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке

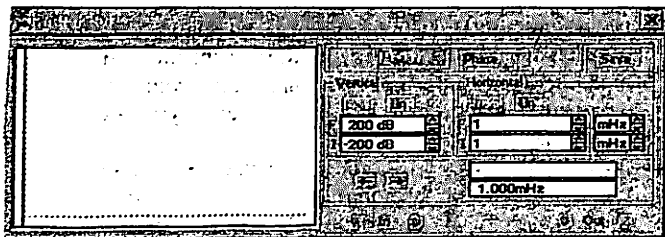


Рис. П.5.

MAGNITUDE, включена по умолчанию) и ФЧХ (при нажатой кнопке PHASE) характеристик. На рис.П.5 показана передняя панель измерителя в режиме измерения АЧХ (MAGNITUDE). Прибор содержит два канала: по оси Y

(VERTICAL) – на панели расположен слева и по оси X (HORIZONTAL). Масштаб по осям можно выбрать логарифмическим (кнопка LOG, включена по умолчанию) и линейным (кнопка LIN).

Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи и фазы по оси Y и вариации частоты по оси X с помощью кнопок в окошках F – максимальное и I – минимальное значение.

Значения коэффициента передачи и фазы при соответствующей частоте выводятся в двух окошках в правом нижнем углу панели. Точка на характеристике, в которой требуется определить значения указанных величин, выбирается с помощью вертикальной визирной линейки, находящейся в исходном состоянии в начале координат и перемещаемой по графику мышью или кнопками «← и →».

Перемещая дискретно визирную линейку вдоль характеристики и, записывая значения величин $K(f)$ и $\varphi(f)$, можно построить графики АЧХ и ФЧХ по точкам

Подключение прибора к исследуемой схеме осуществляется с помощью зажимов IN (вход) и OUT (выход) (см. рис.П.4). Левые клеммы зажимов

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	2
Введение.....	3
1. Знакомство с программой EWB.....	5
2. Исследование источников постоянного напряжения и тока	12
3. Проверка законов Кирхгофа для ЛЭЦ постоянного тока.....	18
4. Исследование RL- и RC- цепей при гармоническом воздействии.....	23
5. Исследование резонанса в последовательном колебательном контуре.....	30
6. Исследование ЛЭЦ при периодическом несинусоидальном воздействии.....	38
7. Исследование переходных процессов в RL- и RC-цепях.....	44
8. Исследование полупроводниковых диодов.....	53
9. Исследование биполярных транзисторов.....	61
10. Исследование полевых транзисторов.....	69
11. Исследование усилительного каскада на БПТ транзисторе с ОЭ и RC связями.....	80
12. Исследование операционного усилителя с цепью обратной связи.....	91
13. Исследование RC – автогенераторов на операционном усилителе.....	101
ЛИТЕРАТУРА.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	116

«ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ».

*Лабораторный практикум с использованием программы
«Electronics Workbench».*

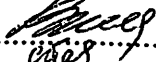


Для студентов бакалавриата,

обучающихся по направлению «Почтовая служба»

Составитель Козлов В.А.

Рассмотрен и рекомендован к печати

на заседании кафедры ТЭЦ

Редактор.....  Белова Л.Н.
Корректор.....  Павлова С.И.
Ответственный редактор ..  д.ф-м.н., профессор Арипов Х.К.

ВЫ П И С К А

из протокола № 28 от 21.05.07 заседания кафедры ТЭЦ.

Присутствовали: Алимходжаев К.Т., Соколов В.К., Туляганова В.А.,
Белова Л.Н., Давидов С.Р., Иванова Е.В., Гаюбов Ш.Н., Козлов В.А.

Слушали. О рекомендации к печати работы

«ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ».
*Лабораторный практикум с использованием программы
«Electronics Workbench»
для студентов бакалавриата,*

обучающихся по направлению «Почтовая служба».

Составитель Козлов В.А.

Решение. Рекомендовать к печати методическую работу

«ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ».
*Лабораторный практикум с использованием программы
«Electronics Workbench»
Для студентов бакалавриата,
обучающихся по направлению «Почтовая служба».*

Зав. каф. ТЭЦ
Секретарь кафедры ТЭЦ

Алимходжаев К.Т.
Иванова Е.В.

Формат 60x84 1/16 Заказ № 50 Тираж 100
Отпечатано в Издательско
полиграфическом
центре «ALQASHI» при ТУИТ
ул. Ташкент Амир Темура, 108