

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
с использованием программы
«Electronics Workbench»

для бакалавров, обучающихся по направлениям:
5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)
5522000 «Радиотехника»,
5522100 «Телевидение, радиосвязь и радиовещание»,
5522200 «Телекоммуникация»,
5524400 «Мобильные системы связи»

Ташкент 2008

Составитель: Козлов В.А. «Лабораторный практикум по дисциплине «Теория электрических цепей» с использованием программы «Electronics Workbench» для бакалавров, обучающихся по направлениям: 5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)», 5522000 «Радиотехника», 5522100 «Телевидение, радиосвязь и радиовещание», 5522200 «Телекоммуникация», 5524400 «Мобильные системы связи»
Ташкент, ТУИТ, 2008.-129 с.

В связи с непрерывным ростом объема информации и сокращением времени, отводимым на изучение многих технических дисциплин, в том числе и теории электрических цепей (ТЭЦ), а также возрастанием требований к качеству подготовки специалистов в области информационных технологий и телекоммуникаций 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 виртуальных лабораторных 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. В приложении приводится методика работы с виртуальными измерительными приборами (двухканальным осциллографом и измерителем частотных характеристик – Bode plotter). 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, которая происходит либо во время проведения занятия, либо в определённое время, указанное преподавателем.

Тематика лабораторных работ соответствует программе курса ТЭЦ. Первые 7 лабораторных работ выполняются в 3-ем, остальные 6 – в 4-ом семестре. Отчеты по выполненным лабораторным работ 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 её 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 являются 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 неисправном персональном компьютере (ПК). 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 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 LabTECru, расположенной на рабочем поле дисплея монитора ПК. После чего откроется окно, содержащее, 13 папок с именами лабораторных работ Lab 1 – Lab 13, что означает лабораторные работы № 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. Текстовые и соответствующие схемные файлы загружаются двойным щелчком мыши по соответствующему ярлыку-пиктограмме. После чего на экране монитора появляется соответствующий пояснительный текст или тре-

буемая 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 расположенной в правом верхнем углу рабочего окна программы EWB.

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

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 университета, 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).

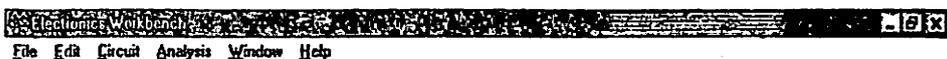


Рис.1.1. Меню программы EWB

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

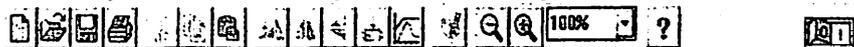


Рис.1.2. Панель инструментов программы EWB

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

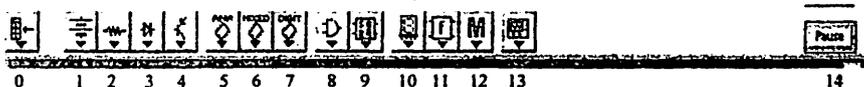


Рис. 1.3. Панель компонентов программы EWB

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  и "Pause". Кнопка  предназначена для запуска на расчёт модели электрической схемы. Под запуском модели понимается включение источников, сигналов и контрольно-измерительных приборов. Кнопка  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).

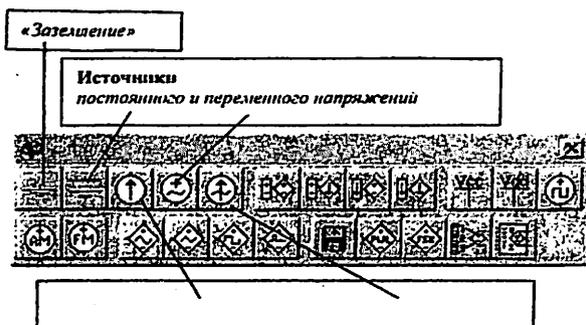


Рис. 1.4. Библиотека источников тока и напряжения

Откройте библиотеку Basic(кнопка 2) - основные пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивностей и т.д.) (рис. 1.5). На каждой кнопке показано условное изображение элемента схемы.



Рис. 1.5. Библиотека основных пассивных элементов Basic

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. 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.

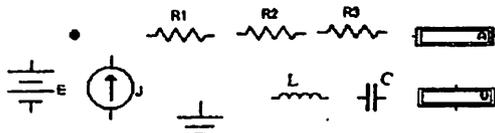


Рис. 1.8.. Элементы и приборы схемы

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.

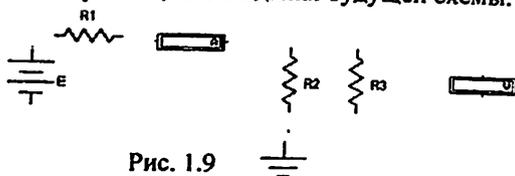


Рис. 1.9

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 устанавливаются 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 кΩ (кОм), R2 = 1 кΩ (кОм), R3 = 500 Ω (Ом), E = 2V (В).

Результат выполнения этого упражнения показан на рис.1.10.

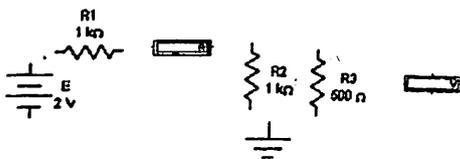


Рис.1.10

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 напряжение 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, расположенная на противоположной стороне изображения прибора, является по-

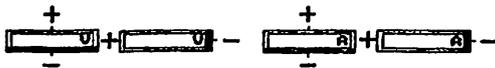


Рис. 1.11. Полярность выводов приборов

тенциальной и обозначена на рис. 1.11 знаком «+». Вращение изображения прибора может быть выполнено нажатием комбинации клавиш Ctrl+R.

Входное сопротивление вольметра R_V обычно выбирают значительно больше сопротивления, параллельно к которому подключают вольметр. 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 вольметра 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.

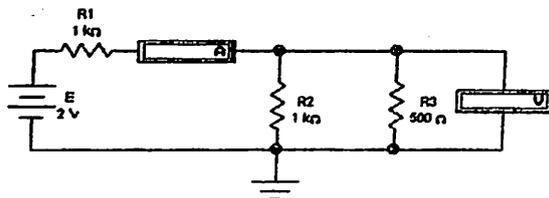


Рис. 1.12. Пример электрической схемы

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 **0 1**.

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

Амперметр должен показать величину тока $I = 1.5 \text{ mA}$, а вольтметр – на-

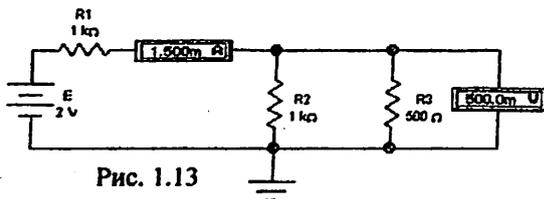


Рис. 1.13

пряжение $U = 500 \text{ mV}$ (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** -

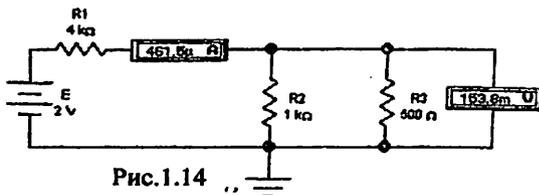


Рис.1.14

временн я остановка моделирования. Откройте диалоговое окно резистора R1 и измените величину сопротивления. Запустите модель вторичным нажатием кнопки **Pause**. Результаты изменений изменятся:

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

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

Методика работы с двухканальным осциллографом подробно изложена в приложении П1 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 П2 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?
- 3.4. 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.

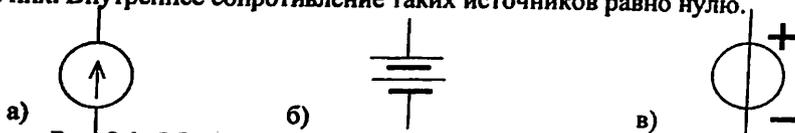


Рис. 2.1. Обозначение независимых источников напряжения.

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.

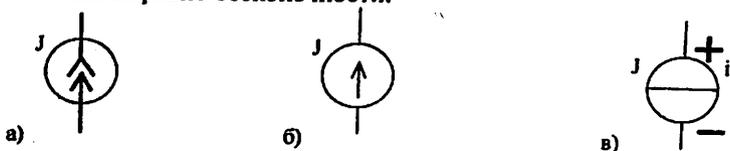


Рис. 2.2. Обозначение независимых источников тока.

Стандарт: а) Россия; б) США; в) Германия

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

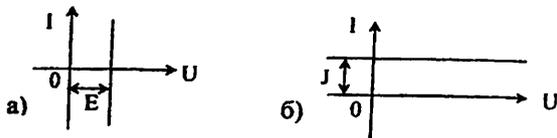


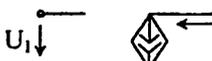
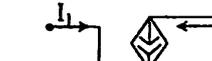
Рис. 2.3. Внешние ВАХ идеального источника постоянного:

а - напряжения; б - тока

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

Таблица 2.1

Зависимые источники напряжения и тока

п	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. Последовательная схема замещения (рис.2.4,а) содержит последовательные 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 конкретных случаях пользуются той схемой, которая позволяет проще и быстрее решить поставленную задачу.



Рис.2.4. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения реальных источников

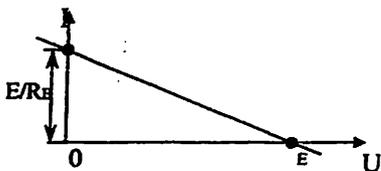
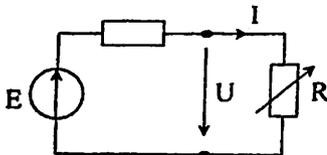


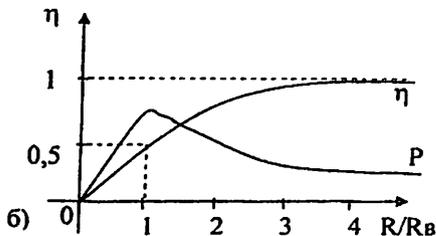
Рис.2.5. Внешняя характеристика реального источника

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), проходящую через точки с координатами (U,I) : $(E,0)$, $(0,E/R_b)$.

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:

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

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

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 ($R = R_b$).

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

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 бесискажённая 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 _B , 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 _B , 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 =В;	R _B = ...Ом	Результаты расчёта				Результаты измерений			
№	R/R _B	R, Ом		I, А	U, В	P, Вт	η	I, А	U, В	P, Вт	η
1	0,1										
2	0,5										
3	1,0										
4	1,5										
5	2										
6	4										
7	10										

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

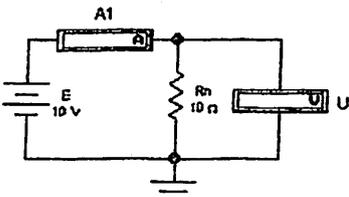


Рис.2.7. Схема исследования идеального источника

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

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 $I(U)$.

Таблица 2.3

Исследование идеального источника напряжения

n	R, Ом	U, В		
		Измерено	Рассчитано	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, приведенная на рис.2.8. Установить величину тока источника тока $I = 100\text{н А}$ (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 $U(I)$.

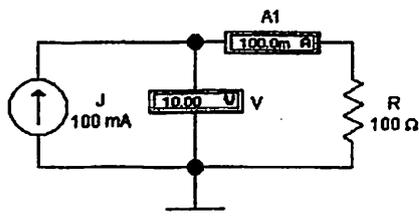


Рис. 2.8. Исследование идеального источника постоянного тока

Установить величину тока источника тока $I = 100\text{н А}$ (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 $U(I)$.

Таблица 2.4.

Исследование идеального источника тока

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

3.3. Измерение коэффициента управления ИНУТ

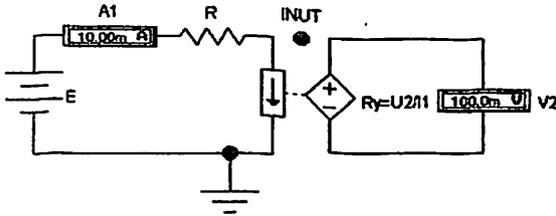


Рис. 2.9. Схема исследования ИНУТ

ходного 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_y, Om	I_1, mA	U_2, B	R_y, Om
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 $R_{уп} = U_2/I_1$.

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 резистора R_B согласно номера варианта (см. табл. 2.2). Включить расчёт, нажатием левой клавишей мышки на значок

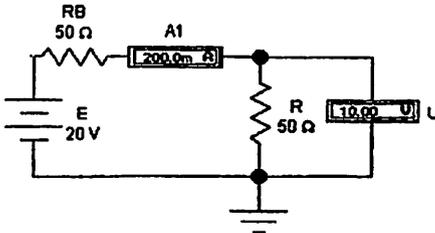


Рис. 2.10. Исследование реального источника

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 U). По результатам измерений I и U рассчитать значения

$$P = UI \text{ и } \eta = U/E$$

(2.4) и занести их в табл. 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 аналогичными графиками предварительного расчёта.

10000V ZALI 17

TATU
KUTUBKHONASI

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Что такое идеальный источник напряжения и тока и как они обозначаются на схеме?
- 4.2. Чему равно внутреннее сопротивление идеального источника напряжения и источника тока?
- 4.3. Чем отличаются реальные источники электрической энергии от идеальных?
- 4.4. Какой вид имеют схемы замещения реального источника, и каковы условия их эквивалентности?
- 4.5. Какие режимы работы реального источника Вы знаете?
- 4.6. Что такое режим холостого хода и короткого замыкания реального источника?
- 4.7. Что такое согласованный режим реального источника и его свойства?
- 4.8. Какие типы зависимых источников Вам известны и каковы их свойства?
- 4.9. При каком значении сопротивления нагрузки генератора в ней выделяется максимальная мощность?
- 4.10. Какое значение максимальной мощности можно получить от источника с заданными значениями э.д.с. E и внутренним сопротивлением R_B ?
- 4.11. Чему равен к.п.д. источника при согласованном режиме его работы?

3. ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА ДЛЯ ЛЭЦ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

1. Теоретические сведения

Первый закон Кирхгофа – в любом узле алгебраическая сумма токов всех ветвей, 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 .

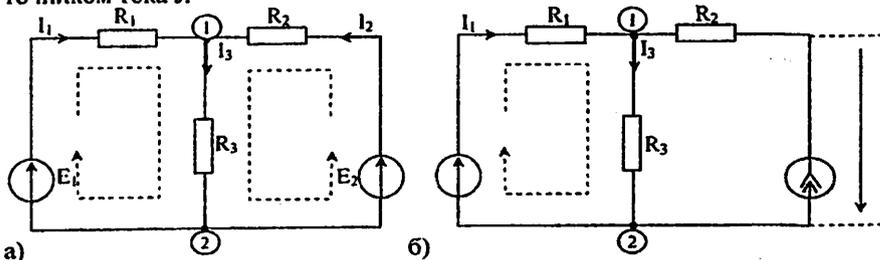


Рис.3.1. Схема с двумя источниками напряжения E_1, E_2 (а) и схема с источником напряжения E_1 и источником тока J

Для схемы рис.3.1,а токи в ветвях I_1, I_2, I_3 могут быть определены из решения системы уравнений по закону 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 $I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$; $I_2 = \frac{E_2(R_1 + R_3) - E_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$; $I_3 = I_1 + I_2$. (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 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 табл. 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 табл. 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 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В
Схема рис. 3.1,а	Расчитано						
	Измерено						
	б, %						
Схема рис. 3.1,б	Расчитано						
	Измерено						
	б, %						
$E_1 = \dots$ В; $E_2 = \dots$ В; $J = \dots$ мА; $R_1 = \dots$ Ом; $R_2 = \dots$ Ом; $R_3 = \dots$ Ом							

3. Выполнения работы

3.1. Исследование схемы с двумя источниками напряжения

Производится загрузка программы F\WB. Раскрывается папка файлов Lab_TES

Загружается файл Lb3-1, в результате на дисплее монитора появляется схема, приведённая на рис. 3.2

Установить параметры элементов цепи (E1, E2, R1, R2, R3) согласно исходным данным варианта задания (см. табл.3.1). Выполнить запуск на 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 I₁, I₂, I₃ определяются по показаниям амперметров A1, A2, A3- напряжений на сопротивлениях U₁, U₂, U₃- вольтметров V1, V2, V3.

Результаты изменений занести в табл.3.2.

Относительная погрешность измерений токов и напряжений определяется по формуле

$$\delta = (A_p - A_n) / A_p \quad (3.15)$$

где A_p – рассчитанная величина тока или напряжения;
A_n – 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.

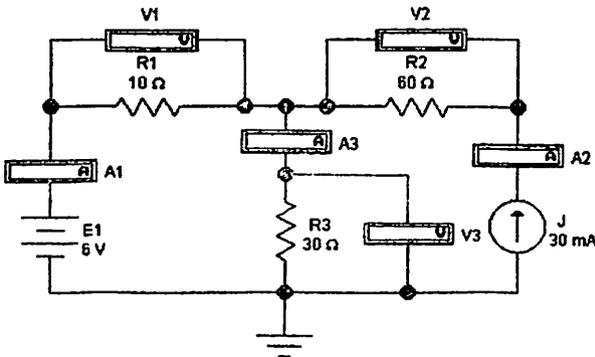
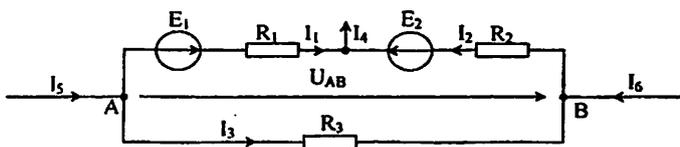


Рис.3.3. Схема с источником напряжения E1 и источником тока J

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 заносить в таблицу 3.2.

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Какие основные топологические понятия используются в ТЭЦ?
- 4.2. Что называется ветвью, узлом и контуром в ЭЦ?
- 4.3. Для чего применяются законы Кирхгофа 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. Какие контуры в ЭЦ называются независимыми?
- 4.9. Какое общее количество уравнений необходимо составить по законам Кирхгофа?
- 4.10. Как определяется мощность, отдаваемая источником напряжения?
- 4.11. Как определяется мощность, отдаваемая источником тока?
- 4.12. Как определяется мощность, потребляемая в сопротивлении?



- 4.13. Что такое баланс мощностей в ЭЦ постоянного тока?
- 4.14. Для чего используется уравнение баланса мощностей в ЭЦ?

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.

- 4.15. 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.

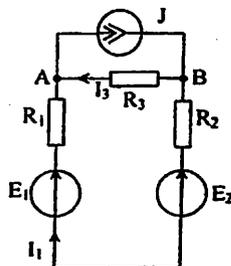
- 4.16. Для заданной цепи составить систему уравнений по законам Кирхгофа.

- 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 частотных характеристик и векторных диаграмм, 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)

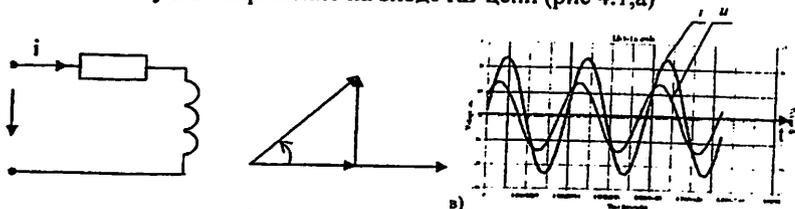


Рис. 4.1. Схема RL-цепи (а), векторная диаграмма (б), кривые мгновенных значений тока и напряжения на входе (в)

равно сумме мгновенных значений напряжений на её элементах (сопротивлении R и индуктивности L)

$$u = u_R + u_L \quad (4.1)$$

При установившемся гармоническом режиме напряжение на входе RL-цепи (рис.4.1,а)

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.2)$$

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

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

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

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, из (4.4) - напряжение на индуктивности u_L опережает по фазе ток i на 90° (см. рис.4.1, б). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи приведены на рис. 4.1,б.

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

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

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.4.2. 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).

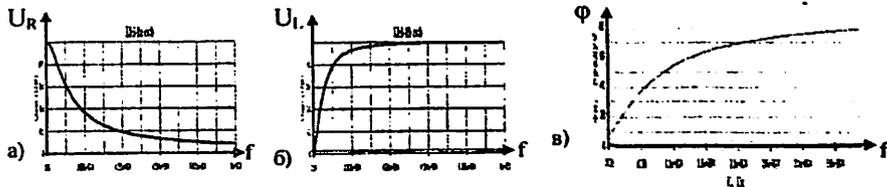


Рис. 4.2. Зависимости $U_R(\omega)$, $U_L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для RL-цепи

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)

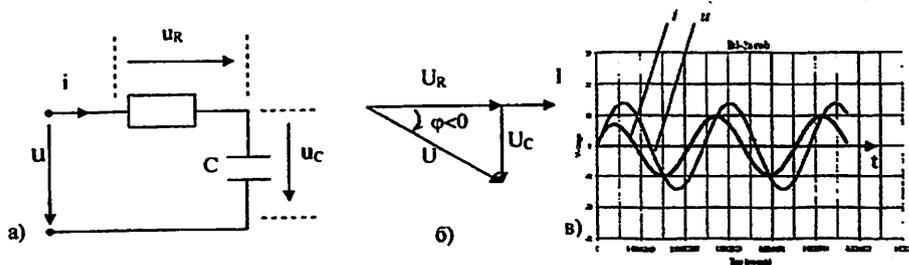


Рис.4.3. RC-цепь(а), векторная диаграмма напряжений и тока(б), временная диаграмма напряжения и тока на входе RC-цепи(в)

При установившемся гармоническом режиме напряжение на входе RC-цепи (рис.4.3,а) $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ (4.13)

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

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

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

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

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

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

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

Из (4.16) определяем амплитуду и начальную фазу тока

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

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

$$\phi = \psi_u - \psi_i.$$

Разделив амплитудные значения напряжений (токов) на $\sqrt{2}$, получим соответствующие выражения для действующих значений напряжений

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

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

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

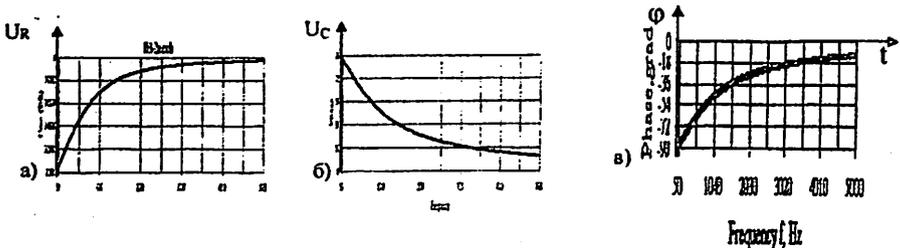


Рис. 4.4. Графики $U_R(\omega)$, $U_C(\omega)$ и $\phi(\omega)$

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

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

Необходимо учесть, что в формуле (4.23) для RL-цепи реактивное сопротивление $X = X_L = \omega L$. (4.24)

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

2. Предварительный расчёт

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

Таблица 4.1

Исходные данные для предварительного расчёта и эксперимента

Вариант N	L, мГн	C, нФ	Вариант N	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		40
7	40		17	90	
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 $\varphi(f/f_r)$, аналогичные рис.4.2.

Таблица 4.2

Результаты предварительного расчёта и измерений для RL -схемы

f	f, кГц	Предварительный расчёт			Измерения		
		$U_R, В$	$U_L, В$	$\varphi, град$	$U_R, В$	$U_L, В$	$\varphi, град$
$0,2f_r$							
$0,5f_r$							
$1,0f_r$							
$1,5f_r$							
$2,0f_r$							
$4,0f_r$							
$10f_r$							
U = ..., R = ..., L = ..., f_r = ...; $P(f_r)$ = ...; $Q(f_r)$ = ...; $S(f_r)$ = ...							

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
0,2 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							

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

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.

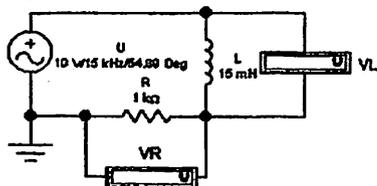


Рис.4.5. Схема исследования RL-цепи

те.

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.

Сдвиг фаз между входным напряжением и током φ RL-цепи может быть

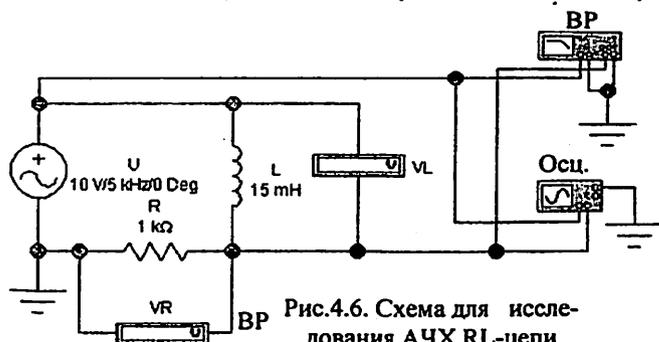


Рис.4.6. Схема для исследования АЧХ RL-цепи

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. Раскроем переднюю панель BP.

После соответствующей настройки, на экране BP появится изображение ФЧХ $\varphi(f) = \psi_u - \psi_i$, 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 (Осц.). 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

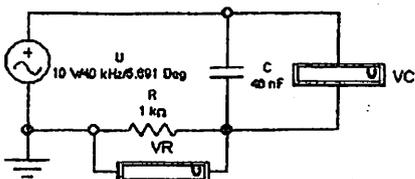


Рис.4.7. Схема измерения АЧХ RC-цепи

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 RC-цепи загружается файл Lb4_2 в результате чего на рабочем поле EWB появляется схема рис.4.6. Заменить L на C. Установить значения па-

раметров 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
$$\underline{I} = (5+j5) \text{ А} \quad \text{и} \quad \underline{U} = (20-j20) \text{ В}.$$
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 $\underline{U} = (200 - j100) \text{ В}$.
Определить активную, реактивную и полную мощность.

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

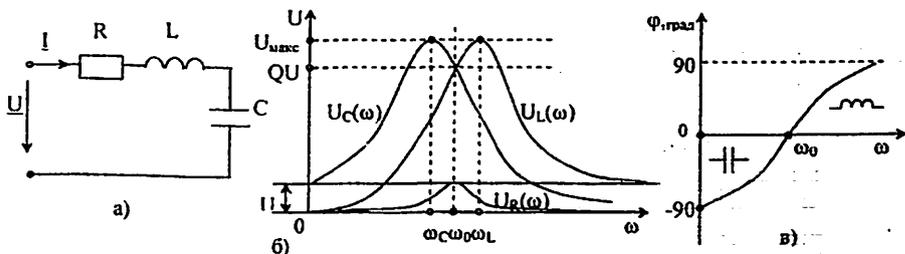


Рис. 5.1. Схема последовательного колебательного контура (а), его АЧХ (б) и ФЧХ (в)

второго закона Кирхгофа для комплексных действующих значений напряжений можно записать

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

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)

комплексное сопротивление контура;

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

- полное сопротивление контура;

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

- 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

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

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 $\underline{Z}_0 = R$, а ток в контуре - максимален $I_0 = U/R$.

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

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

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)

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

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

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

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

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

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.

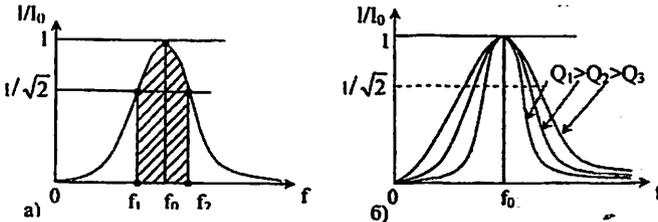


Рис.5.2. К определению ПП колебательного контура (а), зависимость формы резонансной кривой от добротности (б)

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 $f_2 - f_1$.

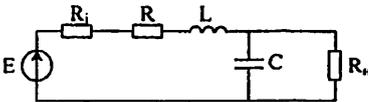


Рис. 5.3. Схема подключения колебательного контура к источнику и нагрузке

Добротность контура снижает внутреннее сопротивление источника (генератора) сигнала R_i (рис. 5.3) и сопротивление нагрузки R_n , подключённая параллельно ёмкости (рис.5.3), либо индуктивности. При $R_n \gg r$ 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.5.1.а) (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

$L = \dots\dots\dots;$	$C = \dots\dots\dots;$	$R = \dots\dots\dots;$
$f_0 = \dots\dots\dots;$	$\rho = \dots\dots\dots;$	$Q = \dots\dots\dots;$
$D = \dots\dots\dots;$	$S_{\Delta} = f_2 - f_1 = \dots\dots\dots;$	
При $R_i = 0,5R$; $R_n = 50 \text{ кОм}$; $Q_2 = \dots\dots\dots;$ $d_2 = \dots\dots\dots;$ $S_{\Delta 2} = \dots\dots\dots$		

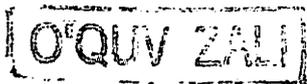
2.2. Рассчитать эквивалентную добротность Q_2 , затухание d_2 и абсолютную ширину ПП $S_{\Delta 2}$ колебательного контура, если он подключен к генератору с внутренним сопротивлением $R_i = 0,5R$ и параллельно емкости подключена нагрузка с сопротивлением $R_n = 50 \text{ кОм}$ (см. рис.5.2). Результаты 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

№	f	Результаты измерений			Предварительный расчёт					
		f кГц	U_R/U	U_L/U	U_C/U	φ град.	U_R/U	U_L/U	U_C/U	φ 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	$f_0 + 3\Delta f$									



3. Выполнение работы

3.1. Измерение АЧХ и ФЧХ RLC-цепи (рис. 5.1,а) с помощью вольтметров

Загрузить систему EWB. Раскрыть папку LbTECru. Загрузить файл Lb5-1, при этом на дисплее монитора ПК появляется схема рис.5.4. Выполнить пере

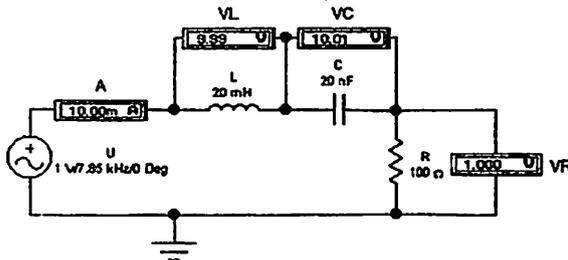


Рис.5.4. Схема исследования последовательного RLC-контура

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 сопротивлении U_R и ток в цепи I .

Сдвиг фаз между входным напряжением и током рассчитать по формуле $\varphi = \arctg((U_L - U_C)/U_R)$. Результаты измерений занести в табл.5.3.

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

Используя ИЧХ Vode 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

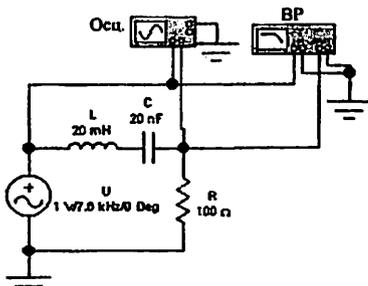


Рис.5.5. Схема для измерения АЧХ, ФЧХ и мгновенных значений $u(t)$ и $u_R(t)$

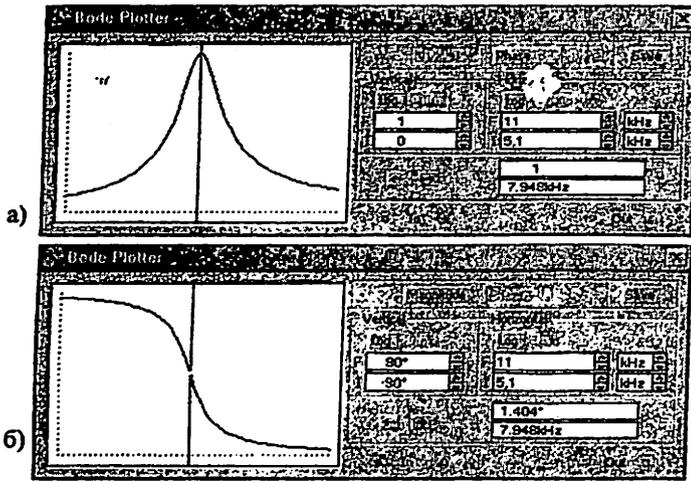


Рис.5.6. Передняя панель ИЧХ Bode Plotter с АЧХ (а) и с ФЧХ (б)

Magnitude) (рис.5.6) или ФЧХ (при нажатой кнопке **Phase**).(рис.5.7). . Установив курсор мышки на левой границе экрана ВР, 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.

Далее, сдвигая вертикальную визирную линию вдоль оси частот и, устанавли-

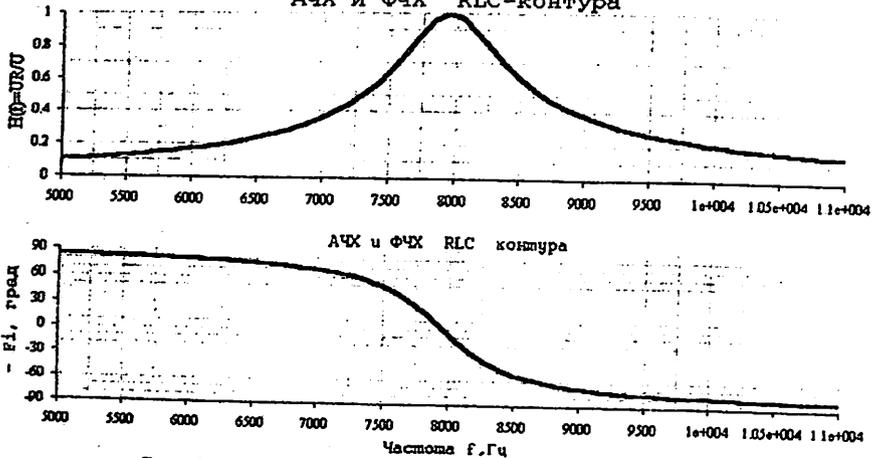


Рис. 5.7. Изображения АЧХ и ФЧХ RLC контура, полученные при $R_i=50 \text{ Ом}$, $R_H=50 \text{ кОм}$

вая 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.

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

Произвести загрузку файла Lb5_3, при этом на экране монитора появится схема, приведённая на рис.5.8.

Установить параметры RLC-цепи согласно требуемого варианта (см. табл. 5.1, табл. 5.2). Измерить АЧХ $H_R(f) = U_R(f)/U$ и ФЧХ $\varphi_3(f) = \psi_{u2} - \psi_{u1}$. Методика измерения АЧХ и ФЧХ, аналогична п.4.2. После соответствующей настройки Bode Plotter можно получить изображения АЧХ и ФЧХ, представленные на рис. 5.9. Результаты измерений заносится в табл.5.3.

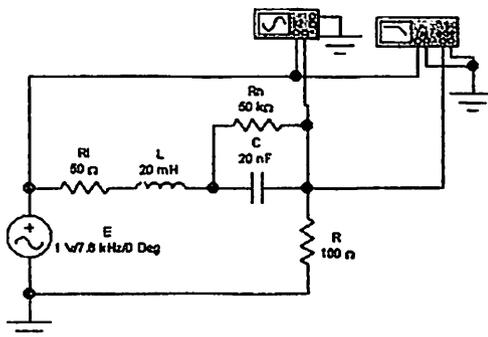


Рис.5.8. Схема для исследования влияния внутреннего сопротивления генератора R_1 и нагрузки R_n на АЧХ и ФЧХ RLC контура

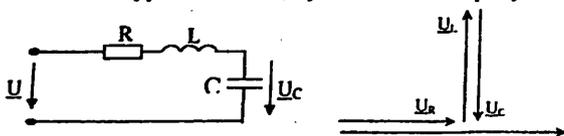
Для измерения мгновенных значений входного напряжения $u(t)$ и напряжения на сопротивлении $u_R(t)$ закрывается передняя панель ВР и открывается передняя панель двухканального осциллографа «Осц.». После установки частоты генератора $f = f_T$ срисовать осциллограммы $u(t)$ и $u_R(t)$, которые имеют вид, приведённый на рис.5.1,в.

4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Схемы измерения 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.

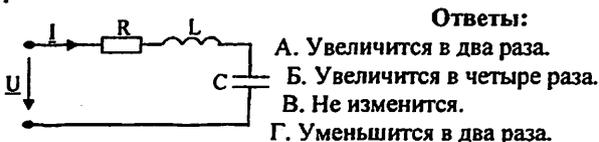
4. Контрольные вопросы и задачи

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 2 раза?

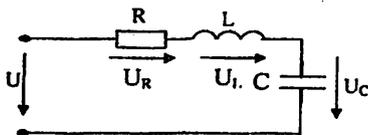
Ответы: А. Не изменится. Б. Увеличится в 2 раза.
 В. Уменьшится в 2 раза. Г. Увеличится в 4 раза.

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 3 раза.
 В. Уменьшится в 3 раза. Г. Увеличится в 9 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. ИСЛЕДОВАНИЕ 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 -ой гармоники,

E_{km} , ψ_k - амплитуда и начальная фаза ЭДС k -ой гармоники, которые определяются 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).

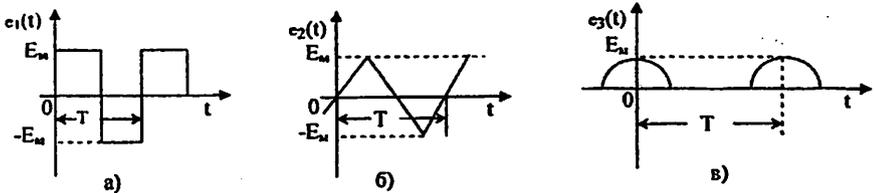


Рис. 6.1. Формы сигналов на входе ЭЦ

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

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 $I_{km} = E_{km}/Z_k$,

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

$x_k = kx_1$; $x_k = -x_c/k$ - реактивное сопротивление RL и RC-цепи на k -ой гармонике; $x_1 = \omega_1 L$; $x_c = 1/(\omega_1 C)$ - индуктивное и ёмкостное сопротивление RL и RC-цепи на первой гармонике.

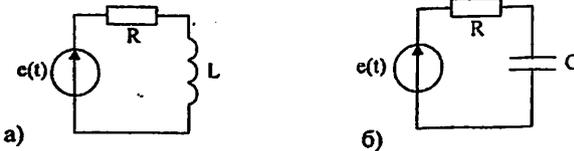


Рис. 6.2. Исследуемые RL- и RC-цепи

Амплитудные значения напряжений на элементах цепи (рис. 6.2) k -ой гармоники: $U_{Rkm} = R I_{km}$; $U_{Lkm} = kx_L I_{km}$; $U_{Ckm} = (x_c/k) I_{km}$.

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_n , равного отношению действующего значения напряжения первой гармоники к действующему значению напряжений периодического напряжения

$$k_n = E_1/E \quad (6.12)$$

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

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

2. 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_r по формулам (6.12), (6.13). Результаты всех расчётов занести в табл. 6.2, 6.3.

Таблица 6.2
Результаты предварительного расчёта RL- и RC-цепи

Схе.: рис. 6.2.; сигнал рис. 6.1.; $f = \dots$ кГц; $E = 5$ В;
 $E_m = \dots$ В; $R = \dots$ В; $L = \dots$ мГн; ($C = \dots$ нФ.)

к	$k\omega_1$ 1/c	$E_{км}$ В	X_k Ом	Z_k Ом	$I_{км}$ А	$U_{Rm}^{(к)}$ В	$U_{Lm}^{(к)}$ В

Таблица 6.3
Действующие значения напряжения, ток и мощности

	Предварительный расчёт	Результаты измерений	Относительная погрешность
$U_R, В$			
$U_L, В$			
$U_C, В$			
$I, А$			
$P = \dots$ Вт; $Q = \dots$ ВАр; $S = \dots$ ВА; $k_u = \dots$; $k_r = \dots$			

3. Выполнение работы

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

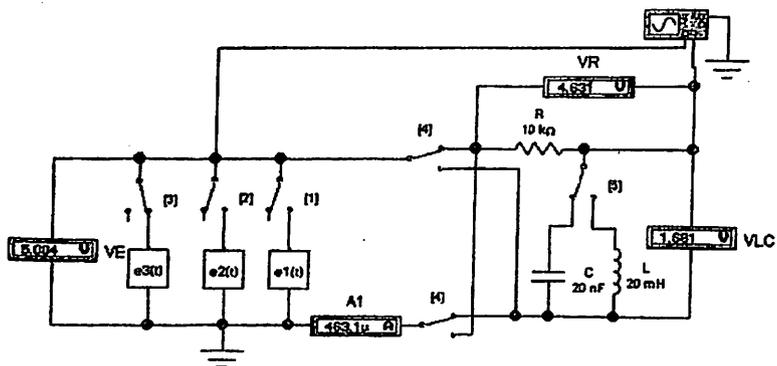


Рис. 6.3. Схема для исследования RL- и RC-цепи при воздействии периодической несинусоидальной ЭДС $e(t)$

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 $E - V_1$, 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 клавиатуре 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 изображения соответствующих напряжений.

3. 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) $I=8,83$ А; Б) $I=8$ А; В) $I=4$ А; Г) $I=5$ 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: $I_0=1,5$ А; $I_1=2,3$ А; $I_2=1,2$ 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;

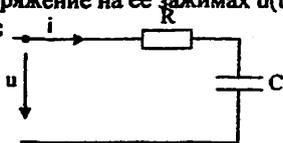
В) $i(t)=1,5 + 2,3 \sin 2\omega_1 t + 1,2 \sin 4\omega_1 t$ А.

5.6. Укажите цепь, через которую протекает ток,

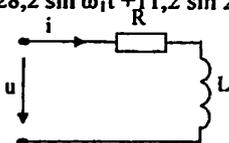
$$i(t) = 2 \sin(\omega_1 t - 45^\circ) + 0,5 \sin(2\omega_1 t - 63^\circ) \text{ А},$$

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

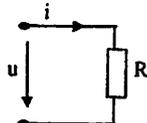
Ответы:



А)



Б)



В)

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

Ответы: А) $P=2,5$ Вт; Б) $P=1,5$ Вт; В) $P=6,75$ 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, RC и RLC-ЦЕПЯХ

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

7.1. Теоретические сведения

7.1.1. Переходные процессы в последовательной RC-цепи

Переходной 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)..

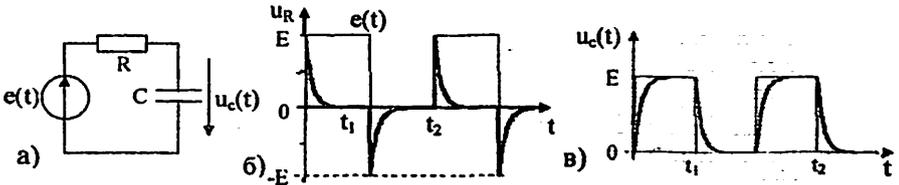


Рис. 7.1. Исследуемая RC-цепь (а), входное напряжение $e(t)$, напряжение на сопротивлении $u_R(t)$, ёмкости $u_C(t)$ (в)

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

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

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

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

7.1.2. Переходные процессы в последовательной RL-цепи

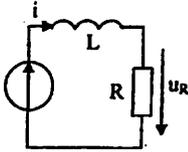


Рис.7.2. Цепь RL

При включении цепи RL (рис. 7.2) на постоянное напряжение $e(t) = E$. (в интервале $0 \leq t \leq t_1$) (рис.7.1.б) переходной процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$E = u_R + u_L = Ri + Ldi/dt, \quad (7.4)$$

которому соответствует характеристическое уравнение $R + Lp = 0$

и его корень $p_1 = -R/L = -1/\tau$, где $\tau = L/R$ - постоянная времени RL - цепи.

Дифуравнению (7.4) соответствует решение для переходного тока

$$i = E/R - (E/R) e^{-t/\tau}$$

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 $t_1 \leq t \leq t_2$, $E=0$) переходные 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 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 (7.6a) упрощаются

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

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.а).

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.

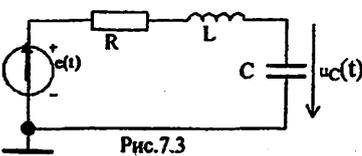


Рис.7.3

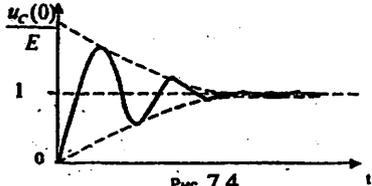


Рис. 7.4

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

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

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - 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	R, Ом	f, МГц	U _{вх} , В	U _{вых} , В
1	2	1		100	60		
2	4	2		90	70		
3	3	3		80	80		
4	2,5	4		70	90		
5	2	5		60	100		
6	1,5	6		50	60		
7	1,3	7		40	70		
8	1	8		30	80		
9	1,1	3		20	90		
10	5	2		10	100		
11	2	3		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 использовать $e(t) = E = 6$ В. Результаты расчёта занести в табл.7.2.

Таблица 7.2

Результаты предварительного расчёта и измерений

t	Схема	0	0,5τ	τ	1,5τ	2τ	4τ
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.

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.

Запуск развертки osc

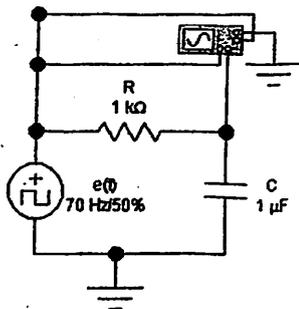


Рис.7.5

Для того, чтобы запуск развертки происходил в начале импульса, на осциллографе должна быть нажата левая кнопка . Чтобы запуск развертки 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/ Options/ Instruments/ Pause after each screen - отметить гптичкой). Для продолжения расчёта надо мышкой щелкнуть 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 – верхняя часть входного импульса с максимальным напряжением 6 В. По горизонтали – время t с масштабом $t_1=0,5$ мс/деление. По вертикали – напряжение с масштабом $u_1=2$ В/деление. Учитывая масштабы по горизонтали и вертикали можно приблизительно измерить зависимость $u_c(t)$ и заполнить таблицу экспериментальными данными (табл.7.2)

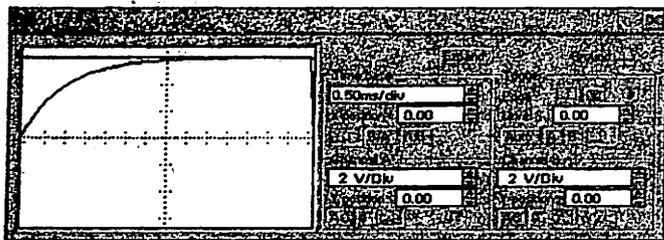


Рис.7.6

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.

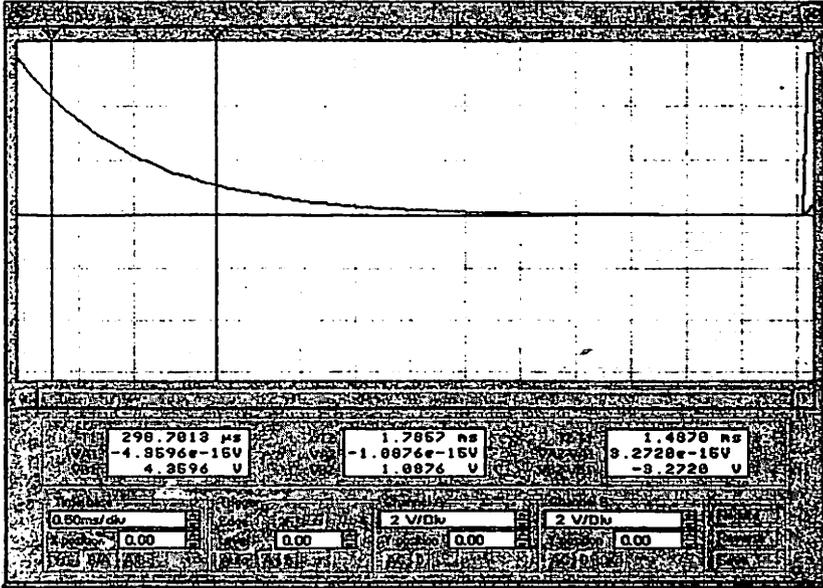


Рис.7.7

В левом окошке:

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

$VA1 = -4,3596$ 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;

$VA2 = -1,0876$ e-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 расчета 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 razvertid osc

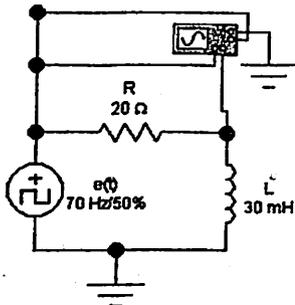


Рис.7.8

Загружается файл Lb 7.2, при этом на дисплее монитора ПК появляется схема, приведённая на рис.7.8. 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 $f = 1/8\tau$. После настройки передняя панель осциллографа может выглядеть так, как показано на рис. 7.9. На нём мы видим напряжение переходного процесса на индуктивности $u_L(t)$

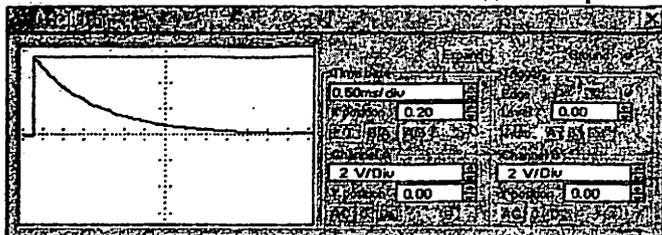


Рис.7.9

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.7.10. 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.

Zapusk razvertki osc

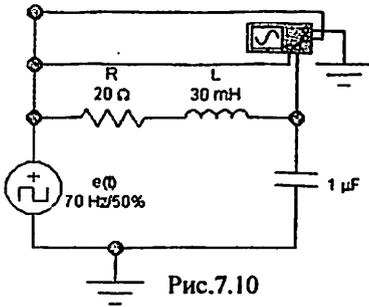


Рис.7.10

Устанавливается частота генератора
 $f = 1/8\tau$, где $\tau = 1/\delta$.

После настройки передняя панель осциллографа может выглядеть так, как показано на рис. 7.11. 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. 7.12.

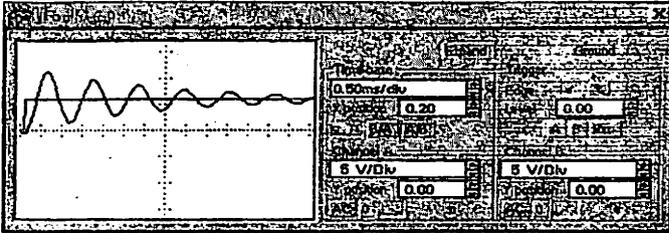


Рис.7.11

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

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

коэффициент затухания

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

и постоянную времени

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

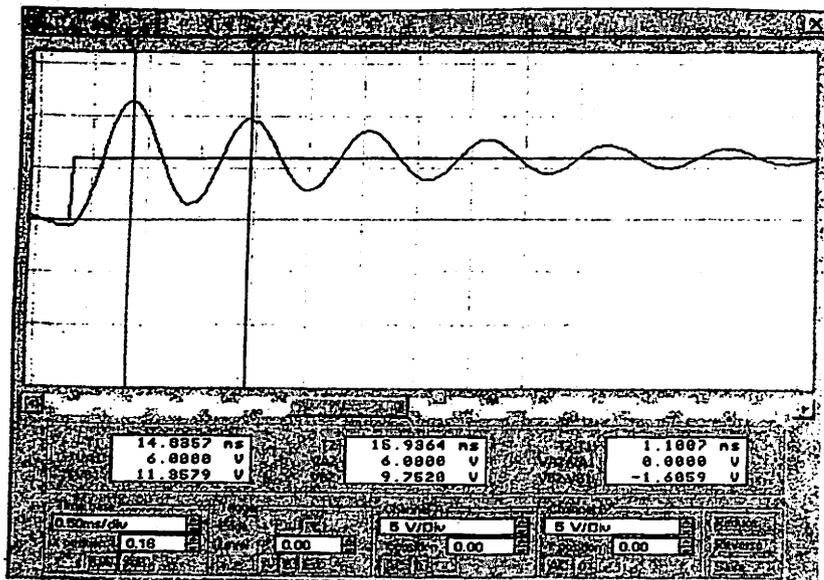


Рис. 7.12

4. Содержание отчёта

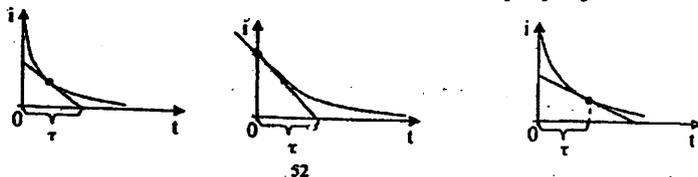
В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены:

- 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

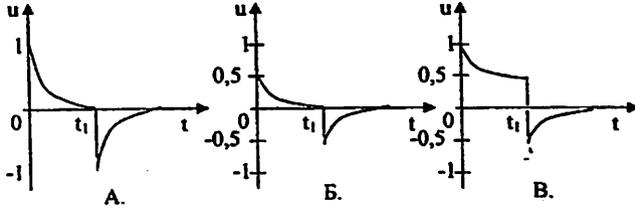
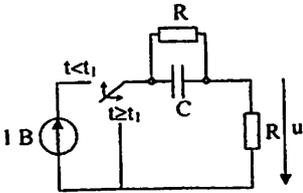
- 5.1. Постоянная времени цепи RL равна:
 Ответы: А. L/R ; Б. LR ; В. R/L ;
- 5.2. Постоянная времени цепи RC равна:
 Ответы: А. $1/(RC)$; Б. RC ; В. C/R ;
- 5.3. Графическое определение τ ведётся согласно рисунку:

Ответы:



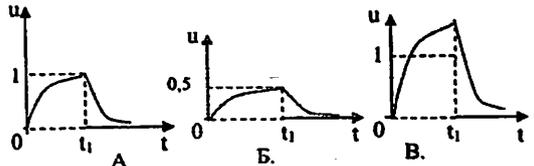
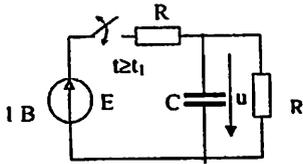
5.4. График переходного напряжения u на выходе цепи:

Ответы:

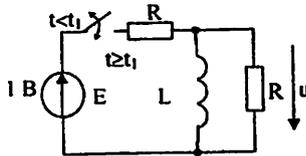


5.5. График переходного напряжения u на выходе цепи

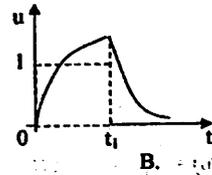
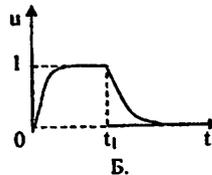
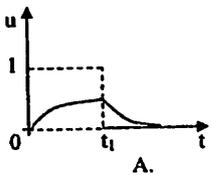
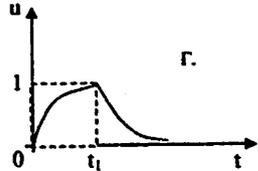
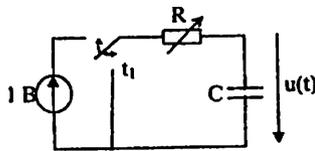
Ответы:



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



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



8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы - экспериментальное исследование на ПК пассивных и активных дифференцирующих электрических цепей при разных их параметрах и различной форме входных сигналов с помощью программы анализа электрических схем EWB.

1. Теоретические сведения

Дифференцирующими цепями (ДЦ) называют такие четырехполюсники, (рис.8.1,а) напряжение на выходе которых u_2 пропорционально производной от входного напряжения u_1 , т.е. $u_2 = \alpha(du_1/dt)$, где α - постоянный коэффициент.

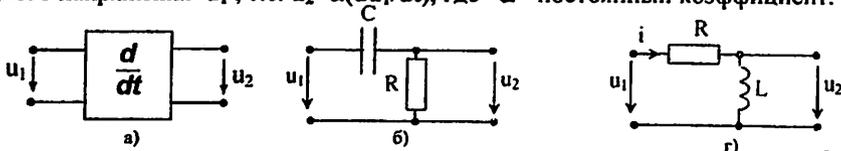


Рис. 8.1. Общее обозначения ДЦ (а), пассивная RC (б) и RL (в) ДЦ

Различают пассивные и активные ДЦ. Простейшие пассивные двухэлементные RC- и RL- цепи (рис. 8.1, в, г) при определенных условиях являются пассивными ДЦ. Наибольшее применение для приближенного дифференцирования напряжения находит RC-цепь (рис. 8.1, б), для которой:

$$u_1 = u_C + u_R = \frac{1}{C} \int i dt + Ri.$$

При $u_R \ll u_C$

$$u_1 \approx u_C = \frac{1}{C} \int i dt; \quad \frac{du_C}{dt} \approx \frac{i}{C} = \frac{i \cdot R}{RC} = \frac{u_R}{RC};$$

$$u_2 = u_R \approx RC \frac{du_C}{dt} = \tau \frac{du_C}{dt}, \quad (8.1)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени цепи.

Видно, что RC-цепь является дифференцирующей, когда $u_R \ll u_C$; при этом постоянная времени цепи много меньше длительности t_n сигналов ($\tau \ll t_n$).

При установившемся гармоническом режиме комплексная передаточная функция RC-цепи (рис. 8.1,б)

$$H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (8.2)$$

При $\omega RC \ll 1$; $\omega t \ll 1$; $\tau \ll 1/\omega$; $\tau \ll T$ комплексная передаточная функция

$$RC \text{ ДЦ} \quad H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} \approx j\omega RC = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (8.3)$$

где $H(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} \approx \omega RC = \omega \tau$ - АЧХ цепи; $\varphi(\omega) = \pi/2 = 90^\circ$ - ФЧХ цепи.

Недостатком пассивной RC-цепи является то, что для удовлетворительного дифференцирования требуется малая постоянная времени $\tau=RC$ и как следствие очень малое значение ёмкости C при больших частотах $\omega=2\pi f$.

Значительно меньшей погрешностью дифференцирования обладает активная ДЦ на операционном усилителе (ОУ) (рис. 8.2,а).

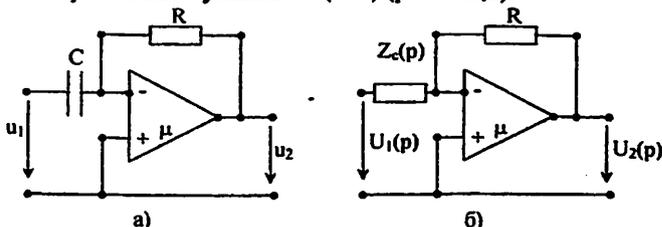


Рис. 8.2. Активная ДЦ на ОУ (а) и её операторная схема замещения (б)

Операторная передаточная функция получена из схемы замещения (рис.8.2,б).

$$H_a(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{-\mu \cdot Y_1}{Y_1 + (1+\mu)Y_2}$$

где μ - коэффициент усиления ОУ по направлению;

$Y_1=Cp$; $Y_2=G=1/R$ - операторные проводимости ветвей ДЦ.

$$H_a(p) = \frac{-\mu C \cdot p}{p + (1+\mu_0)G} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}$$

Характеристическое уравнение цепи (рис. 8.2,а): $F_2(p)=0$; $Cp + (1+\mu_0)G = 0$.

Корень характеристического уравнения:

$$p_1 = -G(1+\mu_0)/C = -(1+\mu_0)/RC.$$

Постоянная времени активной RC - ДЦ:

$$\tau_a = 1/|p_1| = RC/(1+\mu_0) = \tau/(1+\mu_0),$$

при $\mu \approx 10^8$ много меньше постоянной времени пассивной RC-цепи τ . Из (8.5) следует, что при $\mu \rightarrow \infty$ комплексная передаточная функция активной ДЦ (рис. 8.2,а)

$$H_a(j\omega) \approx -j\omega CR = -j\omega\tau$$

отличается от пассивной (8.3) лишь знаком «-», обусловленным использованием ОУ с инверсией.

Для определения формы сигнала на выходе ДЦ необходимо построить кривую, соответствующую производной по времени от входного сигнала. Для построения кривой выходного напряжения следует в ряде точек кривой входного напряжения провести касательные и построить кривые мгновенных значений, которые пропорциональны тангенсу угла наклона. Примеры кривых при разных значениях постоянной времени τ показаны на рис. 8.3.

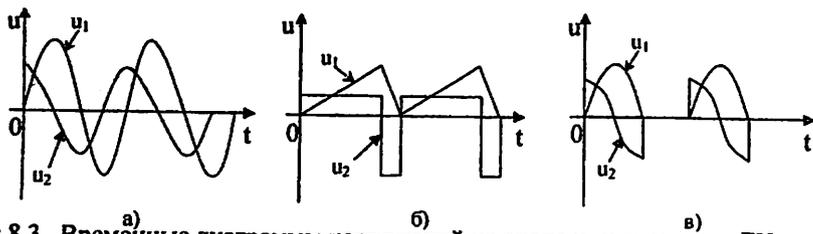


Рис.8.3. Временные диаграммы напряжений на входе u_1 и выходе u_2 ДЦ

На рис. 8.4 показаны напряжения на выходе u_2 пассивной ДЦ (рис. 8.1,б) при подаче на её вход напряжения u_1 в виде периодической последовательности однополярных прямоугольных импульсов и разных значениях постоянной времени цепи $\tau=RC$. Наибольшее применение в импульсной технике находят режимы работы, когда $\tau \ll t_n$ (см. рис. 8.4,в) и $\tau \gg t_n$ (см. рис. 8.4,д). В первом случае (рис. 8.4,в) ДЦ используется для преобразования прямоугольных импульсов в короткие биполярные импульсы. Во втором случае (рис. 8.4,д) ДЦ используется как разделительная цепь.

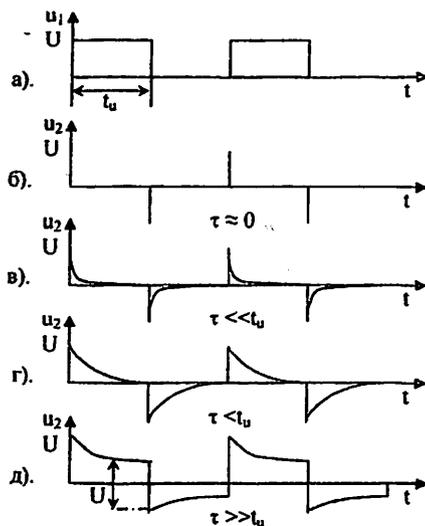


Рис. 8.4. Временные диаграммы напряжения на входе u_1 выходе u_2 ДЦ

2. Предварительный расчёт

2.1. По заданному варианту исходных данных (табл. 8.1) рассчитать:

а) постоянную времени $\tau = T/2 = 1/2f$, где $f = 2$ кГц;

б) сопротивление резистора $R = \tau/C$.

2.2. Нарисовать примерную форму напряжения на выходе идеальной и реальной ДЦ u_2 (рис. 8.2), если входное напряжение u_1 : а) синусоидальное;

б) пилообразное; в) периодическая последовательность однополярных прямоугольных импульсов (рис.8.4,а).

Таблица 8.1

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

3. Выполнение работы

3.1. Исследование пассивной дифференцирующей RC- цепи при гармоническом воздействии

Производится загрузка программы Electronics Workbench. Загружается файл Lb8_1.ewb, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис.8.5,а. В схеме устанавливают требуемые

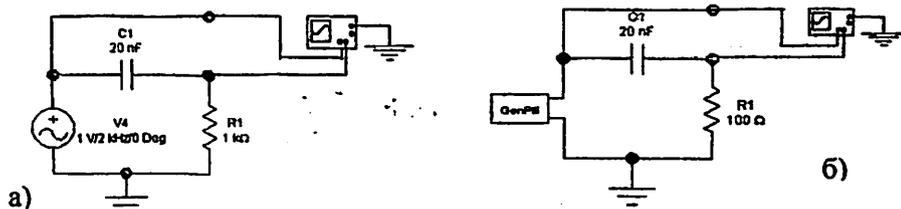


Рис.8.5. Исследование дифференцирующей RC- цепи: при гармоническом (а) и пилообразном (б) воздействии

параметры ёмкости C согласно таблице 8.1 и найденное в предварительном расчёте значение сопротивления R .

Раскрывают переднюю панель модели осциллографа путём быстрого двукратного щелчка левой клавишей мыши по пиктограмме осциллографа. Запускается процесс моделирования (эмуляции) и наблюдается результат моделирования на экране модели осциллографа. В момент, когда осциллограмма заполнит весь экран осциллографа, (по горизонтали) производят приостановку процесса моделирования путём щелчка левой клавишей мыши по значку Pause либо остановку процесса моделирования путём щелчка по значку [0-1]. При этом картинка на экране модели осциллографа останавливается и производится регулировка с помощью управляющих клавиш наилучшей картинке. Зарисовать осциллограммы напряжений на входе u_1 и выходе u_2 ДЦ.

Зарисовать осциллограммы выходных напряжений u_2 при уменьшении и увеличения постоянной времени T ДЦ путём уменьшения и увеличения значения сопротивления R в 2 раза.

3.2. Исследование пассивной дифференцирующей RC- цепи при воздействии на неё пилообразного напряжения

Для исследования пассивной дифференциальной RC-цепи (рис.8.1,б) при воздействии на неё напряжения пилообразной формы загружается файл Lb8_2.ewb, в результате чего на экране монитора ПК появится схема, приведённая на рис.8.6. Далее повторяются действия, согласно п.3.1.

3.3. Исследование пассивной дифференцирующей RC- цепи при воздействии на неё напряжения в виде периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов

Для исследования пассивной дифференциальной RC-цепи (рис.8.1,б) при воздействии на неё периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов (рис.8.4,а) загружается файл Lb8_3.ewb в результате чего на экране монитора ПК появится схема, приведённая на рис.8.6.

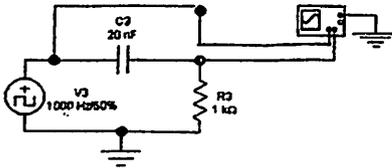


Рис.8.6. Исследование дифференцирующей RC- цепи при воздействии на неё положительных прямоугольных импульсов напряжения

Далее, при заданном значении ёмкости C и рассчитанном значении сопротивления R , выполняются исследования, аналогичные описанному в п.3.1.

3.4. Исследование пассивной дифференцирующей RC- цепи при воздействии на неё напряжения в виде периодической последовательности полусинусоидальных положительных импульсов

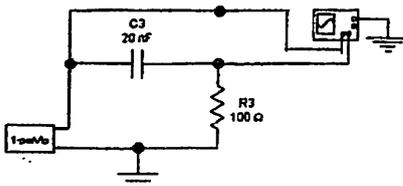


Рис.8.7. Исследование дифференцирующей RC- цепи при воздействии полусинусоидальных импульсов

Для исследования пассивной ДЦ (рис.8.1,а) при воздействии на неё периодической последовательности полусинусоидальных положительных импульсов загружается файл Lb8_4.ewb. В результате чего на экране осциллографа появится схема, приведённая на рис.8.7.

Далее, при заданном значении ёмкости C (см. табл. 8.1) и рассчитанном значении сопротивления R , выполняются исследования, аналогичные описанному в п.3.1.

3.5. Исследование активной дифференцирующей RC- цепи

Для исследования активной ДЦ (рис.8.2,а) при воздействии на неё периодической последовательности биполярных треугольных импульсов загружается файл Lb8_5.ewb. В результате чего на экране осциллографа появится схема активной ДЦ на основе операционного усилителя AR3 типа OPA111BM, приведённая на рис.8.8.

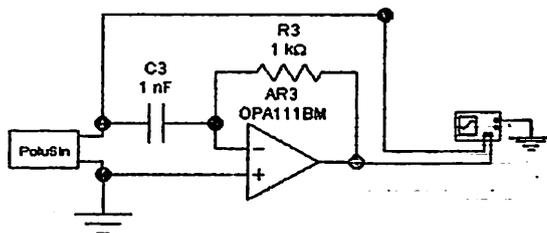


Рис.8.8. Схема исследования активной ДС на основе ОУ

Установите величины сопротивления R и ёмкости C в 20 раз большими, чем величины R и C , используемыми в п.3.1 в результате чего постоянная времени RC- цепи τ увеличится в 400 раз. При таком значительном увеличении постоянной времени цепи качество дифференцирования пассивной ДЦ становится очень низким и совершенно не приемлемым. Качество же дифференцирования активной ДЦ на ОУ при таком большом увеличении постоянной времени цепи RC практически не изменится и останется высоким.

4. Обработка результатов исследований

- 4.1. Сравните графики напряжений на входе u_1 и выходе u_2 ДЦ.
- 4.2. Рассчитать коэффициент качества дифференцирования для всех случаев

$$Q = T/\tau, \text{ где } T=1/f; f=2 \text{ кГц.}$$

Значение Q привести на всех графиках.

4. Содержание отчёта

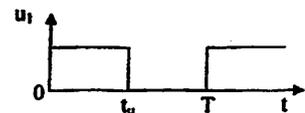
Отчёт должен содержать:

- 5.1. Название и цель работы.
- 5.2. Схемы исследуемых цепей и параметры элементов.
- 5.3. Результаты предварительного расчёта.
- 5.4. Графики входных и выходных напряжений исследуемых цепей.
- 5.5. Выводы по результатам расчётов и измерений.

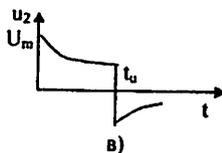
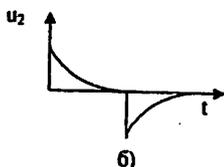
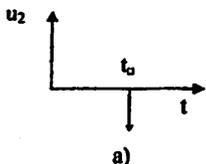
5. Контрольные вопросы и задачи

5.1. Входное напряжение (представлено последовательностью прямоугольных импульсов) u_1 подаётся на вход ДЦ. Установить соответствие между качеством дифференцирования и выходным сигналом u_2 .

Качество дифференцирования



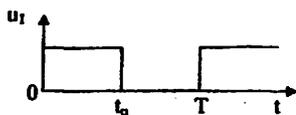
1. Идеальное
2. Удовлетворительное
3. Неудовлетворительное



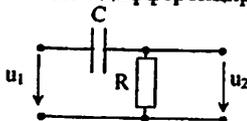
Ответы:

а) 1-а; 2-б; 3-в. б) 1-б; 2-в; 3-а. в) 1-в; 2-а; 3-б.

5.2. Значения τ ДЦ для удовлетворительного дифференцирования

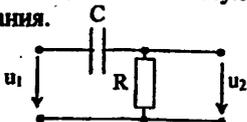


$t_a = 10 \text{ мс}$



Ответы: а) $\tau = 10 \text{ мс}$; б) $\tau = 100 \text{ мс}$; в) $\tau = 15 \text{ мс}$; г) $\tau = 0,1 \text{ мс}$; д) $\tau = 1 \text{ мс}$.

5.3. Укажите соотношение между величинами постоянной времени τ и длительностью входного импульса t_a для удовлетворительного дифференцирования.

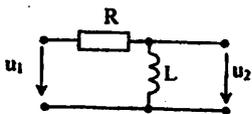


Ответы: а) $RC < t_a$; б) $RC \ll t_a$;
в) $RC = t_a$; г) $RC > t_a$; д) $RC \gg t_a$.

5.4. Укажите значение постоянной времени τ в RL цепи, чтобы цепь была дифференцирующей при подаче на вход последовательности прямоугольных импульсов с периодом $E = 5 \text{ мс}$ и скважностью $q = T/t_a = 2$.

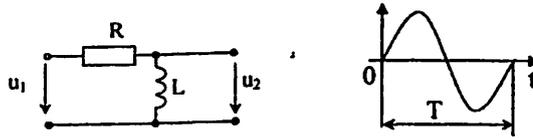
Ответы: а) $\tau = 2,5 \text{ мс}$; б) $\tau = 5 \text{ мс}$; в) $\tau = 10 \text{ мс}$; г) $\tau = 25 \text{ мс}$; д) $\tau = 2,5 \text{ мкс}$.

5.5. Укажите значение L в RL-цепи, чтобы цепь была дифференцирующей при подаче на вход П-образного периодического напряжения, если $R = 1 \text{ кОм}$.



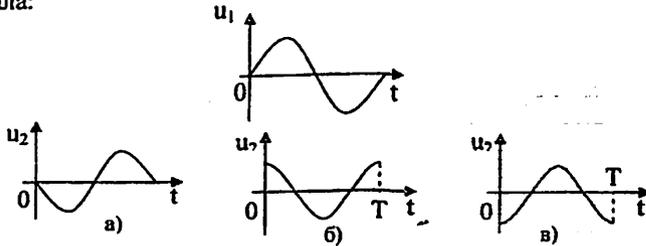
Ответы: а) 1 Гн; б) 10 Гн; в) 0,5 Гн; г) 10 мГн; д) 0,2 Гн.

- 5.6. Укажите значение R в RL -цепи, чтобы цепь была дифференцирующей при подаче на вход синусоидального напряжения с периодом $T=2$ мс, при $L=20$ мГн



Ответы: а) 1 Ом; б) 10 Ом; в) 1 кОм; г) 20 Ом; д) 15 Ом.

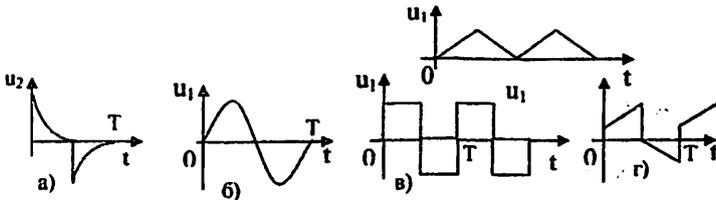
- 5.7. Определить выходное напряжение u_2 при идеальном дифференцировании данного сигнала:



- 5.8. При каком периоде T синусоидального напряжения на входе u_1 RC -цепь с параметрами $R=10$ кОм, $C=1$ нФ, получится наилучшее дифференцирование.

Ответы: а) $T=1$ мкс; б) $T=1$ мс; в) $T=10$ мкс; г) $T=5$ мкс; д) $T=1$ с.

- 5.9. Определить форму напряжения на выходе u_2 идеальной ДЦ, если на её входе действует напряжение u_1 .



9. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы - 1. Ознакомиться со схемами пассивных и активных интегрирующих цепей (ИЦ).

2. Исследовать на ПК форму сигналов на выходе пассивных и активных ИЦ при различных воздействиях на её входе и изменении параметров их элементов..

1. Теоретические сведения

В современных радиотехнических устройствах, импульсной технике и в аналоговых электронно-вычислительных машинах широко применяются ЛЭЦ, у которых напряжение на выходе пропорционально интегралу от входного напряжения

$$u_2 = K \int u_1(t) dt,$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Такие ЛЭЦ называются интегрирующими цепями (ИЦ).

Наиболее часто применяется пассивная ИЦ, состоящая из последовательно соединённых резистора и конденсатора (рис. 9.1,а). Выходное напряжение u_2 снимается с ёмкости C .

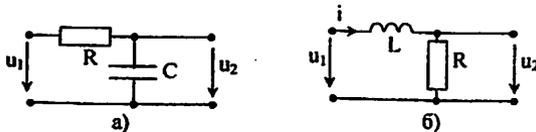


Рис. 9.1. Схемы пассивных интегрирующих цепей: а) RC-цепь, б) RL-цепь

Операторная передаточная функция по напряжению цепи (рис.9.1,а) имеет вид

$$H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{RCp+1} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

Характеристическое уравнение цепи

$$F_2(p)=0, \quad RCp+1=0$$

имеет один корень

$$p_1 = -1/RC.$$

Постоянная времени пассивной RC- цепи

$$\tau = 1/|p_1| = RC. \quad (9.1)$$

Для осуществления хорошего интегрирования необходимо выполнение условия

$$\tau = RC \gg t_u, \quad (9.2)$$

где t_u - длительность входного импульса.

Чем больше постоянная времени цепи $\tau = RC$ или $\tau = L/R$ (см. рис.9.1,б), тем точнее интегрирование. Однако постоянная времени не должна быть очень большой, поскольку при этом выходное напряжение u_2 будет слишком малой величиной.

Пример графика 2 напряжения u_2 на выходе идеальной ИЦ показан на рис.9.2,а.

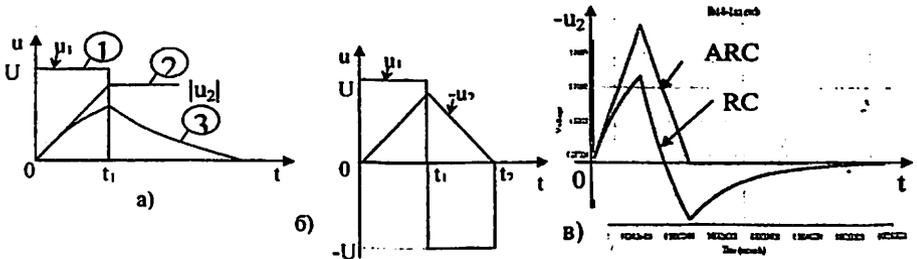


Рис. 9.2. Временные диаграммы напряжения на выходе активной интегрирующей цепи (кривые 2,а,б) и пассивной (кривая 3,а)

С момента появления на входе цепи прямоугольного импульса 1 (рис.9.2,а) начинается процесс заряда конденсатора C через резистор R . Так как сопротивление резистора R большое, то конденсатор заряжается медленно. По окончании входного импульса этот конденсатор медленно разряжается через резистор R (см. кривую 3 на рис. 9.2,а).

Операция интегрирования в комплексной форме соответствует умножению комплексного входного напряжения $U_1(j\omega)$ на множитель $1/j\omega$. Поэтому интегрирующим будет любой четырёхполюсник, в котором выполняется условие

$$U_2(j\omega) = (1/j\omega)U_1(j\omega)$$

или, что одно и то же

$$H(j\omega) = U_2(j\omega)/U_1(j\omega) = 1/j\omega = H(\omega) e^{j\theta(\omega)},$$

откуда

$$H(\omega) = 1/\omega.$$

Для цепи рис. 9.1,а, с учётом формулы (9.1).

$$H(j\omega) = H(p) \Big|_{p=j\omega} = 1/(1+j\omega RC) = H(\omega) e^{j\theta(\omega)}. \quad (9.3)$$

Очевидно, что в данной цепи АЧХ $H(\omega) \approx 1/\omega$ в том случае, если выполняется неравенство

$$\omega RC \gg 1,$$

$$\text{или } f \gg 1/2\pi RC = 1/2\pi\tau.$$

На практике цепь считают интегрирующей в диапазоне частот f , в котором выполняется условие

$$f \geq (5+10)/2\pi\tau \approx 1/\tau = 1/RC. \quad (9.4)$$

Из последнего условия (9.4) следует, при заданных значениях C и f для достижения удовлетворительного интегрирования пассивной RC-цепи, требуемое значение сопротивления R и постоянной времени τ определяются по формулам

$$R=1/fC; \quad \tau=1/f. \quad (9.5)$$

ИЦ применяют для получения на выходе сигналов, длительность которых больше, чем у входных, а крутизна фронтов меньше. Такие цепи выполняют разнообразные функции, например, позволяют уменьшить воздействие импульсных помех, преобразуют сигналы, отличающиеся по длительности, в сигналы, отличающиеся по амплитуде и т.д.

При воздействии коротких импульсов конденсатор не успевает полностью зарядиться, а при воздействии длительного – успевает, за счёт чего возникает разница в напряжениях на выходе цепи (рис. 9.3).



Рис. 9.3. Процесс выделения огибающей амплитудно-модулированных прямоугольных импульсов с помощью ИЦ (рис. 9.1,а)

В связи с тем, что пассивные ИЦ (рис.9.1) имеют малую точность интегрирования, на практике в аналоговой вычислительной технике применяют активные интегрирующие цепи (АИЦ), выполняемые на основе инвертирующего операционного усилителя (ОУ) и RC-цепи. Упрощённая принципиальная схема АИЦ на инвертирующем ОУ приведена на рис.9.4

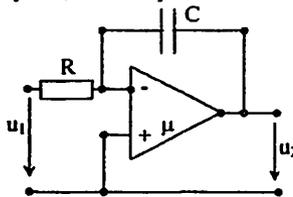


Рис. 9.4. Схема активной интегрирующей цепи на ОУ.

Передаточная функция АИЦ интегратора (рис.9.4) имеет вид

$$H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{-\mu}{(1+\mu)RCp+1} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

где μ - коэффициент усиления ОУ по напряжению

Характеристическое уравнение АИЦ (рис.9.4)

$$F_2(p)=0, \quad \text{т.е.} \quad (1+\mu)RCp+1=0$$

имеет один корень

$$p_1 = -1/(1+\mu)RC = -1/(1+\mu)\tau \quad \text{и при } \mu \gg 1,$$

$$p_1 \approx 1/\mu\tau. \quad (9.6)$$

Видно, что применение ОУ оказалось эквивалентным увеличению постоянной времени τ в μ раз

$$\tau_a = 1/|p_1| \approx \mu\tau. \quad (9.7)$$

А так как в ОУ значение μ составляет несколько сотен тысяч единиц, то интервал времени, в котором с той же точностью, как и в пассивной ИЦ, осуществляется интегрирование, существенно увеличивается.

Напряжение на выходе такой АИЦ определяется выражением

$$u_2 = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_1(t) dt + u_C(0).$$

Постоянная составляющая напряжения на ёмкости $u_C(0)$ определяет начальное напряжение на ёмкости, т.е. в момент времени ($t=0$). С помощью специальных мер можно реализовать любые начальные условия. В дальнейшем будем считать $u_C(0)=0$. Знак минус перед интегралом обусловлен использованием инвертирующего ОУ.

Если входное напряжение постоянно $u_1(t)=U=\text{const}$, то изменение выходного сигнала описывается формулой

$$u_2 = -Ut/(RC) = -Uv\tau, \quad (9.8)$$

т.е. выходной сигнал линейно возрастает со временем от нулевого значения (см. рис.9.2,а, график 3).

После окончания импульса постоянного напряжения $u_1=U$ (в момент $t=t_1$), когда напряжение на входе интегратора становится равным нулю ($u_1=0$) напряжение на выходе АИЦ-интегратора (рис.9.4) на этом интервале ($t \geq t_1$) будет практически постоянным (см. рис.9.2,а, кривая 3).

Если на входе АИЦ-интегратора действует напряжение u_1 в виде последовательно следующих один за другим двух одинаковых импульсов, из которых первый положительный, а второй отрицательный (см. рис.9.2,б), то напряжение на выходе АИЦ интегратора u_2 будет иметь форму треугольника (рис.9.2,б). Поэтому, рассмотренная схема АИЦ-интегратора оказывается пригодной для формирования линейно нарастающего, линейно спадающего или пилообразного напряжений.

2. Предварительный расчёт

2.1. При заданном значении ёмкости C при $f=2$ кГц (см. табл.9.1) гармонического напряжения ($U=2$ В) на входе u_1 рассчитать постоянную времени τ и значение сопротивления R пассивной RC- цепи (рис. 9.1,а); при которой обеспечивается условие интегрирования (9.5)

Таблица 9.1

Исходные данные для предварительного расчёта и моделирования

Вариант №	1	2	3	4	5	6	8	8	9	10
С, нФ	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Вариант №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
С, нФ	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40

2.2. Рассчитать постоянную времени τ_n АИЦ при коэффициенте усиления $OU \mu=500\ 000$ и таких же значениях параметров R и C , которые использовались в пассивной RC ИЦ (см. п.2.1.).

2.3. Рассчитать напряжение $u_2(t)$ на выходе пассивной (рис.9.1,а) и АИЦ (рис.9.4) при воздействии на них одиночного прямоугольного импульса с амплитудой $U=5\ В$ и длительностью $t_n=100\ \mu\text{с}$.

В интервале $0 \leq t \leq t_n$ напряжение на выходе пассивной RC-цепи (рис. 9.1,а) рассчитывается по формуле

$$u_2 = U(1 - e^{-t/\tau}), \quad (9.9)$$

а на выходе активной RC- цепи (рис. 9.3) по формуле

$$u_2 \approx - U t / \tau. \quad (9.10)$$

При $t > t_n$ напряжение на выходе пассивной RC-цепи рассчитывается по формуле

$$u_2(t) = U \left(1 - e^{-t_n/\tau} \right) \cdot e^{-(t-t_n)/\tau}. \quad (9.11)$$

Напряжение на выходе активной цепи рассчитывается по формуле

$$u_2(t) \approx - U t_n / \tau = \text{const}. \quad (9.12)$$

Результаты расчёта занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1.

Результаты предварительного расчёта

t		0	0,2 t _n	0,4 t _n	0,6 t _n	t _n	1,2 t _n	1,4 t _n	1,6 t _n	2 t _n
t, мкс		0	20	40	60	100	120	80	160	200
u ₂ , В (рис.9.1,а)	Рас.									
	Изм									
u ₂ , В (рис.9.4)	Рас.									
	Изм									

По результатам расчёта (см. табл. 9.1) построить графики выходного напряжения $u_2(t)$ для пассивной (рис.9.1,а) и активной (рис.9.4) интегрирующих RC- цепей.

3. Выполнение работы

3.1. Исследование пассивной интегрирующей RC- цепи при гармоническом воздействии

Производится загрузка программы Electronics Workbench.

Загружается файл Lb9-1.ewb, при этом на дисплее монитора ПЭВМ появляется схема, приведённая на рис.9.5,а. В схеме устанавливают требуемые параметры ёмкости C согласно табл. 9.1 и найденное в предварительном расчёте значение сопротивления R .

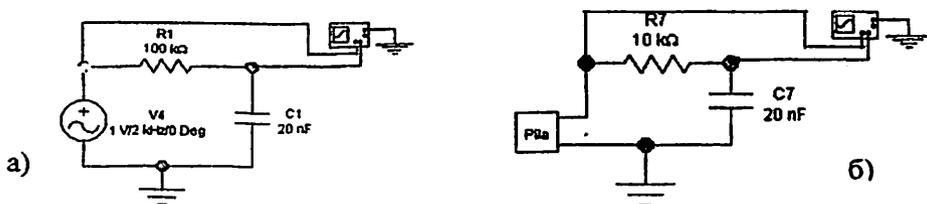


Рис.9.5. Исследование интегрирующей RC-цепи: при гармоническом (а) и пилообразном (б) воздействии

Раскрывают переднюю панель модели осциллографа путём быстрого двукратного щелчка левой клавишей мыши по пиктограмме осциллографа. Запускается процесс моделирования (эмуляции) и наблюдается результат моделирования на экране модели осциллографа. В момент, когда осциллограмма заполнит весь экран осциллографа, (по горизонтали) производят приостановку процесса моделирования путём щелчка левой клавишей мыши по значку **Pause**, либо остановку процесса моделирования путём щелчка по значку **[0-1]**. При этом картинка на экране модели осциллографа останавливается и производится регулировка с помощью управляющих клавиш наилучшей картинке. Зарисовать осциллограммы напряжений на входе u_1 и выходе u_2 ИЦ.

Зарисовать осциллограммы выходных напряжений u_2 при уменьшении и увеличении постоянной времени τ ИЦ путём уменьшения и увеличении значения сопротивления R в 10 раз.

3.2. Исследование пассивной интегрирующей RC-цепи при воздействии на неё пилообразного напряжения

Для исследования пассивной интегрирующей RC-цепи (рис.9.1,б) при воздействии на неё напряжения пилообразной формы загружается файл **Lb9-2.ewb** в результате чего на экране монитора ПК появится схема, приведённая на рис.9.6. Далее повторяются действия, согласно п.3.1.

3.3. Исследование пассивной интегрирующей RC-цепи при воздействии на неё напряжения в виде периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов

Для исследования пассивной дифференциальной RC-цепи (рис.9.1,б) при воздействии на неё периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов (рис.9.4,а) загружается файл **Lb9_3.ewb** в результате чего на экране монитора ПК появится схема, приведённая на рис.9.6.

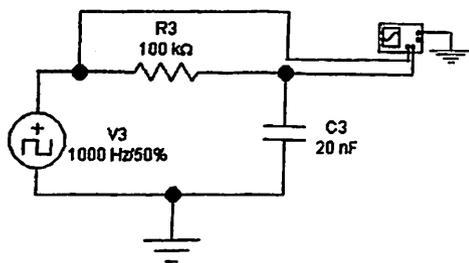


Рис.9.6. Исследование интегрирующей RC- цепи при воздействии на неё периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов напряжения

Далее, при заданном значении ёмкости C и рассчитанном значении сопротивления R , выполняются исследования, аналогичные описанному в п.3.1.

3.4. Исследование пассивной интегрирующей RC- цепи при воздействии на неё напряжения в виде периодической последовательности полусинусоидальных положительных импульсов

Для исследования пассивной ИЦ (рис.9.1,а) при воздействии на неё периодической последовательности полусинусоидальных положительных импульсов загружается файл Lb9-4.ewb. В результате чего на экране осциллографа появится схема, приведённая на рис.9.7.

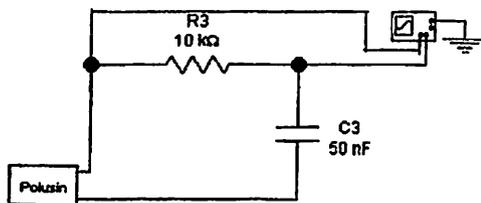


Рис.9.7. Исследование интегрирующей RC- цепи: при воздействии полусинусоидальных импульсов

Далее, при заданном значении ёмкости C (см. табл. 9.1) и рассчитанном значении сопротивления R , выполняются исследования, аналогичные описанному в п.3.1.

3.5. Исследование пассивной и активной ИЦ при воздействии на них положительного одиночного прямоугольного импульса

Для исследования пассивной ИЦ (рис.9.1,а) при воздействии на неё положительного единичного прямоугольного импульса загружается файл Lb9-5.ewb. В результате чего на экране осциллографа появится схема, приведённая на рис.9.7.

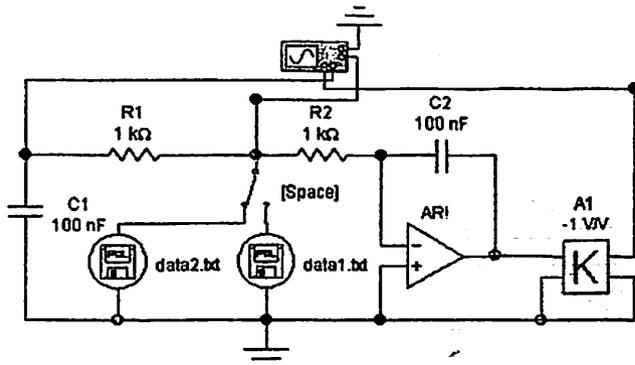


Рис.9.7. Исследование активной и пассивной ИЦ при воздействии на них положительного единичного прямоугольного импульса

В схеме (рис.9.7) содержатся два источника напряжения, обозначенные data1.txt и data2.txt.

Первый источник вырабатывает одиночный положительный прямоугольный импульс напряжения с амплитудой $U=5$ В и длительностью $t_d=100$ мкс (см. рис.9.2,а,1).

Второй – положительный и отрицательный импульс (см. рис.9.2,б) с той же амплитудой и длительностью, что и на выходе первого источника.

Подключение первого или второго источника к цепи осуществляется путём нажатия на клавишу [space], т.е. [пробел].

Схема (рис.9.7) содержит пассивную ИЦ (R_1, C_1) и активную ИЦ (R_2, C_2 и инверсный ОУ АRI). Для удобства сравнения результатов интегрирования пассивной и активной ИЦ на выходе последней поставлен инвертирующий усилитель А1 с коэффициентом усиления напряжения $K=-1$.

Напряжение с выхода пассивной ИЦ подводится к А-входу осциллографа, напряжение с выхода активной ИЦ подводится к В-входу осциллографа в результате чего на экране модели осциллографа можно наблюдать одновременно напряжение на выходе пассивной и активной ИЦ.

Для получения однократного запуска развёртки осциллографа в момент начала импульса используется внешний ждущий режим запуска развёртки осциллографа.

Подключить к исследуемым ИЦ первый источник напряжения {data1.txt}. После установки требуемых параметров пассивной и активной ИЦ измерить напряжения на выходе $u_2(t)$ пассивной и активной ИЦ для моментов

времени, в которых был выполнен предварительный расчет. Результаты измерений занести в табл.9.1.

Подключить к исследуемым ИЦ второй источник напряжений {data2.txt}. Аккуратно срисовать с экрана модели осциллографа напряжения на выходе $u_2(t)$ пассивной и активной ИЦ.

4. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Исследуемые схемы интегрирующих цепей.
- 4.3. Результаты предварительного расчёта, представленные в виде табл. 9.1 и графики $u_2(t)$.
- 4.4. Схемы измерений.
- 4.5. Графики напряжений на входе $u_1(t)$ и на выходе $u_2(t)$ интегрирующих цепей с указанием её параметров и постоянной времени для каждого случая.
- 4.6. Выводы по результатам выполнения работы.

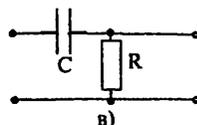
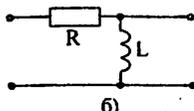
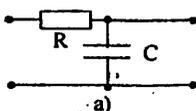
5. Контрольные вопросы и задачи

- 5.1. Что называется интегрирующей цепью?
- 5.2. Какой вид имеют простейшие пассивные интегрирующие цепи?
- 5.3. При каком условии пассивные RL и RC-цепи будут выполнять интегрирование?
- 5.4. В каких случаях применяются пассивные интегрирующие цепи?
- 5.5. Какова схема активной RC интегрирующей цепи?
- 5.6. Как определяется напряжение на выходе ARC ИЦ при заданном напряжении на входе?
- 5.7. По какому закону изменяется напряжение на выходе ARC ИЦ при воздействии на неё постоянного напряжения?
- 5.9. Какой вид имеет напряжение на выходе ARC ИЦ при воздействии на неё положительного прямоугольного импульса (показать в диапазоне $0 \leq t \leq 2t_0$)?
- 5.9. Определить напряжение на выходе ARC ИЦ при воздействии на неё косинусоидального напряжения $U_m \cos \omega t$.
- 5.10. Какой вид имеет суммирующая ARC ИЦ?
- 5.11. Интегрирующей цепью называется цепь, напряжение на выходе которой:

- Ответы:
- а) повторяет форму напряжения на входе;
 - б) пропорционально производной от напряжения на входе;
 - в) пропорционально интегралу от напряжения на входе.

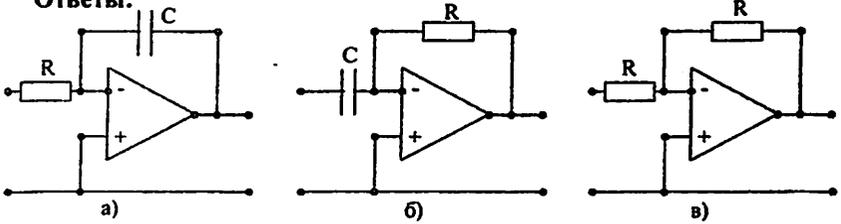
5.12. Укажите вид пассивной простейшей интегрирующей цепи.

Ответы:

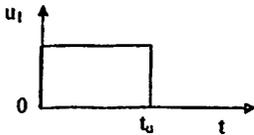


5.13. Вид простейшей активной интегрирующей цепи.

Ответы:

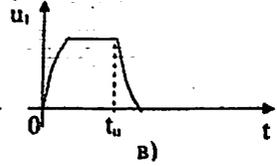
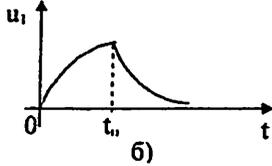
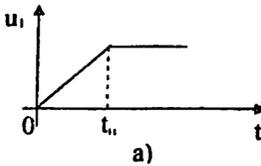


5.14. Прямоугольный импульс напряжения u_1 , подаётся на вход ИЦ. Установить соответствие между выходным напряжением u_2 и качеством интегрирования:

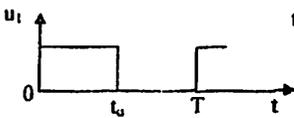


Качество интегрирования:

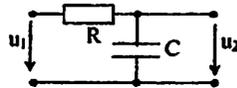
- а) удовлетворительное;
- б) идеальное;
- в) неудовлетворительное.



5.15. Выберите значение τ ИЦ для получения удовлетворительного интегрирования

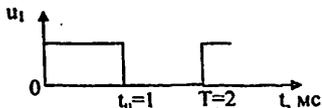
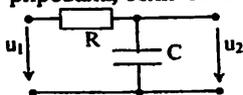


$t_u = 10 \text{ мс}$



Ответы: а). 100 мс; б). 10 мс; в). 1 мкс; г). 10 мкс; д). 1 мс.

5.16. Определите значение ёмкости C в RC -цепи, чтобы цепь удовлетворительно интегрировала, если $R=1 \text{ кОм}$



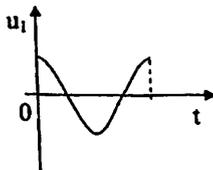
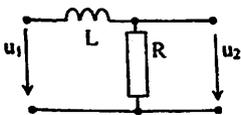
Ответы: а). 10 мкФ; б). 10 нФ; в). 1 нФ; г). 1 мкФ; д). 100 пФ.

5.17. Укажите соотношение между сопротивлениями резистора и конденсатора в RC -цепи, чтобы цепь была интегрирующей

Ответы: а). $R \ll X_C; RC \gg T$;
 в). $R \gg X_C; RC = T$;
 д). $R \ll 2 X_C; RC \ll T$.

б). $R = X_C; RC > T$;
 г). $R = 0,5 X_C; RC < T$;

5.18. Определите значение R в RL -цепи, чтобы цепь была интегрирующей при подаче на вход косинусоидального напряжения с периодом $T=1 \text{ мс}$, при $L=20 \text{ мГн}$.



Ответы: а). 100 Ом; б). 2 Ом; в). 20 Ом; г). 1 кОм; д). 2 кОм.

5.19. На вход пассивной RC -цепи с параметрами $R=1 \text{ кОм}$, $C=1 \text{ мкФ}$, подается гармоническое напряжение u_1 с периодом T . При каком значении T не будет интегрирование сигнала

Ответы: а) $T=0,1 \text{ мс}$; б) $T=1 \text{ мс}$; в) $T=10 \text{ мс}$; г) $T=50 \text{ мс}$.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ С ЦЕПЬЮ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Цель работы - с помощью программы EWB необходимо:

1. Исследовать работу не инвертирующего и инвертирующего усилителей, построенных на базе операционного усилителя (ОУ) с внешней глубокой отрицательной обратной связью (ООС).
2. Исследовать работу инвертирующего сумматора на ОУ.
3. Исследовать использование ОУ в качестве компаратора.

1. Теоретические сведения

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. 10.1, а показано условное графическое обозначение ОУ.

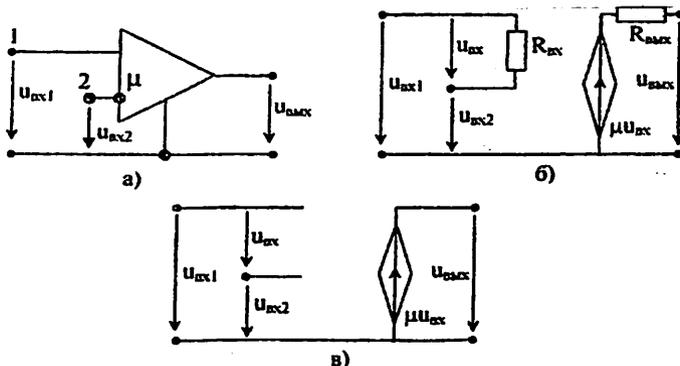


Рис. 10.1. Операционный усилитель (а) и его схемы замещения (б, в)

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

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

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 котором $\mu = 1$;

$R_{вх} \geq 103$ МОм - входное сопротивление.

Обобщённая линейная схема замещения ОУ по переменной составляющей представлена на рис 10.1 б).

Во многих случаях можно использовать идеализированную схему замещения ОУ (рис. 10.1, в), на которую не учитываются входное и выходное сопротивления.

Не инвертирующая схема усилителя с конечным коэффициентом усиления напряжения, построенная на базе ОУ, показана на рис. 10.2, а,

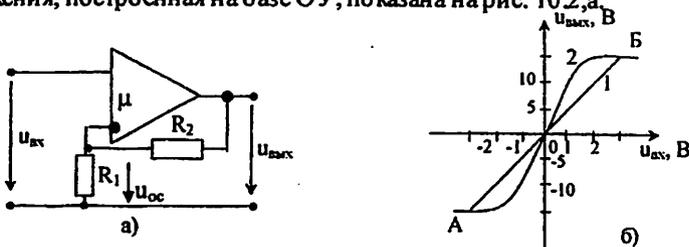


Рис. 10.2. Не инвертирующий усилитель на ОУ (а) и его передаточная характеристика (б)

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

$$u_{ос} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{вх} = \beta u_{вх}, \quad (10.1)$$

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

$$u_{вых} = \mu (u_{вх} - u_{ос}) = \mu (u_{вх} - \beta u_{вх}). \quad (10.2)$$

Резльтирующий коэффициент усиления напряжения с учётом ОС

$$K = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = \frac{\mu}{1 + \beta \mu}, \quad (10.3)$$

т.е. меньше чем без ОС.

При $\mu \rightarrow \infty$ получим $K = 1/\beta = 1 + R_2/R_1$. (10.4)

Хотя коэффициент усиления зависит лишь от отношения сопротивлений R_2/R_1 , это не означает, что они могут быть выбраны совершенно произвольно. В практических схемах эти сопротивления выбирают в пределах $10^3 \div 10^6$ Ом.

При введении глубокой ООС выходное сопротивление усилителя становится много меньше выходного сопротивления самого ОУ ($R_{вых ос} \ll R_{вых}$) и определяется по формуле $R_{вых ос} = R_{вых} / (1 + \beta \mu)$. (10.5)

Входное сопротивление усилителя, охваченного глубокой ООС, становится много больше входного сопротивления самого усилителя ($R_{вх ос} \gg R_{вх}$) и определяется по формуле $R_{вх ос} = R_{вх} (1 + \beta \mu)$. (10.6)

Выходное напряжение ОУ сверху и снизу ограничено пределами

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

где $U_{\text{п}}$ - напряжение источника питания ИЛС.

В схеме рис.10.2,а режим линейного усиления достигается при входных напряжениях $u_{\text{вх}} \leq U_{\text{вых, макс}}/K$. Поскольку $K \ll \mu$, то ОУ с ООС имеет достаточно большую область линейного усиления. Наклон передаточной характеристики (ПХ) на линейном участке АОБ (см. рис. 10.2,б) определяется коэффициентом усиления K : линия 1 проведена для $K \cong 5$; линия 2 - для $K \cong 10$. Таким образом, введение ООС позволяет существенно расширить линейную область ПХ и уменьшить нелинейные искажения сигнала.

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. 10.3,а). В этой схеме входной сигнал и сигнал ООС подаёт на инвертирующий вход ОУ, при этом происходит сложение токов $i_{\text{вх}}$ и $i_{\text{ос}}$ (рис. 10.3,а). Такая ООС называется параллельной. Найдём коэффициент усиления ОУ с ООС при выполнении условий: $R_{\text{вх}} \gg R_1$, $R_{\text{ос}} \gg R_2$. Эти условия легко выполняются в реальных схемах, поскольку у ИМС $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ и поэтому $i_{\text{вх}} = -i_{\text{ос}} = i$.

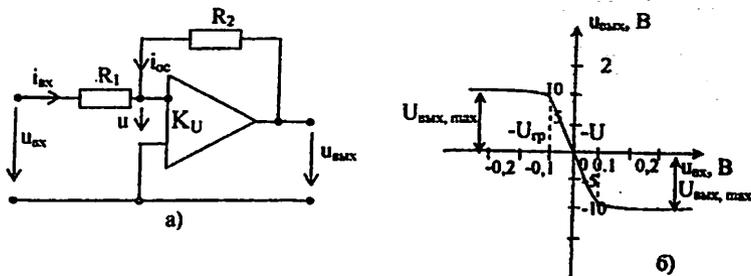


Рис. 10.3. Инвертирующий усилитель (а) и его передаточная характеристика (б)

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

$$u_{\text{вх}} = R_1 i_{\text{вх}} = R_1 i; \quad (10.7)$$

$$u_{\text{вых}} = R_2 i_{\text{ос}} = -R_2 i, \quad (10.8)$$

следовательно

$$K = u_{\text{вых}}/u_{\text{вх}} = -R_2/R_1. \quad (10.9)$$

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.10.3,а) $R_{\text{вх, ос}} = R_1$ существенно меньше входного сопротивления не инвертирующего усилителя (рис.10.2,а).

Введение ООС в инвертирующий ОУ существенно снижает его выходное сопротивление

$$R_{\text{вых оос}} = R_{\text{вых}} / (1 + \beta \mu). \quad (10.10)$$

При $\mu \rightarrow \infty$ и $R_{\text{вых оос}} \rightarrow 0$ Передаточная характеристика (ПХ) инвертирующего усилителя (рис.3.9,б) отличается от ПХ не инвертирующего усилителя (рис.10.2,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 (рис. 7.2), интегрирование (рис. 8.3) и т.д.). Такие устройства находят широкое применение в системах автоматического управления (САУ). Они также составляют основу аналоговых ЭВМ.

На рис.10.4,а приведена схема инвертирующего сумматора трёх напряжений. Она собрана на базе ОУ с инвертирующим входом и цепью ООС. Так как $R_{\text{вх}}$ ОУ велика, то

$$i_1 + i_2 + i_3 = -i_{\text{оос}} = i. \quad (10.11)$$

Как и в схеме, рис. 10.3,а

$$i_{\text{оос}} = u_{\text{вых}} / R_{\text{оос}}.$$

Входные токи

$$i_1 = u_{\text{вх1}} / R; \quad i_2 = u_{\text{вх2}} / R; \quad i_3 = u_{\text{вх3}} / R,$$

тогда с учётом (10.11), следует

$$(u_{\text{вх1}} + u_{\text{вх2}} + u_{\text{вх3}}) / R = -u_{\text{вых}} / R_{\text{оос}}, \quad (10.12)$$

следовательно

$$u_{\text{вых}} = \frac{-(u_{\text{вх1}} + u_{\text{вх2}} + u_{\text{вх3}}) R_{\text{оос}}}{R}. \quad (10.13)$$

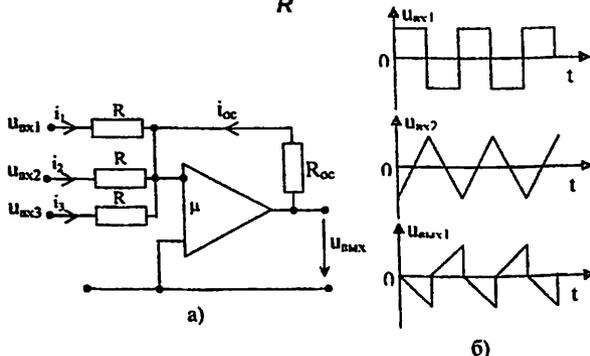


Рис. 10.4. Инвертирующий сумматор на ОУ на три входа (а) и напряжения на входе и выходе сумматора (б)

При $R = R_{\text{оос}}$

$$u_{\text{вых}} = -(u_{\text{вх1}} + u_{\text{вх2}} + u_{\text{вх3}}). \quad (10.14)$$

Знак минус показывает, что наряду с суммированием в схеме (рис.10.4,а) происходит инвертирование полярности сигналов. На рис.10.4,б приведены вре-

менные диаграммы, иллюстрирующие работу инвертирующего сумматора. ОУ в нелинейном режиме работы без внешних ОС может быть использован в качестве схемы сравнения напряжений (компаратор). Компаратор является одним из основных элементов импульсных схем.

Поскольку в реальном ОУ на ИМС μ очень велик, то входное напряжение срабатывания (переключения) компаратора $u_{cp} = U_{вых, max} / \mu$ весьма мало и составляет не более нескольких милливольт. В идеальной ОУ $\mu \rightarrow \infty$ и $u_{cp} \approx 0$. 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. 10.5). Значит выходное напряжение ОУ при $|u_{вх1} - u_{вх2}| > u_{cp}$

и зависит от того, какое из входных напряжений больше и следовательно ОУ является схемой сравнения двух напряжений (компаратором).

На рис.10.5,а напряжение на входе компаратора $u_{вх1}$ - синусоидальное, $u_{вх2}$ - постоянное. Компаратор переключается в моменты равенства $u_{вх1} \approx u_{вх2}$ и

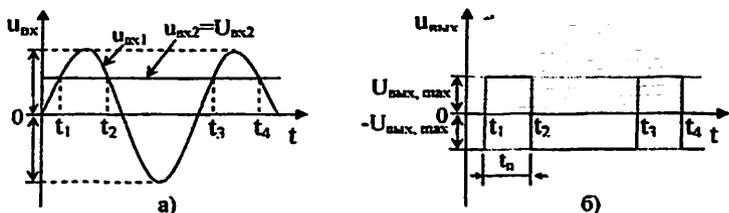


Рис. 10.5. Временные диаграммы напряжений на входе и выходе компаратора на ОУ

выходное напряжение имеет форму прямоугольных импульсов (см. рис. 10.5,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.

Работа реальных ОУ на ИМС при широком диапазоне частот осложняется тем, что его коэффициент усиления существенно уменьшается с увеличением частоты сигнала. На рис.10.6,а дается схема измерения, а на рис.10.6,б график АЧХ логарифмического коэффициента усиления ($S=20 \text{ Lg} (U_2/U_1)$) типового усиления ОУ типа LF412A без ООС.

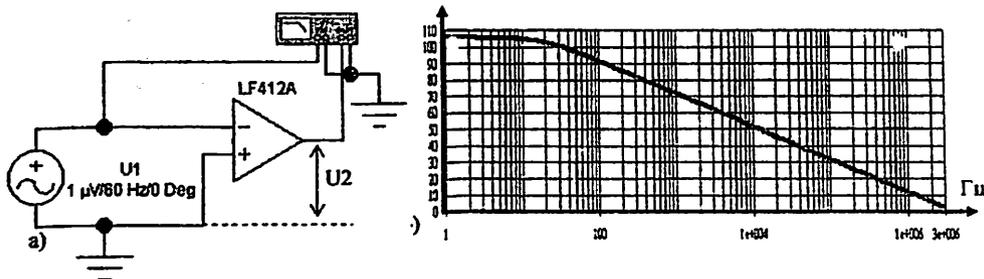


Рис.10.6. Схема измерения (а) и частотная характеристика ОУ LF412A без ООС

Уменьшение усиления с повышением частоты объясняется инерционностью процессов прохождения зарядов в активных компонентах усилителя (в биполярных и полевых транзисторах) и наличием 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 не инвертирующего усилителя (см. рис.10.2,а) при $R_1=1$ кОм определить коэффициент усиления K при трёх значениях $R_2 = (1, 2, 3)$ кОм по формуле (10.4). Результаты расчётов занести в табл. 10.1.

Результаты расчёта и измерений

Таблица 10.1

		R_2 кОм		
		1	2	3
Схема рис. 10.2,а	Расчёт	K		
	Измерения			
	Относительная погрешность		$\delta, \%$	
Схема рис. 10.3,а	Расчёт	K		
	Измерения			
	Относительная погрешность		$\delta, \%$	

2.2. Для схемы инвертирующего усилителя (см. рис. 10.3,а) при $R_1=1$ кОм и трёх значениях $R_2 = (1, 2, 3)$ кОм определить коэффициент усиления K по формуле (10.9). Результаты расчёта занести в табл. 10.1.

4. Выполнение работы

3.1. Исследование не инвертирующего усилителя

Загружается файл схемы ОУ с инверсией Lb10-1 в результате чего на экране монитора ПК появится схема усилителя (рис.10.6,а).

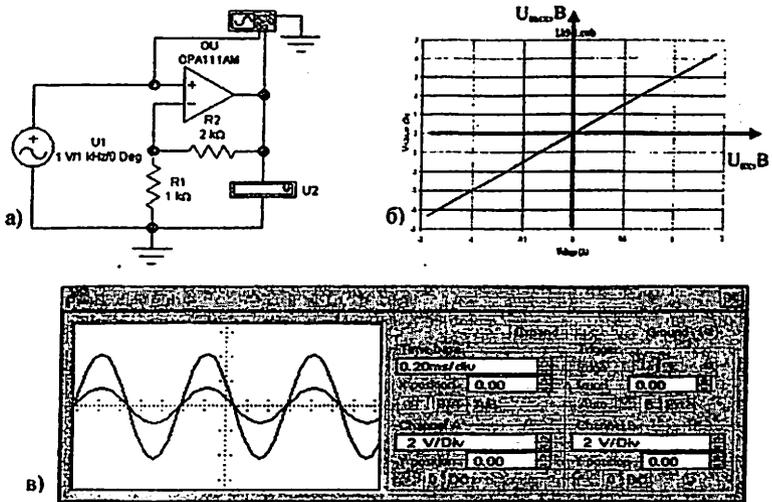


Рис. 10.6. Схема исследования не инверсного усилителя с конечным усилением (а) на ОУ, его передаточная характеристика (б), передняя панель двухканального осциллографа, на экране которого видны осциллограммы входного и выходного напряжений (в)

Зарисовать схему усилителя (рис.10.6,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.10.1.

3.2. Исследование инвертирующего усилителя

Загружается файл схемы ОУ с инверсией Lb10-2 в результате чего на экране монитора ПК появится схема усилителя (рис.10.6,а).

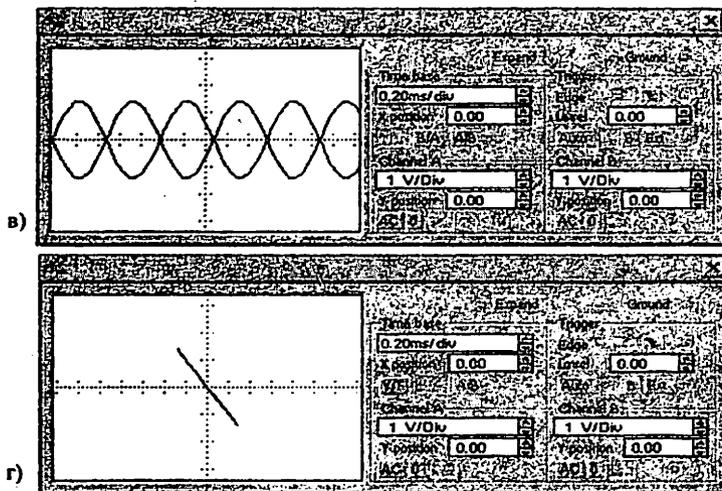
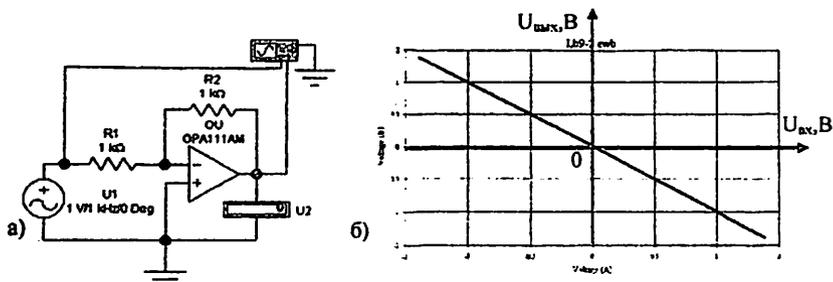


Рис. 10.7. Схема исследования инвертирующего усилителя с конечным усилением (а) на ОУ, его передаточная характеристика (б), передняя панель осциллографа, на экране которого видны осциллограммы входного и выходного напряжений (в), передняя панель осциллографа, на экране которого видна передаточная характеристика усилителя (г)

Зарисовать схему усилителя (рис.10.7,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.10.1.

3.3. Исследование инвертирующего сумматора на ОУ

Загружается файл схемы инвертирующего сумматора на ОУ Lb10-3 в результате чего на экране монитора ПК появится схема усилителя (рис.10.8,а).

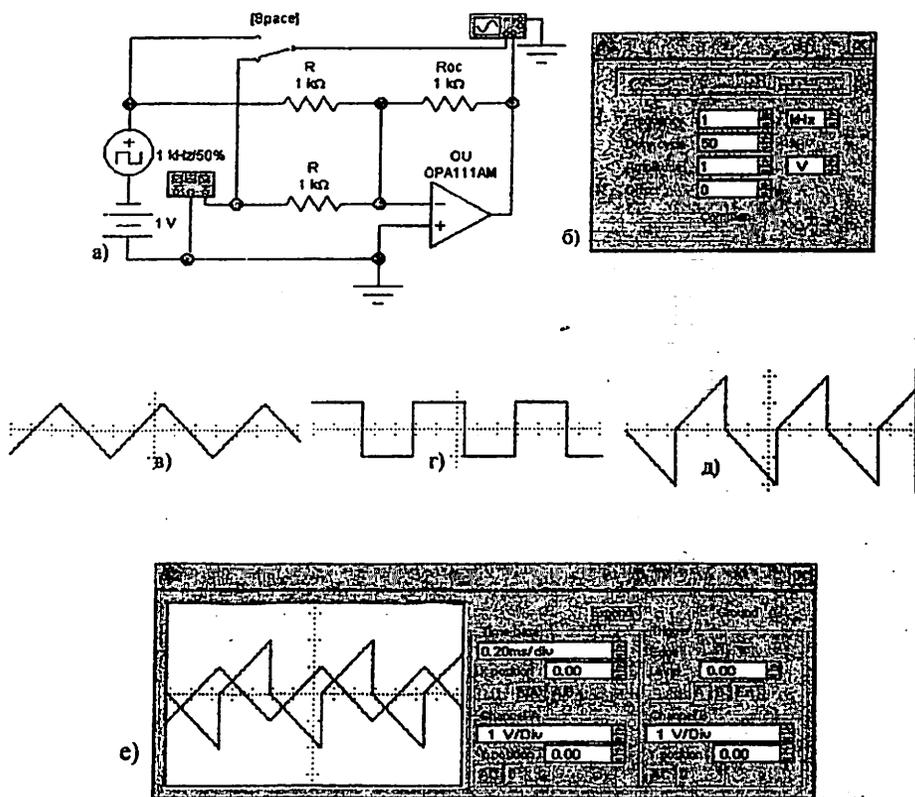


Рис. 10.8. Схема инвертирующего сумматора на ОУ (а), передняя панель функционального генератора (б), напряжение на первом входе сумматора (в), напряжение на втором входе сумматора (г), напряжение выходе сумматора (д), передняя панель осциллографа, на экране которого видны осциллограммы одного из входных напряжений (треугольное) и выходного напряжения (е)

Зарисовать схему инвертирующего сумматора на ОУ (рис.10.8,а), временные диаграммы мгновенных значений напряжений на входе и выходе сумматора.

3.4. Исследование компараторов на ОУ

Загружается файл Lb10-1 в результате чего на экране монитор - ПК появится схема компаратора на ОУ (рис.10.9,а).

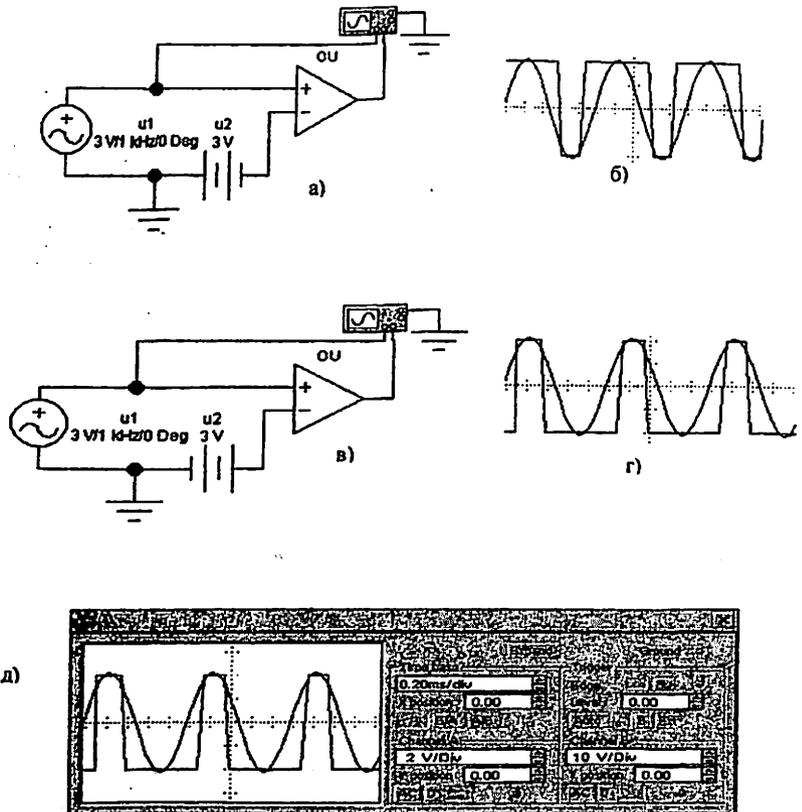


Рис. 10.9. Схемы компараторов на ОУ (а, в), напряжение на входе и выходе компаратора «а» (б), напряжение на входе и выходе компаратора «в» (г), передняя панель осциллографа, на экране которого видны осциллограммы напряжения на входе (синусоидальное) и выходе (прямоугольные импульсы) (д)

Зарисовать схемы компараторов на ОУ (рис.10.,а,в), временные диаграммы мгновенных значений напряжений на входе и выходе компаратора.

3.5. Исследование зависимости амплитудно-частотных характеристик усилителя с конечным усилением на реальном ОУ от глубины ООС

Загружается файл Lb10-5 в результате чего на экране монитора ПК появится схема на ОУ (рис.10.10,а).

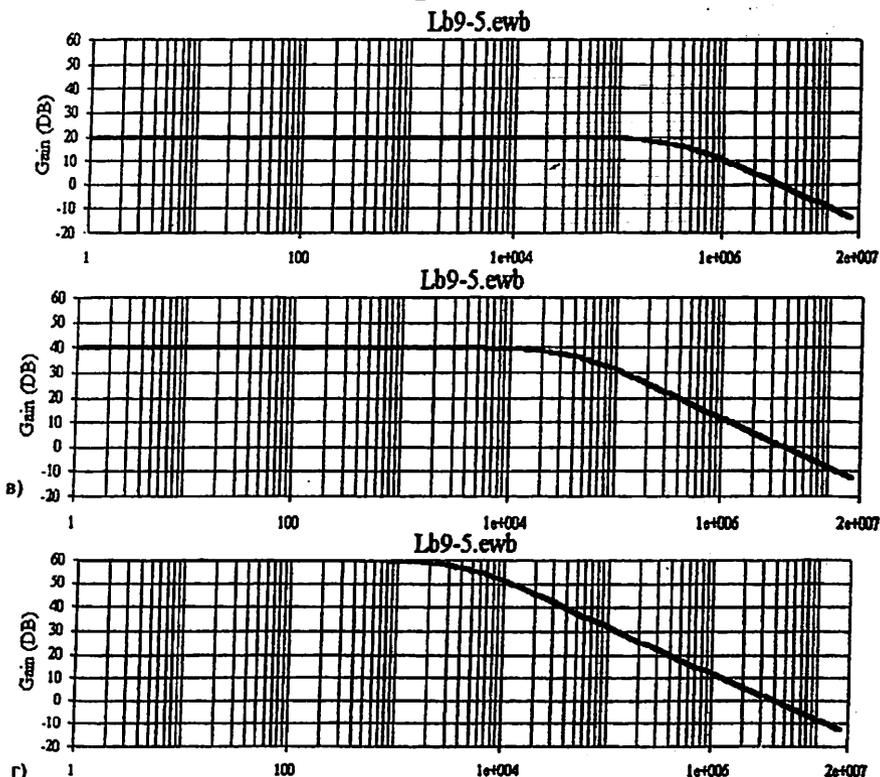
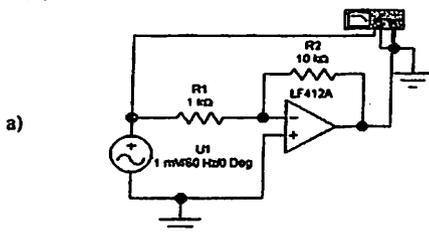


Рис.10.10. Схема измерения логарифмической АЧХ ($S=20 \text{ Lg}(U_2/U_1)$) ОУ (а) при разных значениях сопротивления обратной связи: $R_2=10 \text{ кОм}$ (б), $R_2=100 \text{ кОм}$ (в), $R_2=1000 \text{ кОм}$ (г)

По заданию преподавателя установить на схеме (рис.10.10,а) требуемый тип ОУ, и измерить полосу пропускания ОУ по уровню 3 дБ при трёх значениях сопротивления обратной связи $R_2 = 10; 100; 1000 \text{ кОм}$.

3. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Электрические схемы и параметры их элементов.
- 4.3. Предварительный расчёт и его результаты (см. табл. 10.1).
- 4.4. Осциллограммы на входе и выходе усилителей (см. рис. 10.2,а, рис. 10.3,б) и компаратора.
- 4.5. Выводы из результатов расчёта и эксперимента.
- 4.6. Осциллограммы на входе и выходе инвертирующего сумматора (см. рис.10.4,а)

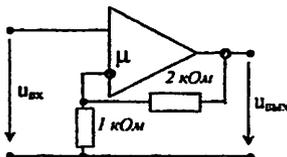
5. Контрольные вопросы и задачи

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. |

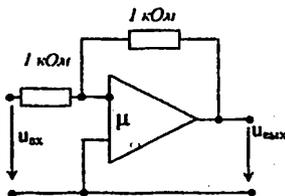
5.2. Укажите, какой коэффициент усиления по напряжению имеет схема



Ответы:

- | |
|-----------|
| А. $K=1$ |
| Б. $K=-2$ |
| В. $K=2$ |
| Г. $K=-1$ |

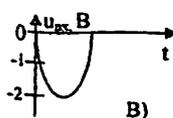
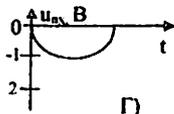
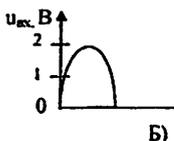
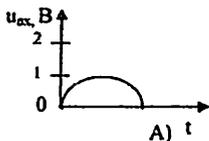
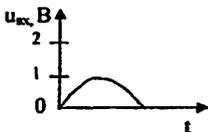
5.3. Укажите, какой коэффициент усиления по напряжению K имеет схема



Ответы:

- | |
|-----------|
| А. $K=1$ |
| Б. $K=-2$ |
| В. $K=2$ |
| Г. $K=-1$ |

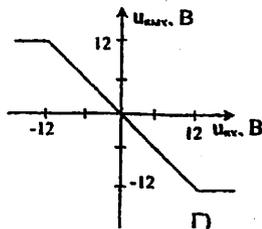
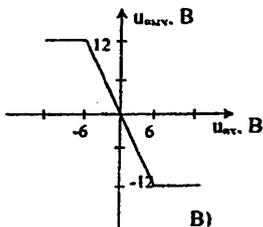
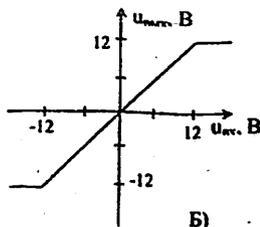
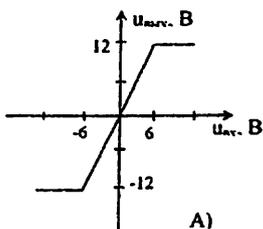
5.4. Укажите, какой сигнал напряжения появится на выходе усилителя $u_{вых}$ схема которого дана в п.5.2, если на его входе появится сигнал



5.5. Укажите, какой сигнал напряжения появится на выходе усилителя $u_{вых}$ (см. п.5.3), если на его входе появится сигнал $u_{вх}$ (см. п.5.4).

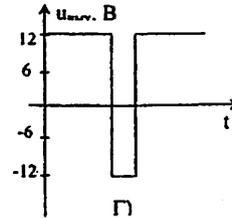
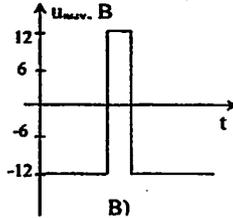
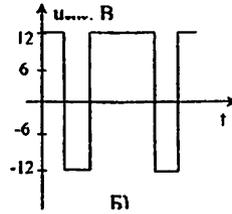
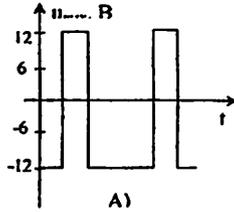
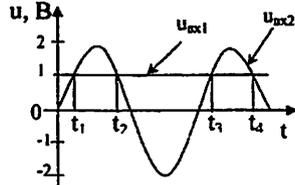
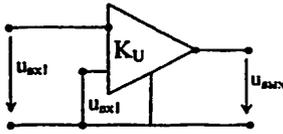
5.6. Укажите, какую передаточную характеристику имеет усилитель (см. п. 5.2).

Ответы:



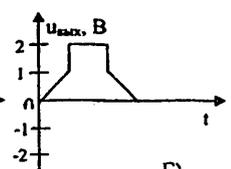
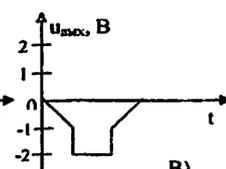
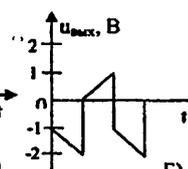
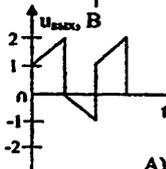
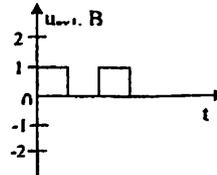
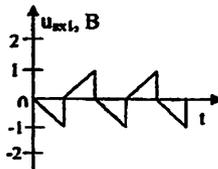
5.7. Укажите, какую передаточную характеристику (см. п.5.6) имеет усилитель (см. п. 5.3).

5.8. На первом входе ОУ действует постоянное напряжение $U_{вх1}=1$ В, а на втором – гармоническое напряжение $u_{вх2}=2 \sin \omega t$. Укажите форму сигнала на выходе ОУ



5.9. На первый вход ОУ (см. п.5.8) действует постоянное напряжение $U_{вх1}=-1$ В, а на второй – гармоническое напряжение $u_{вх2}=2 \sin \omega t$. Укажите форму сигнала на выходе $u_{вых}$ ОУ (см. п.5.8).

5.10. На первый вход инвертирующего сумматора (см. рис.10.4,а) действует напряжение $u_{вх1}$, на второй $u_{вх2}$. Укажите форму напряжения на выходе инвертирующего сумматора $u_{вых}$ при $R_{oc}=R=1$ кОм.



11. ИССЛЕДОВАНИЕ RC-АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Цель работы - теоретические и экспериментальные исследование трёх схем RC-автогенераторов на операционном усилителе (ОУ); экспериментальное определение условий самовозбуждения и зависимость частоты генерации от параметров их элементов.

1. Теоретические сведения

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.11.1,а) содержит усилитель с комплексным коэффициентом передачи $K(j\omega) = \underline{U}_2 / \underline{U}_1 = K(\omega) e^{j\varphi_K(\omega)}$ и цепь обратной связи (ОС) с комплексным коэффициентом передачи $\beta(j\omega) = \underline{U}_3 / \underline{U}_2 = \beta(\omega) e^{j\varphi_\beta(\omega)}$.

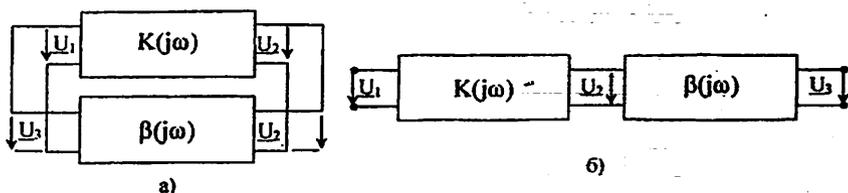


Рис. 11.1. Обобщённая структурная схема автогенератора (а), каскадное соединение усилителя и цепи ОС (б)

Если учесть, что для возникновения гармонических автоколебаний требуется, чтобы в разомкнутой схеме (рис. 11.1,б) напряжение на выходе равнялось напряжению на входе, т.е. $\underline{U}_3 = \underline{U}_1$, то комплексный коэффициент передачи разомкнутой системы

$$H(j\omega) = \underline{U}_3 / \underline{U}_1 = 1 \quad (11.1)$$

или

$$H(j\omega) = K(j\omega)\beta(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}\beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)} = K(\omega)\beta(\omega)e^{j(\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega))} = 1 \quad (11.2)$$

откуда получаем два условия возникновения автоколебаний:

$$K(\omega)\beta(\omega) = 1; \quad (11.3)$$

$$\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega) = 0, 2\pi, \dots, k2\pi. \quad (11.4)$$

Первое условие (11.3) называется условием баланса амплитуд, оно означает, что в стационарном режиме величина коэффициента передачи равна единице, а второе (11.4) называется условием баланса фаз, означает, что при обходе этой цепи получаем колебания в той же фазе.

На рис. 11.2 показан один из способов построения RC-генератора с ис-

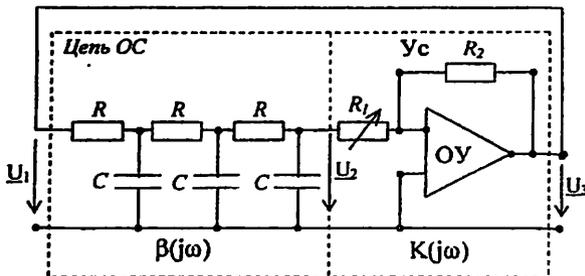


Рис. 11.2. Схема RC-автогенератора на инвертирующем ОУ

пользованием ОУ. Генератор состоит из инвертирующего ОУ с комплексным коэффициентом передачи

$$K(j\omega) = \frac{U_3}{U_2} = - (R_2/R_1) = R_2/R_1 e^{j180^\circ} = K(\omega) e^{j\varphi_k(\omega)}, \quad (11.5)$$

где $K(\omega) = R_2/R_1$; $\varphi_k(\omega) = \pm 180^\circ = \pm\pi$, (11.6)

и RC-цепи ОС, комплексный коэффициент передачи которой $\beta(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = 1 / [(5(\omega\tau)^2 - 1) + j\omega\tau((\omega\tau)^2 - 6)] = \beta(\omega) e^{j\varphi_\beta(\omega)}$, (11.7)

где $\tau = RC$.

На рис.11.3 представлены графики АЧХ и ФЧХ цепи обратной связи (рис.11.2)

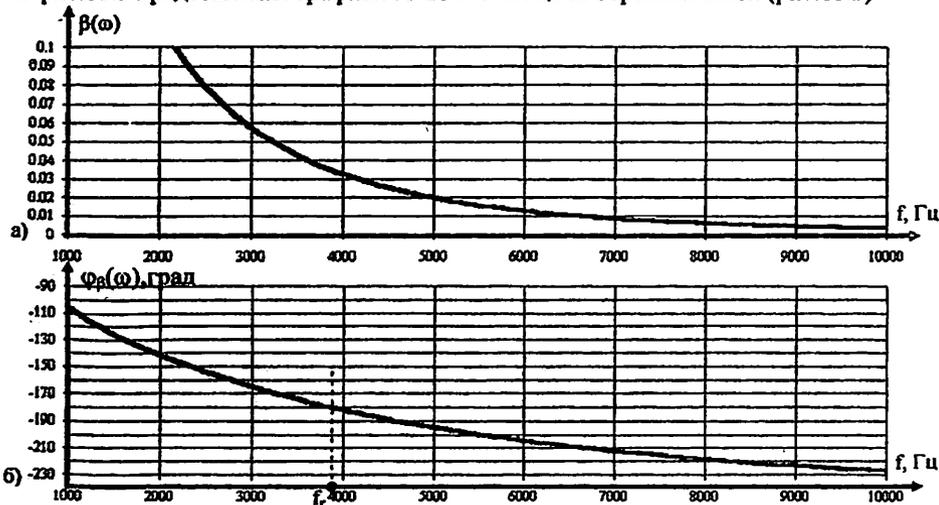


Рис.11.3. АЧХ $\beta(\omega)$ (а) и ФЧХ $\varphi_\beta(\omega)$ (б) цепи обратной связи (рис.11.2) при $R=1$ кОм, $C=0,1$ мкФ ($\tau = RC=100$ мкс; $f_r = 3,9$ кГц)

Баланс фаз выполняется на частоте ω_r , на которой мнимая часть знаменателя (11.7) равна нулю, то есть $(\omega_r\tau)^2 - 6 = 0$, откуда частота генерации

$$\omega_r = \frac{\sqrt{6}}{\tau} = \frac{\sqrt{6}}{RC}; \quad f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC}. \quad (11.8)$$

На этой частоте коэффициент передачи цепи ОС, рассчитанный по формуле (11.7), составит величину $\beta(\omega_r) = 1/29$. (11.9)

Для выполнения баланса амплитуд согласно (11.3) требуется коэффициент усиления $K(\omega_r) = 1/\beta(\omega_r) = 29$. (11.10)

Вторая схема RC-автогенератора на инвертирующем ОУ представлена на рис.11.4.

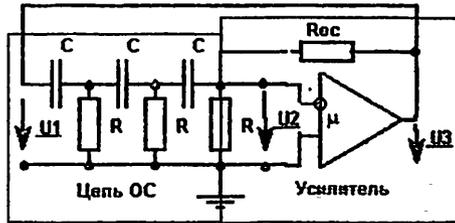


Рис. 11.4. Вторая схема RC- автогенератора на инвертирующем ОУ

В этой схеме в качестве фазобалансной цепи ОС используется трёхзвенная RC цепь, поворачивающая фазу на 180° . Комплексная передаточная функция такой цепи ОС описывается выражением

$$\beta(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = 1/[1 - 5/(\omega RC)^2 + j(1/(\omega RC)^3 - 6/(\omega RC))] = \beta(\omega)e^{j\varphi_r(\omega)}. \quad (11.11)$$

На рис.11.4 представлены АЧХ и ФЧХ цепи обратной связи (рис.11.4).

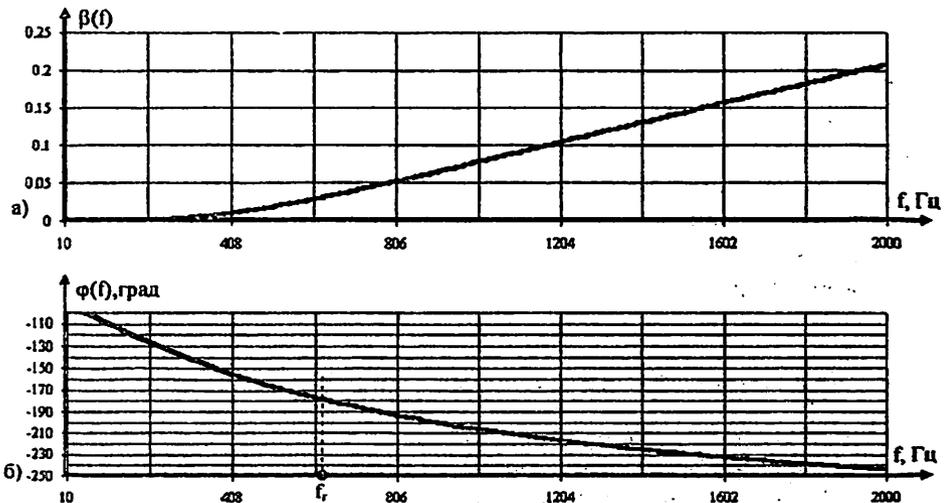


Рис.11.5. АЧХ $\beta(\omega)$ (а) и ФЧХ $\varphi_r(\omega)$ (б) цепи обратной связи (рис.11.4) при $R=1 \text{ кОм}$, $C=0,1 \text{ мкФ}$ ($\tau = RC=100 \text{ мкс}$; $f_r=0,65 \text{ кГц}$)

Колебания в генераторе могут возникнуть, если фазовый сдвиг, создаваемый CR-цепью будет равен 180° , приравняв нулю мнимую часть выражения (11.11) можно определить частоту генерируемых колебаний:

$$1/(\omega RC)^3 - 6/(\omega RC) = 0; \quad 1 - 6(\omega RC)^2 = 0;$$

$$\omega_r = 1/\sqrt{6} RC; \quad f_r = \omega_r/2\pi = 1/2\pi \sqrt{6} RC. \quad (11.12)$$

Коэффициент усиления усилителя, необходимый для самовозбуждения генератора на частоте f_r , также как и в первой схеме (рис.11.2) автогенератора $K > 29$.

Особенно широкое применение на практике нашла третья схема RC-автогенератора на неинвертирующем ОУ с использованием в качестве фазобалансной цепи – моста Вина (рис.11.6).

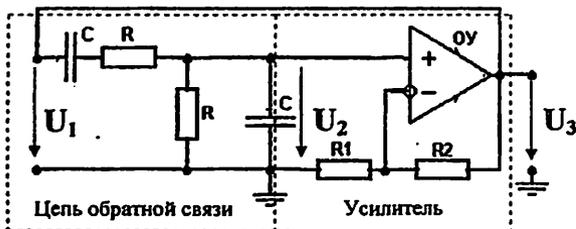


Рис.11.6. Схема RC-автогенератора на неинвертирующем ОУ с использованием в качестве фазобалансной цепи – моста Вина

Комплексная передаточная функция такой цепи ОС описывается выражением

$$\beta(j\omega) = U_2/U_1 = 1/[3 + j(\omega\tau - 1/\omega\tau)] = \beta(\omega) e^{j\varphi_\beta(\omega)}, \quad (11.13)$$

где

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{9 + (\omega\tau - 1/\omega\tau)^2}} - \text{АЧХ}, \quad (11.14)$$

$$\varphi_\beta(\omega) = -\arctan(\omega\tau - 1/\omega\tau)/3. - \text{ФЧХ} \quad (11.15)$$

АЧХ и ФЧХ цепи обратной связи (рис.11.6) приведены на рис. 11.7.

Частота генерации RC-автогенератора ω_r (рис.11.6) соответствует нулевому фазовому сдвигу цепи ОС и определяется из решения уравнения $\varphi_\beta(\omega) = 0$. Из (11.15) следует

$$\omega_r\tau - 1/\omega_r\tau = 0, \quad \omega_r = 1/\tau = 1/RC, \quad f_r = 1/2\pi\tau = 1/2\pi RC. \quad (11.16)$$

На частоте генерируемых колебаний коэффициент передачи $\beta(\omega)$ фазобалансной цепи ОС максимален и, как следует из формулы (11.14), 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 $K(\omega_r) > 3$.

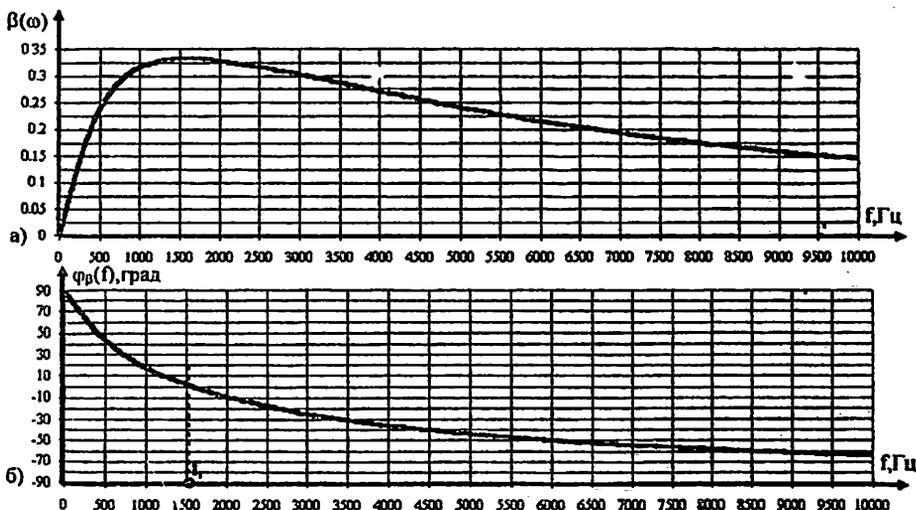


Рис.11.7. АЧХ $\beta(\omega)$ (а) и ФЧХ $\varphi_B(\omega)$ (б) цепи обратной связи (рис.11.4) при $R=1$ кОм, $C=0,1$ мкФ ($\tau=RC=100$ мкс; $f_r=1,592$ кГц)

2. Предварительный расчёт

2.1. По заданным параметрам цепи (см. табл. 11.1) для трёх схем RC-автогенераторов определить: частоты генерации f_r , по формулам (11.8),(11.12),(11.16); сопротивления R_2, R_{oc} . Результаты занести в табл. 11.3.

Варианты параметров элементов исследуемых схем Таблица 11.1

Вариант №	$R, \text{кОм}$	Вариант №	$R, \text{кОм}$
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.11.2) при разомкнутой цепи ОС (рис.11.1,б), содержащей каскадное соединение усилителя с коэффициентом усиления $K(\omega)=29$ и фазосдвигающей RC-цепи ОС, по формуле $H(\omega)=K(\omega)\beta(\omega)=$

$$\frac{29}{\sqrt{[5(\omega\tau)^2 - 1]^2 + (\omega\tau)^2 [(\omega\tau)^2 - 6]^2}} \quad (11.17)$$

Расчёт АЧХ выполнить на частотах: $f=0$; $0,5 f_r$; $0,8 f_r$; f_r ; $1,2 f_r$; $1,5 f_r$; $2 f_r$.
 Результаты расчёта занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Результаты предварительного расчёта и эксперимента

	Предварительный расчёт				Эксперимент			
	f	f, кГц	H(f)	$\varphi(f)$, град	Измерено		Рассчитано	
					U ₃ , В	φ , град	H(f)	$\varphi(f)$, град
1	0							
2	0,5 f _r							
3	0,8 f _r							
4	f _r							
5	1,2 f _r							
6	1,5 f _r							
7	2 f _r							

Таблица 11.3

Результаты предварительного расчёта и моделирования

Схема	Предварительный расчёт				Результаты моделирования			
	R ₂ , кОм	f _r , кГц	$\beta(f_r)$	K(f _r)	R ₂ , кОм	f _r , кГц	$\beta(f_r)$	K(f _r)
11.2			1/29	29				
11.4			1/29	29				
11.6			1/3	3				

3. Выполнение лабораторной работы

3.1. Исследование RC-автогенератора (рис.11.2) на инвертирующем ОУ.

Загрузить с дискетки или с HD в ПК текстовый файл Lab_11.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 Lab-11.doc.

Загрузить с дискетки либо с HD схемный файл Lb11-1.ewb в результате чего на рабочем поле программы EWB появится схема, приведенная на рис.11.8.

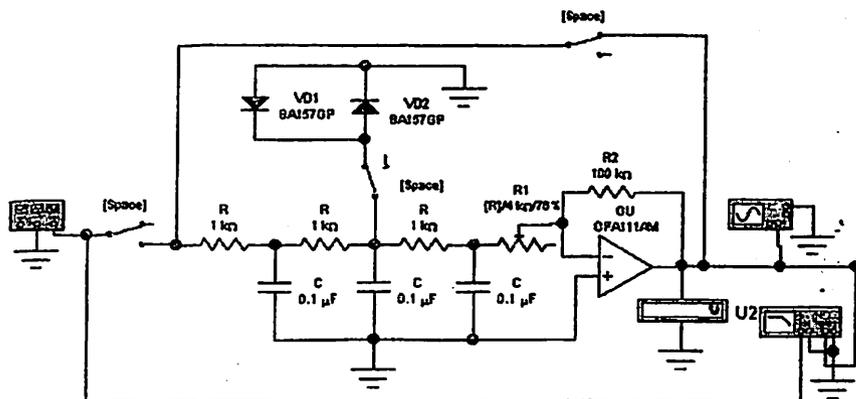


Рис.11.8. Исследование первой схемы ARC-автогенератора на инвертирующем усилителе типа OPA111AM в режиме автоколебаний

В схеме (рис.11.8) в отличие от схемы (рис.11.2), 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 (11.8).

Действующее значение гармонического напряжения на выходе генератора измеряется цифровым вольтметром U2.

Установить на схеме генератора параметры сопротивлений R и ёмкостей C согласно требуемого варианта задания табл. 11.1.

Дважды щелкнув левой клавишей «мыши» по значку осциллографа, откроем переднюю панель осциллографа (рис.11.9).

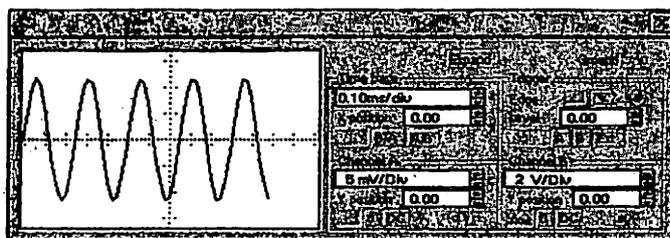


Рис.11.9. Передняя панель осциллографа

Запустить процесс моделирования схемы автогенератора, щелкнув один раз по клавише **011**. Периодически щелкая левой клавишей мыши по кнопке **PAUSE**, 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. 11.3.

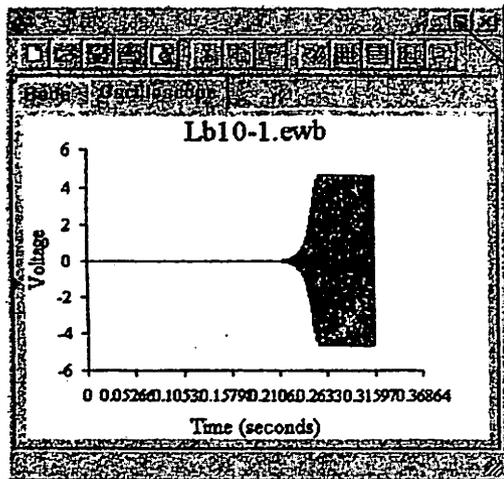


Рис.11.10

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.11.10. Далее щелкнув левой клавишей

мыши по клавише, указанной стрелкой **A**, получим полное раскрытие (на весь экран монитора) процесса возбуждения автоколебаний в автогенераторе (см. рис 11.11).

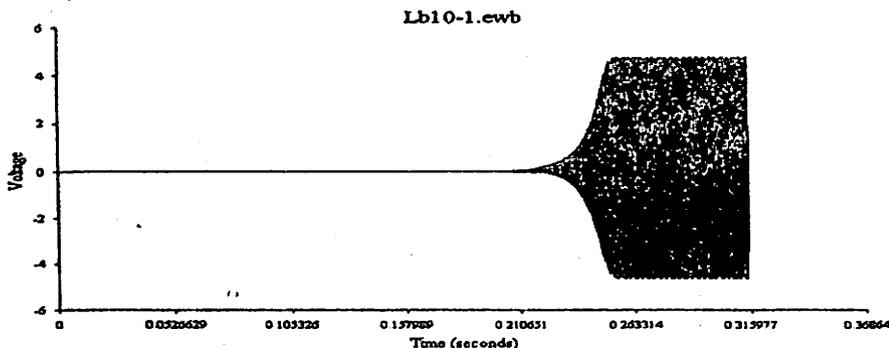


Рис.11.11. Картинка на экране монитора после щелчка левой клавишей мыши по клавише, показанной стрелкой на рис 11.10

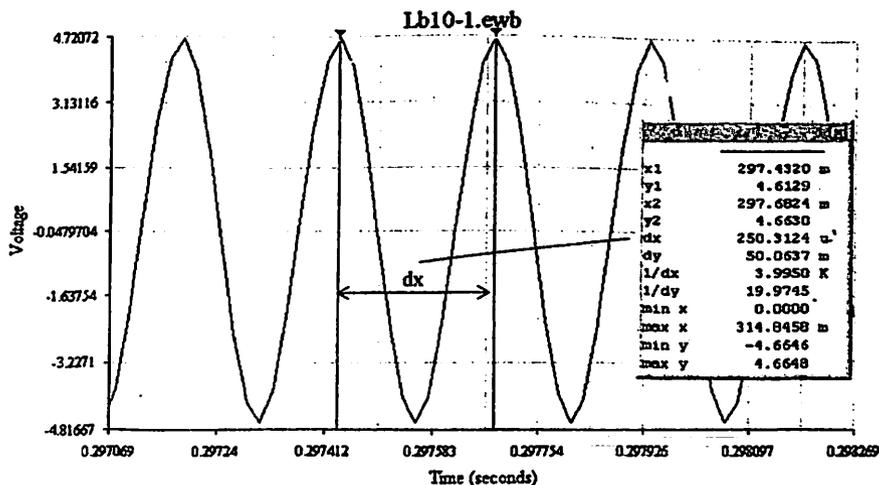


Рис.11.12. Измерение периода колебаний выходного напряжения автогенератора $T=dx=250,3124$ мкс

После измерения периода генерируемых колебаний необходимо вернуться к исходной схеме (рис.11.8) и приступить к исследованию ФЧХ и АЧХ разомкнутой цепи ОС, содержащей каскадное соединение усилителя и цепи ОС (см.рис.11.1,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.11.13. Рис.11.13. Измерение АЧХ и ФЧХ автогенератора с разорванной цепью ОС.

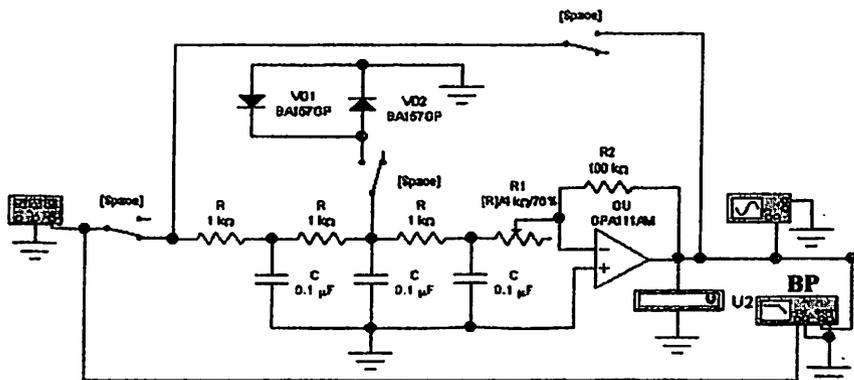


Рис.11.13. Схема для исследования АЧХ и ФЧХ петлевой передаточно функции

Для измерения АЧХ и ФЧХ автогенератора с разомкнутой цепью ОС необходимо раскрыть переднюю панель измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Bode Plotter (BP) два раза щёлкнув мышью по его сжатому изображению, затем запустить моделирование в результате на экране ИЧХ появится изображение АЧХ или ФЧХ (рис.11.14).

Для измерения АЧХ надо щёлкнуть мыши по клавише

Magnitude

Для измерения ФЧХ надо щёлкнуть мыши по клавише

Phase

Перемещая вертикальный курсор-визир к бode плоттера с помощью мыши и уточняя его положение с помощью двух кнопок со стрелками устанавливается требуемая частота (её значение видно в

1.01
4.062kHz

нижнем окошечке) отсчитываем из верхнего окошечка значение коэффициента передачи $H(f) = K(f)\beta(f) = U_3/U_1$, т.е.

АЧХ автогенератора с разомкнутой ОС на этой частоте. Перейдя сразу же в ре

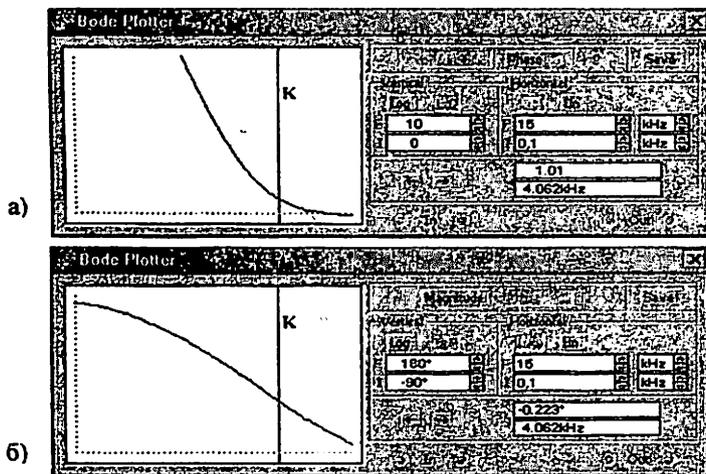


Рис.11.14

жим расчёта ФЧХ, отсчитывают из верхнего окошечка

0.223°
4.062kHz

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.11.2.

3.2. Исследование второй схемы RC-автогенератора (рис.11.4) на инвертирующем ОУ

Загрузить следующий схемный файл Lb11-2.ewb в результате чего на экране монитора появится вторая схема RC-автогенератора (рис.11.15) с измерительными приборами, необходимыми для её исследования.

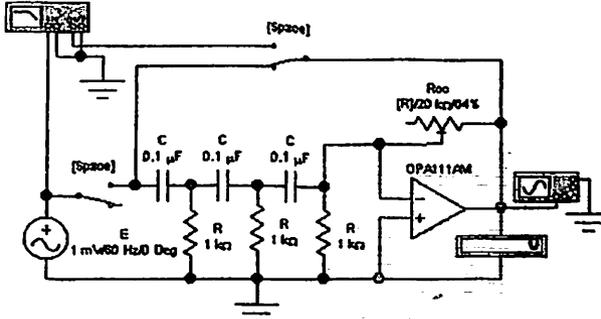


Рис.11.15. Исследование второй схемы RC-автогенератора на инвертирующем ОУ типа OPA111AM

Исследование второй схемы RC-автогенератора на инвертирующем ОУ производится также, как первой схемы (см. п.3.1).

3.3. Исследование третьей схемы RC-автогенератора (рис.11.4) на неинвертирующем ОУ с мостом Вина

Загрузить следующий схемный файл Lb11-3.ewb в результате чего на экране монитора появится третья схема RC-автогенератора на неинвертирующем ОУ с мостом Вина (рис.11.16) и с измерительными приборами, необходимыми для её исследования.

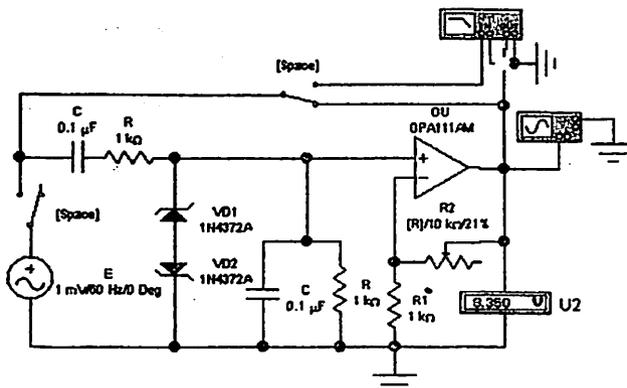


Рис.11.16. Исследование схемы ARC-автогенератора с мостом Вина

В схеме (рис.11.16) в отличие от схемы (рис.11.6), 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 наблюдаются не только большие искажения выходного напряжения автогенератора (по форме близки к биполярным прямоугольным импульсам)но и очень большое понижение частоты, существенно отличающейся 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 первой схемы (см. п.3.1) и второй схемы ARC-автогенератора (см. п.3.2).

4. Содержание отчёта

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схемы и расчётные формулы.
- 4.3. Результаты предварительного расчёта и моделирования, сведённые в табл. 11.2 и табл.11.3.
- 4.4. Графики АЧХ и ФЧХ ARC-автогенератора (рис.11.2) 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

5.1 Укажите правильное значение частоты генерации в схеме RC-автогенератора (рис. 11.2) при $R=1$; $C=1$

Ответы:

А. $\omega_1=0,39$; Б. $\omega_1=2,45$; В. $\omega_1=15,39$; Г. $\omega_1=0,245$.

5.2. Укажите правильное значение условия баланса амплитуд в схеме RC-автогенератора (рис. 11.2).

Ответы:

А. $K\beta=0,8$; Б. $K\beta=1$; В. $K\beta=0,9$; Г. $K\beta=0,95$.

5.3. 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. $K=3$.

5.4. 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. $\beta=0,15$.

5.5. Укажите правильное значение сдвига фаз цепью ОС, если усилитель создаёт сдвиг фаз $\varphi_p(\omega) = -170^\circ$.

Ответы:

А. $\varphi_p(\omega)=130^\circ$; Б. $\varphi_p(\omega)=190^\circ$; В. $\varphi_p(\omega)=170^\circ$.

5.6. В фазосдвигающей RC-цепи ОС (см. рис. 11.2) все сопротивления увеличили в 2 раза. Укажите, как изменится частота генерации f_1 автогенератора.

Ответы:

А. Увеличится в два раза. Б. Уменьшится в два раза.
В. Увеличится в четыре раза. Г. Уменьшится в четыре раза.

5.7. Как изменится частота генерации автогенератора (см. рис. 11.2), если коэффициент усиления усилителя K увеличится в 1,2 раза?

Ответы:

А. Увеличится в 1,2 раза. Б. Уменьшится в 1,2 раза.
В. Увеличится в 1,44 раза. Г. Не изменится.

12. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ LC-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА И ЧЕБЫШЕВА

Цель работы - расчётно-экспериментальное исследование на ПК пассивных LC-фильтров Баттерворта и Чебышева с помощью программы анализа электрических схем EWB.

1. Теоретические сведения

Электрическим фильтром (ЭФ) называется четырёхполюсник (ЧП), пропускающий без ослабления или с малым ослаблением колебания напряжения (тока) одних частот и с большим ослаблением колебания других частот. Они применяются для выделения или подавления определённых колебаний, разделения каналов, формирования спектра сигналов. ЭФ входят в состав многоканальных и радиотехнических систем передачи, измерительной аппаратуры, в каскады радиопередатчиков, радиоприемников и т.п.

Диапазон частот, где рабочее ослабление мало ($A_p \leq \Delta A$), называется полосой пропускания (ПП). Диапазон частот, где рабочее ослабление велико ($A_p \geq A_s$), называется полосой непропускания (ПНП) или задержания (ПЗ).

Под рабочим ослаблением понимается 10 десятичных логарифмов отношения максимальной мощности P_m , которую может отдать генератор с внутренним сопротивлением R_r , т.е. на согласованную нагрузку $R_n = R_r$ (рис.12.1,а) к мощности P_n , которая передаётся в нагрузку R_n через ЧП, на входе которого включён тот же генератор (рис.12.1,б).

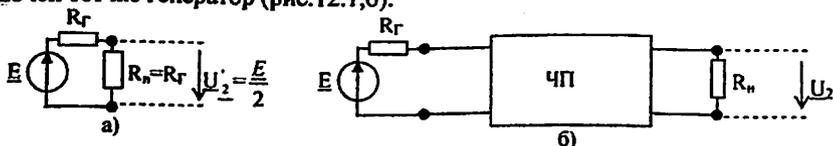


Рис.12.1. К определению рабочего ослабления ЧП: образцовая (эталонная) схема (а), в которой в сопротивлении R_n выделяется максимальная мощность, реальная схема (б), в которой сопротивление R_n включено на выходе ЧП

Рабочее ослабление ЧП (рис.12.1)

$$A_p = 10 \lg \frac{P_m}{P_n} = 10 \lg \frac{E^2 / 4R_r}{U_2'^2 / R_n} = 10 \lg \left(\frac{E}{2U_2'} \right)^2 \left(\frac{R_n}{R_r} \right) = 20 \lg \frac{E}{2U_2} + 10 \lg \frac{R_n}{R_r}, \text{ дБ.}$$

При $R_n = R_r$ и, обозначая вместо A_p просто A , окончательно получим

$$A = 20 \lg \frac{E}{2U_2} = 20 \lg \frac{E}{U_2} - 20 \lg 2 = 20 \lg \frac{E}{U_2} - 6, \text{ дБ.} \quad (12.1)$$

Последняя формула (12.1) удобна при экспериментальном измерении рабочего ослабления.

Требования к частотным характеристикам рабочего ослабления фильтров задаются в виде допустимых пределов изменений этих характеристик. К ним относятся: ΔA – максимально допустимое рабочее ослабление в ПП, дБ;

A_s – минимально допустимое рабочее ослабление в ПЗ, дБ;

f_{c1}, f_{c2} – граничные частоты ПЗ, Гц;

$f_{\Gamma}, f_{r1}, f_{r2}$ – граничные частоты ПП, Гц.

В зависимости от того в каком диапазоне частот располагается ПП и ПЗ различают четыре вида фильтров:

- фильтр нижних частот (ФНЧ): ПП($0 < f < f_r$); ПЗ($f > f_s$) рис.12.2,а;
- фильтр верхних частот (ФВЧ): ПП($f > f_r$); ПЗ($0 > f > f_s$), рис.12.2,б;
- полосовой фильтр (ПФ): ПП($f_{r1} < f < f_{r2}$); ПЗ($0 < f < f_{s1}$, $f > f_{s2}$) рис.12.2,в;
- режекторный фильтр (РФ): ПП($0 < f < f_{r1}$, $f > f_{r2}$); ПЗ($f_{s1} < f < f_{s2}$) рис.12.2,г.

Для ПФ и РФ выполняется условие $f_0 = \sqrt{f_{r1} f_{r2}} = \sqrt{f_{s1} f_{s2}}$. (12.2)

На рис.12.2. показаны требования, предъявляемые к ЭФ при их проектировании.

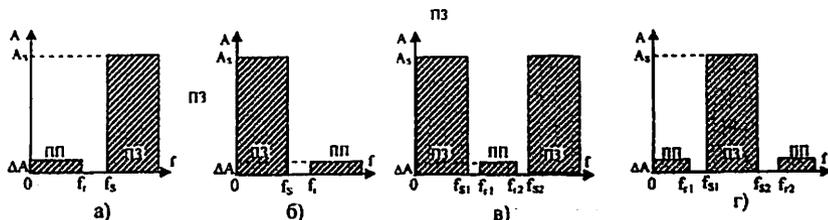


Рис.12.2. Требования к частотным характеристикам рабочего ослабления, предъявляемые при проектировании: ФНЧ(а); ФВЧ(б); ПФ(в); РФ(г)

На рис.12.3 показано обозначаются ЭФ на структурных схемах.

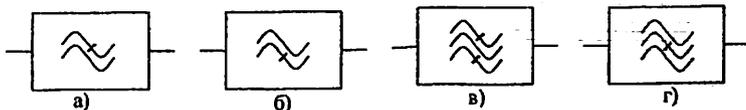


Рис.12.3. Обозначение на структурных схемах: ФНЧ(а); ФВЧ(б); ПФ(в); РФ(г).

Рабочее ослабление фильтров Баттерворта рассчитывается по формуле

$$A = 10 \lg(1 + \Omega^{2n}), \text{ дБ}; \quad (12.3)$$

фильтров Чебышева $A = 10 \lg[1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)]$, дБ, (12.4)

где $\varepsilon = \sqrt{10^{0.1A} - 1}$ – коэффициент неравномерности ослабления в ПП;

Ω – нормированная частота ФНЧП:

- для ФНЧ $\Omega = f/f_r$; для ФВЧ $\Omega = f_r/f$;
- для ПФ $\Omega = (f - f_0^2/f)/(f_{r2} - f_{r1})$; для РФ $\Omega = (f_{r2} - f_{r1})/(f - f_0^2/f)$. (12.5)

- $T_n(\Omega)$ – полином Чебышева порядка n. Ниже приведены шесть первых полинома Чебышева: $T_0(\Omega)=1$; $T_1(\Omega)=\Omega$; $T_2(\Omega)=2\Omega^2-1$; $T_3(\Omega)=4\Omega^3-3\Omega$; $T_4(\Omega)=8\Omega^4-8\Omega^2+1$; $T_5(\Omega)=16\Omega^5-20\Omega^3+5\Omega$. (12.6)

Любой полином Чебышева при $n \geq 2$ может быть вычислен по рекуррентной формуле $T_n(\Omega) = 2\Omega T_{n-1}(\Omega) - T_{n-2}(\Omega)$.

Существует единая тригонометрическая форма записи полиномов Чебышева в интервале $-1 \leq \Omega \leq 1$, соответствующему ПП

$$T_n(\Omega) = \cos n \arccos \Omega. \quad (12.7)$$

Вне указанного интервала $-1 \leq \Omega \leq 1$, соответствующему ПЗ, полином Чебышева также представляется в тригонометрической форме

$$T_n(\Omega) = \operatorname{ch} n \operatorname{arch} \Omega. \quad (12.8)$$

На рис. 12.4 приведены частотные характеристики рабочего ослабления ФНЧ Баттерворта (а) и Чебышева (б).

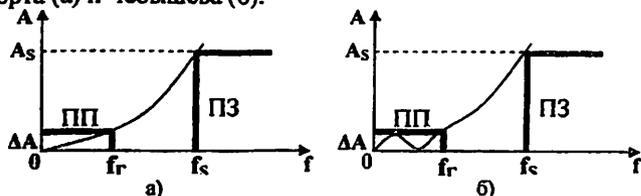


Рис. 12.4. Частотные характеристика рабочего ослабления а) ФНЧ Баттерворта; б) ФНЧ Чебышева

Сравнивая частотные характеристики фильтров Баттерворта и Чебышева, следует указать, что полиномы Чебышева являются полиномами наилучшего приближения. Это означает, что при одинаковом порядке n из всех полиномиальных ЭФ, ослабление которых в ПП не превышает ΔA , наибольшее ослабление в ПЗ A_s имеет фильтр Чебышева. Однако частотная характеристика рабочего ослабления фильтра Баттерворта имеет в ПП монотонный характер и легче поддается корректированию для устранения искажений передаваемых сигналов. Выбор типа ЭФ определяется конкретными условиями их применения в аппаратуре связи.

2. Предварительный расчёт

Для заданного преподавателем типа ЭФ и варианта технических требований (см. табл. 12.1) выполнить расчет ЭФ.

Таблица 12.1

Требования к частотным характеристикам рабочего ослабления $A(f)$ ЭФ

№	Тип ЭФ	ΔA , дБ	A_s , дБ	R, Ом	ФНЧ		ФВЧ		ПФ			РФ		
					f_r	f_s	f_r	f_s	f_{s1}	f_{r1}	f_{r2}	f_{r1}	f_{s1}	f_{s2}
1	Бат.	3	19	50	10	20	20	10	7	10	20	7	10	20
2	Чев.	0,5	21	50	10	20	20	10	7	10	20	7	10	20
3	Бат.	3	16	75	20	40	40	20	15	20	30	15	20	30
4	Чев.	1,0	20	75	20	40	40	20	15	20	30	15	20	30
5	Бат.	3	16	100	30	60	60	30	25	30	40	25	30	40
6	Чев.	2,0	23	100	30	60	60	30	25	30	40	25	30	40
7	Бат.	3,0	17	150	40	80	80	40	35	40	50	35	40	50
8	Чев.	3,0	24	150	40	80	80	40	35	40	50	35	40	50
9	Бат.	3	18	300	50	100	100	50	45	50	50	45	50	50
10	Чев.	2,0	23	300	50	100	100	50	45	50	50	45	50	50

Для ПФ $f_{s2} = f_{r1} f_{r2} / f_{s1}$;

для РФ $f_{r2} = f_{s1} f_{s2} / f_{r1}$.

Последовательность расчета ЭФ Баттерворта и Чебышева

2.1. Определяется нормированная граничная частота ПЗ Ω_S ФНЧ-прототипа (ФНЧП) по формуле: для ФНЧ $\Omega_S = f_r/f_s$; для ФВЧ $\Omega_S = f_s/f_r$;
 - для ПФ $\Omega_S = (f_{S2} - f_{S1})/(f_{r2} - f_{r1})$; для РФ $\Omega_S = (f_{r2} - f_{r1})/(f_{S2} - f_{S1})$.

2.2. Определяется порядок ФНЧП Баттерворта по формуле

$$n \geq A_s / 20 \lg \Omega_s \quad (12.9)$$

Чебышева по формуле

$$n \geq \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0,1 A_s} - 1}{10^{0,1 \Delta A} - 1}}}{\text{Arch} \Omega_s} \quad (12.10)$$

Полученное значение порядка n округляется до ближайшего большего целого значения, которое определяет число реактивных элементов ФНЧП.

2.3. Зная порядок фильтра n , например $n=3$, можно составить две схемы ФНЧП: с Т-образным (см. рис. 12.5,а) и П-образным (см. рис. 12.5,б) входом, которые обеспечивают требуемую частотную характеристику рабочего ослабления ΔA в ПП и A_s в ПЗ.

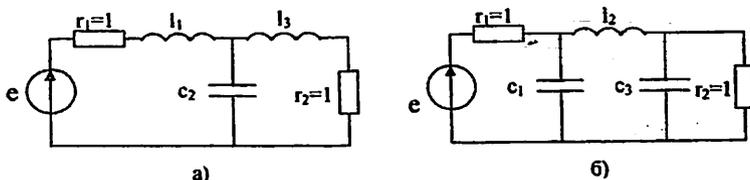


Рис. 12.5 Схема ФНЧП Баттерворта и Чебышева при $n=3$ с Г-образным входом (а) и с П-образным входом (б)

2.4. Определяются нормированные параметры элементов ФНЧП Баттерворта из табл. 12.1, Чебышева – табл. 12.2.

Таблица 12.2

Значения нормированных параметров элементов ФНЧП Баттерворта

n	$c_1 = l_1$	$l_2 = c_2$	$c_3 = l_3$	$c_4 = l_4$	$c_5 = l_5$	$l_6 = c_6$	$c_7 = l_7$	$l_8 = c_8$
1	2,0000							
2	1,4142	1,4142						
3	1,0000	2,0000	1,0000					
4	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654				
5	0,6180	1,6180	1,6180	1,6180	0,6180			
6	0,5176	1,4142	1,9319	1,9319	1,4142	0,5176		
7	0,4450	1,2470	1,8019	2,000	1,8019	1,2470	0,4450	
8	0,3902	1,1111	1,6629	1,9616	1,9616	1,6629	1,1111	0,3902

Таблица 12.3

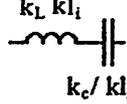
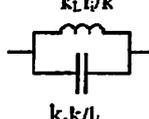
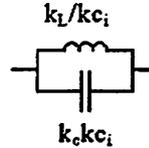
Нормированные параметры элементов ФНЧП Чебышева

ΔA , дБ	Порядок ФНЧП, n	$c_1=c_1$	$\ell_2=c_2$	$c_3=c_3$	$c_4=c_4$	$c_5=c_5$	$\ell_6=c_6$	$c_7=c_7$
0,5	3	1,596	1,097	1,596				
	5	1,706	1,230	2,541	1,230	1,706		
	7	1,737	1,258	2,638	1,344	2,638	1,258	1,737
1,0	3	2,024	0,994	2,024				
	5	2,135	1,091	3,001	1,091	2,135		
	7	2,167	1,112	3,094	1,174	3,094	1,112	3,167
2,0	3	2,711	0,833	2,711				
	5	2,831	0,899	3,783	0,899	2,831		
	7	2,865	0,912	3,877	0,954	3,877	0,912	2,865
3,0	3	3,349	0,712	3,349				
	5	3,481	0,762	4,538	0,762	3,481		
	7	3,519	0,772	4,639	0,804	4,639	0,772	3,519

2.4. Вычерчивают реальную схему электрического фильтра ФНЧ, ФВЧ, ПФ или РФ. Преобразование ФНЧП в реальную схему и расчёт параметров её элементов осуществляется с помощью табл. 12.3.

Таблица 12.3

Преобразование ФНЧП в схему проектируемого фильтра

ФНЧП	ФНЧ	ФВЧ	ПФ	РФ
				
				

2.5. Переход от нормированных параметров ФНЧП к реальным параметрам проектируемого ЭФ осуществляется с помощью коэффициентов денормирования индуктивностей, ёмкостей и сопротивлений k_L , k_C , k_R :

$$k_L = R / (2\pi f_0), \text{ Гн}; \quad k_C = 1 / (2\pi f_0 R), \text{ Ф}; \quad k_R = R, \text{ Ом}; \quad (12.11)$$

$$R = R_1 = R_n, \text{ Ом},$$

$$f_0 = f_r - \text{ для ФНЧ и ФВЧ};$$

$$f_0 = \sqrt{f_{r1} f_{r2}} = \sqrt{f_{s1} f_{s2}} \quad - \text{ для ПФ и РФ}; \quad (12.12)$$

$$k = f_0 / (f_{r2} - f_{r1}) \quad - \text{ для ГФ и РФ} \quad (12.13)$$

2.6. Рассчитать частотную характеристику рабочего ослабления $A(f)$ в ПЗ фильтра Баттерворта по формуле (12.3), Чебышева по формуле (12.4) при нормированных частотах $\Omega = 1; 1,5; \Omega_s = 2,5; 3$. Результаты предварительного расчёта занести в таблицу 12.4. Значения реальных частот определяются по формулам: для ФНЧ $f = \Omega f_r$; для ФВЧ $f = f_r / \Omega$; для ПФ $f_{r2} = \Omega \Delta f / 2 + [(\Omega \Delta f / 2)^2 + f_0^2]^{1/2}$; $f_{r1} = f_0^2 / f_{r2}$; для РФ $f_{r2} = [(\Delta f / 2 \Omega)^2 + f_0^2]^{1/2} + \Delta f / 2 \Omega$; $f_{r1} = f_0^2 / f_{r2}$, где $\Delta f = f_{r2} - f_{r1}$,

f_{r1}, f_{r2} – частоты одинакового ослабления $A(f_{r1}) = A(f_{r2})$.

Для ФНЧ и ФВЧ в таблице 12.4 каждой Ω соответствует одна реальная частота f_r . Для ПФ и РФ в таблице 12.4 каждой Ω соответствуют две реальные частоты – f_{r1} и f_{r2} , на которых рабочее ослабление одинаковое.

Таблица 12.4

Результаты предварительного расчёта и моделирования

Тип ЭФ ...; $A_S = \dots$; $\Delta A = \dots$; $R = \dots$; $f_{r1} = \dots$; $f_{r2} = \dots$; $f_{s1} = \dots$; $f_{s2} = \dots$	Ω	1	1.5	$\Omega_s = \dots$	2.5	3
Нормир. частота	Ω					
Частота	$f, \text{кГц}$					
Расчёт	$A, \text{дБ}$					
Моделирование	$U_2, \text{В}$					
	$A, \text{дБ}$					

3. Выполнение лабораторной работы

3.1. Загрузить с дискетки или с HD текстовый файл **Lb-12.doc** и ознакомиться с содержанием и методикой выполнения лабораторной работы.

Далее производится измерение частотной характеристики рабочего ослабления $A(f)$ заданного фильтра двумя методами: с помощью генератора и вольтметра; с помощью измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Боде плоттера.

3.2. Загрузить в ПК с дискетки или с HD схемный файл **Lb12-1.ewb** в результате чего на экране монитора ПК появится изображение, представленное на рис.12.6.

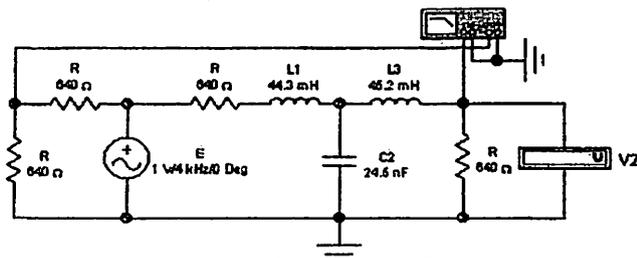


Рис.12.6. Схема для исследования частотной характеристики рабочего ослабления $A(f)$ фильтра

3.3. Вместо схемы ЭФ, представленной на рис.12.6, собрать заданную схему ЭФ и установить численные значения параметров её элементов (R, L_1, L_3, C_2, \dots)

3.4. Измерение частотной характеристики $A(f)$ заданного ЭФ с помощью генератора гармонического напряжения E и цифрового вольтметра V_2 , включённого на выходе фильтра

Установить требуемую первую частоту f , на которой выполнялся предварительный расчёт (см. табл. 12.4). Для этого надо два раза щёлкнуть мышью по изображению генератора E и в открывшемся окне установить требуемую частоту и действующее значение выходного напряжения генератора, после чего щелкнув мышью по ОК, закрыть окно генератора и запустить процесс моделирования. После установления процесса расчёта (моделирования) значение напряжения на выходе ЭФ U_2 (показание вольтметра V_2) занести в табл. 12.4. Аналогичные измерения выполнить на всех остальных частотах, содержащихся в табл. 12.4. Рабочее ослабление ЭФ на всех частотах рассчитывается по формуле $A=20\lg(E/U_2)-6$, дБ и заносится в табл. 12.4. По результатам предварительного расчёта и измерений (моделирования) строятся графики $A(f)$.

3.5. Измерение частотной характеристики $A(f)$ заданного ЭФ с помощью измерителя частотных характеристик (ИЧХ) – бode плоттера

Для измерения частотной характеристики $A(f)$ ЭФ необходимо раскрыть переднюю панель измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Bode Plotter (BP) два раза щёлкнув мышью по его сжатому изображению, затем запустить моделирование в результате на экране ИЧХ появится изображение частотной характеристики $A(f)$ ЭФ (рис.12.7).

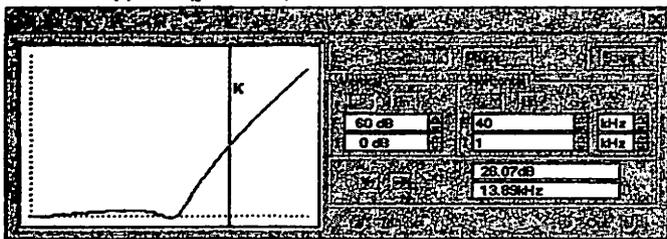


Рис.12.15. Передняя панель Bode Plotter с изображением частотной характеристики $A(f)$ ФНЧ Чебышева при $n=3$ (рис.12.6)

Для измерения $A(f)$ надо щёлкнуть мышью по клавише



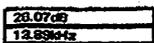
Для измерения $B(f)$ надо щёлкнуть мышью по клавише



Перемещая вертикальный курсор к бode плоттера с помощью мыши и уточняя его положение с помощью двух кнопок со стрелками



устанавливается требуемая частота (её значение видно в нижнем окошечке)



отсчитываем из верхнего окошечка значение рабочего ослабления $A(f) = 26,07$ дБ на этой частоте $f = 13,89$ кГц. Выполнить

измерения рабочего ослабления $A(f)$ заданного ЭФ на всех частотах, на которых был выполнен предварительный расчёт. Результаты измерения $A(f)$ заносятся в табл. 12.4.

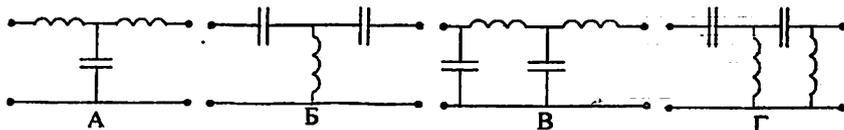
4. Содержание отчёта

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Требования к исследуемому ЭФ.
- 4.3. Предварительный расчёт ЭФ Баттерворта (Чебышева); результаты которого заносятся в табл. 12.4.
- 4.4. Графики рассчитанной и измеренной частотных характеристик рабочего ослабления $A(f)$ заданного ЭФ.
- 4.5. Выводы из результатов расчёта и моделирования на ПЭВМ фильтра Баттерворта (Чебышева).

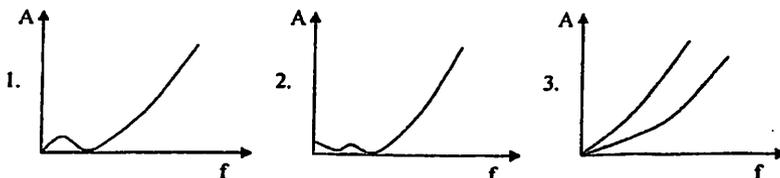
5. Контрольные вопросы

5.1. Укажите схему ФНЧ Баттерворта 4-го порядка

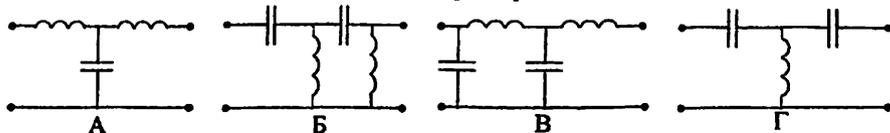
Ответы:



5.2. Установите соответствие между частотными характеристиками и схемами.
Частотные характеристики ослабления:



Схемы фильтров:



Ответы:

А. 1-г	Б. 1-а	В. 1-а	Г. 1-а
2-б	2-в	2-в	2-б
3-а	3-б	3-б	3-б
4-в	4-г	4-а	4-а

5.3. Укажите правильные ответы.

С увеличением порядка фильтра:

- а) увеличивается крутизна характеристики $A(f)$;
 б) уменьшается число элементов; в) улучшается избирательность фильтра;
 г) увеличивается число элементов; д) уменьшается стоимость;
 е) увеличиваются габариты, вес.

Ответы: А. б, в, д; Б. а, з, е; В. а, в, з, е; Г. а, б, д.

5.4. Укажите правильные ответы.

ФНЧ-прототип – это фильтр нижних частот:

- Ответы: а) с сопротивлением $R_H=1$ и частотой f_c ;
 б) с нормированным сопротивлением $r_H=1$ и частотой $\Omega_c=1$;
 в) с сопротивлением $R_H=1$ Ом и частотой $f_c=1$ кГц.

5.5. Укажите достоинства фильтров Баттерворта:

- а) простота схем;
 б) монотонное возрастание частотной характеристики ослабления в ПП ПЗ при увеличении f ;
 в) равноволновая ЧХ ослабления в ПП;
 г) недостаточная крутизна ЧХ ослабления в ПЗ;
 д) всплески ослабления в ПЗ;
 е) хорошая избирательность.

Ответы: А. а, в, е; Б. б, е; В. а, б; Г. а, д, е.

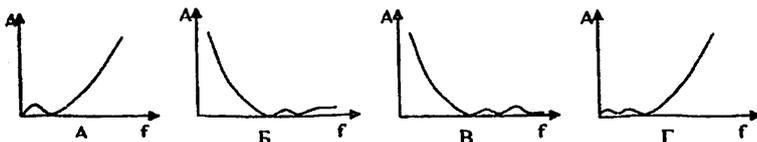
5.6. Укажите достоинства фильтров Чебышева:

- а) простота схем;
 б) монотонное возрастание частотной характеристики ослабления в ПП и ПЗ при увеличении f ;
 в) равноволновая ЧХ ослабления в ПП;
 г) всплески ослабления в ПЗ;
 д) малое ослабление в ПП;
 е) крутизна ЧХ ослабления в ПЗ при увеличении частоты f .

Ответы: А. а, д, е; Б. а, б, е; В. б, д, е; Г. в, д, е.

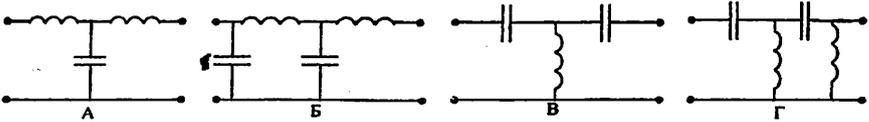
5.7. Укажите частотную характеристику ФВЧ Чебышева при $n=4$.

Ответы:



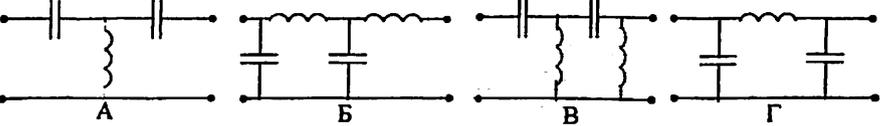
5.8. Определите порядок и укажите схему фильтра, удовлетворяющего требованиям: $f_c = 2$ кГц, $f_s = 1$ кГц, $\Delta A = 7$ дБ, $A_s = 15$ дБ.

Ответы:



5.9. Определите порядок и укажите схему фильтра, удовлетворяющего требованиям: $f_c = 1$ кГц, $f_s = 2$ кГц, $\Delta A = 3$ дБ, $A_s = 23$ дБ.

Ответы:



5.10. Как изменится ЧХ ослабления фильтра (рис. 12.4), если увеличить сопротивление R по сравнению с номинальным?

Ответы:

- а) увеличится крутизна в ПЗ;
- б) уменьшится крутизна в ПЗ;
- в) не изменится;
- г) из равноволновой превратится в монотонную ЧХ в ПП.

5.11. Как изменится ЧХ ослабления фильтра (рис. 12.4), если уменьшить значение ёмкости C_H ?

Ответы:

- а) увеличится крутизна в ПЗ;
- б) уменьшится крутизна в ПЗ;
- в) не изменится;
- г) из равноволновой превратится в монотонную ЧХ в ПП.

13. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Цель работы - экспериментальное исследование на ПЭВМ с помощью программы EWB нелинейных электрических цепей (однополупериодного выпрямителя, ограничителей мгновенных значений напряжения и компараторов), построенных на основе ПП диодов, стабилитронов и операционных усилителей (ОУ) при синусоидальном воздействии.

1. Теоретические сведения

Нелинейными электрическими цепями (НЭЦ) называются такие электрические цепи (ЭЦ), которые содержат хотя бы один нелинейный элемент (НЭ).

В двухполюсном НЭ основной параметр (сопротивление, индуктивность, ёмкость) зависит от величины и полярности приложенного к нему напряжения, или тока, протекающего через него. Нелинейный резистивный элемент (НРЭ) характеризуется зависимостью тока от напряжения на его зажимах $i(u)$, т.е. его вольтамперной характеристикой (ВАХ). НРЭ, обладающий односторонней проводимостью, называется электрическим вентиляем. Односторонней проводимостью обладают медно-закисные, селеновые, германиевые, кремниевые и другие полупроводниковые вентиля (диоды), электронные лампы всех типов и газонаполненные лампы (газотроны, тиратроны).

В четырёхполюсном НЭ (электронной лампе, транзисторе, ОУ), основной характеристикой является зависимость выходного напряжения от величины и полярности входного напряжения (передаточная характеристика).

Ниже будут рассмотрены различные НЭЦ с использованием полупроводниковых диодов и стабилитронов (выпрямители, ограничители мгновенных значений напряжений) и на базе операционных усилителей (компараторы).

ВАХ полупроводникового диода (рис. 13.1,а) можно приближённо заменить отрезками прямых линий (кусочно-линейная аппроксимация) (рис. 13.1,б, в).



Рис. 13.1. ВАХ полупроводникового диода (а), его кусочно-линейная аппроксимация ВАХ (б), ВАХ идеального вентиля (в), схема замещения полупроводникового диода (г)

ВАХ рис.13.1,б соответствует схема замещения рис.13.1, г, состоящая из последовательного соединения идеального вентиля VD и сопротивления R . Под идеальным вентиляем понимается такое двухполюсное устройство, сопротивление которого при положительном напряжении равно нулю, а при отрицательном - бесконечности. Его ВАХ представлена на рис. 13.1,в. При уменьшении сопротивления R будет увеличиваться наклон (угол α) ВАХ (рис.13.1,б).

При синусоидальной форме входного напряжения $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ кривая тока i в цепи (рис. 13.2,г) может быть получена графическим способом (рис. 13.2,в). При Γ ложительных полуволнах входного на-пряжения вентиль VD

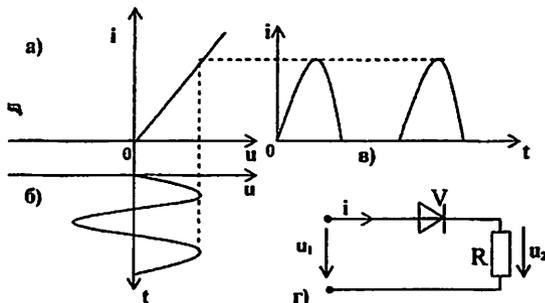


Рис. 13.2. Схема однополупериодного выпрямителя (г), ВАХ диода (а), напряжение на входе (б) и выходе (в) выпрямителя

пропускает ток, и напряжение на нагрузке u_2 будет меньше входного напряжения на величину падения напряжения на открытом диоде. При отрицательных полуволнах входного напряжения u_1 , сопротивление вентиля VD практически равно бесконечности и ток в цепи i близок к нулю и, следовательно, напряжение на нагрузке $u_2 \approx 0$. Таким образом, напряжение на нагрузке u_2 будет иметь форму периодической последовательности полусинусоидальных импульсов (рис.13.2,в) и схема с диодом (рис.13.2,г) является однополупериодным выпрямителем.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения параллельно сопротивлению нагрузки R подключается ёмкость C (рис.13.3,а), выполняющая роль сглаживающего электрического фильтра.

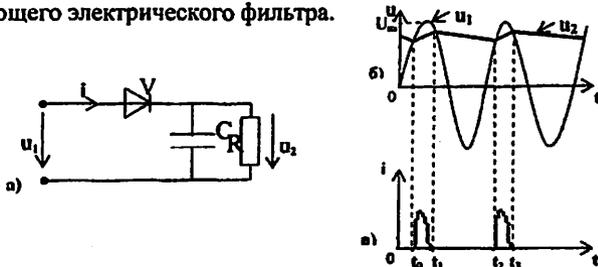


Рис. 13.3. Схема однополупериодного выпрямителя (а), графики напряжений на входе u_1 и выходе u_2 (б), тока i в диоде (в)

В установившемся режиме при положительных полуволнах входного напряжения в интервалах времени (t_0-t_1) , (t_2-t_3) диод открыт, через него протекает ток, подзаряжающий ёмкость C и увеличивающий напряжение на ней. В моменты времени t_1 , t_3 входное напряжение становится равным напряжению на ёмкости диод VD закрывается и она начинает разряжаться на сопротивление нагрузки R (рис. 13.3,б). Разряд ёмкости происходит до того момента t_0 , t_2 , когда напряже-

ние на диоде $u_d = u - u_c$ снизится до нуля и вентиль снова начинает пропускать ток. Далее ёмкость снова начинает подзарядаться и процесс повторяется. Чем больше ёмкость C и сопротивление R , тем меньше переменная составляющая напряжения (пульсация) на нагрузке.

Нелинейные свойства ПП диодов можно использовать для построения на их основе различных схем ограничителей напряжения (рис. 13.4, а, б, в).

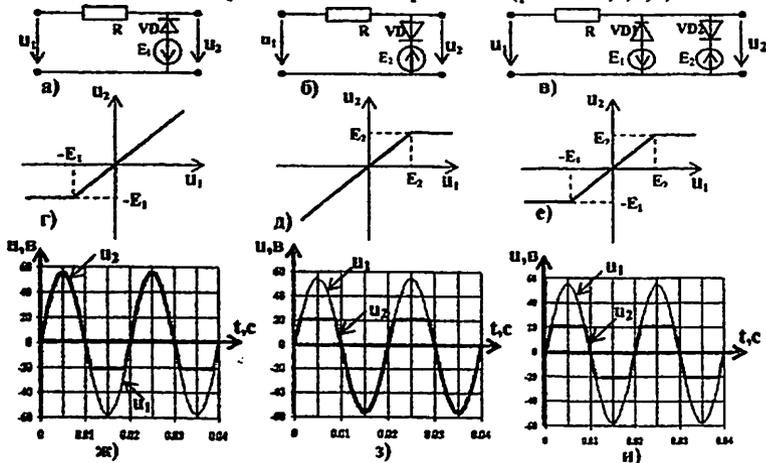


Рис. 13.4. Схемы ограничителей напряжения на ПП диодах (а, б, в), передаточные характеристики (г, д, е), напряжения на входе и выходе (ж, з, и)

Если амплитудное значение входного напряжения U_{1m} не превышает $|E_1|$ и $|E_2|$, то цепь (рис. 13.5, а, б, в) работает в линейном режиме и выходное напряжение повторяет форму входного напряжения (рис. 13.5, в). При увеличении входного напряжения u_1 в схеме (рис. 13.4, а) происходит ограничение выходного напряжения u_2 снизу (рис. 13.4, ж), в схеме (рис. 13.4, б) - сверху (рис. 13.4, з) и в схеме (рис. 13.4, в) сверху и снизу (рис. 13.4, и). В двухстороннем ограничителе (см. рис. 13.4, в) напряжение на выходе u_2 ни при каком значении входного напряжения u_1 не может быть больше напряжения ограничителя.

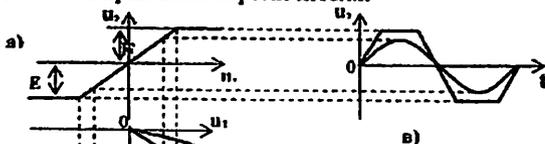


Рис. 13.5. Передаточная характеристика двухстороннего ограничителя (а), напряжение на его входе (б) и выходе (в)

С помощью двустороннего ограничителя (рис. 13.4, в) напряжение гармонической формы можно преобразовать в напряжение трапецеидальной (рис. 13.6, б) или близкой к прямоугольной форме. Чем больше амплитуда входного напря-

жения U_{1m} , тем при прочих равных условиях форма выходного напряжения u_2 ближе к прямоугольной (рис. 13.6,в).

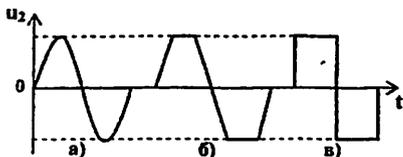


Рис. 13.6. Форма напряжения на выходе ограничителя u_2 при различных амплитудах напряжения на его входе : $U_{1m} \leq E$ (а), $U_{1m} > E$ (б), $U_{1m} \gg E$ (в)

Существенным недостатком ограничителей на ПП диодах (рис.13.4,а,б,в) является необходимость введения в них источников постоянного напряжения E_1 , E_2 , определяющих уровень ограничения. Используя стабилитроны, имеющие ВАХ (рис.13.7) и выпрямительные ПП диоды, можно построить схемы ограничителей без дополнительных источников напряжения (рис.13.8)

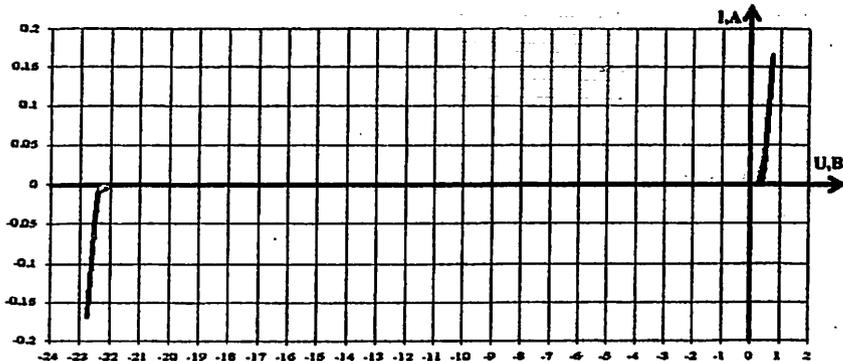


Рис.13.7. ВАХ стабилитрона типа 1N969В, имеющего $U_{ст} = 22,08$ В

В этих схемах уровень ограничения определяется напряжением стабилизации стабилитронов $U_{ст}$. Они имеют такие же передаточные характеристики, что и ограничители на ПП диодах с источниками напряжения (см. рис.13.4,г,д,е)

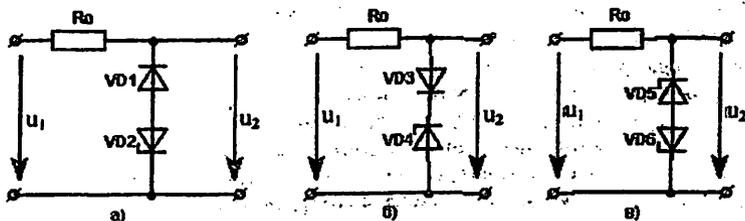


Рис.13.8. Схемы ограничителей напряжения на стабилитронах и ПП диодах: снизу (а), сверху (б), сверху и снизу (в)

В настоящее время широкое применение находят устройства, использующие нелинейные свойства ОУ. Примером устройства такого типа являются компараторы, осуществляющие сравнение входного напряжения u_1 с опорным напряжением U_0 . Простейшая схема компаратора на неинвертирующем ОУ представлена на рис. 13.9,а.

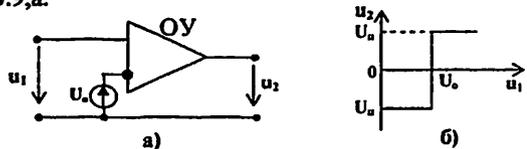


Рис. 13.9. Схема (а) и передаточная характеристика (б) компаратора на неинвертирующем ОУ

При достижении входным напряжением $u_1(t)$ уровня опорного напряжения U_0 происходит изменение полярности напряжения на выходе ОУ от значения $-U_n$ до $+U_n$ (рис. 13.10,б). Здесь U_n немного меньше напряжения источника питания ОУ и для данной модели ОУ имеет значение $U_n \approx \pm 20$ В.

Обычный ОУ без источников смещения ($U_0=0$) можно использовать в качестве компаратора, преобразующего напряжение синусоидальной формы в периодическую последовательность биполярных прямоугольных импульсов (рис.13.11).

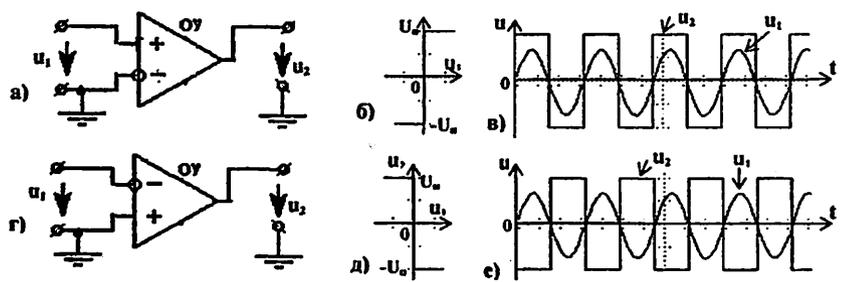


Рис.13.11. Компаратор на неинвертирующем ОУ(а), его передаточная характеристика (б), напряжение на входе и выходе (в); компаратор на инвертирующем ОУ(г), его передаточная характеристика (д), напряжение на входе и выходе (е)

Такой способ формирования прямоугольных импульсов совершеннее, чем способ ограничения синусоидальных сигналов с помощью диодных ограничителей, поскольку при этом не требуется больших входных напряжений, и на выходе которых формируются мощные импульсы с достаточно крутыми фронтами и большой амплитудой $U_m \approx U_n$. Изменяя частоту входного напряжения, можно изменять период выходных прямоугольных импульсов напряжения.

Рассмотренные НЭЦ находят широкое применение в аналоговых и цифровых системах передачи, а также в измерительной технике.

2. Выполнение работы

2.1. Исследование ВАХ ПП диода и стабилитрона

Загрузить виртуальную лабораторию – программу EWB с HD или лазерного диска. Загрузить текстовый файл Lb13.doc и ознакомиться с содержанием и методикой выполнения лабораторной работы.

Загрузить схемный файл Lb 13-1.ewb, в результате чего на экране монитора появится схема (рис.13.12,а) для исследования ВАХ ПП диода. На схеме

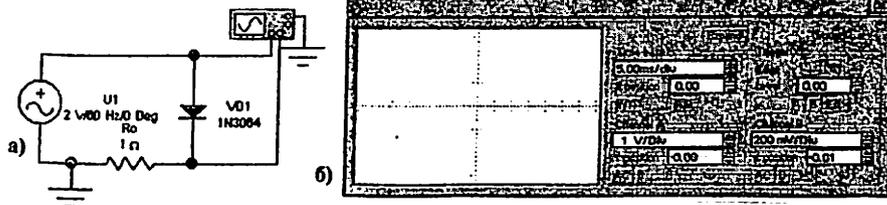


Рис.13.12. Схема для исследования ВАХ ПП диода 1N3064(а), передняя панель двухканального осциллографа (б)

(рис.13.12,а) к первому А-входу осциллографа подведено напряжение на диоде, приблизительно равное выходному напряжению генератора гармонического напряжения ($U=2$ В, $f=60$ Гц). Ко второму (В-входу) – напряжение, с сопротивления $R_0=1$ Ом, пропорциональное току диода (1 мВ = 1 мА). Два раза щёлкнув левой клавишей мыши по сжатому изображению осциллографа, раскроем переднюю панель двухканального осциллографа (рис.13.12,б). Запустить процесс расчёта (моделирования), щёлкнув мышью по значку  , расположенному в правом верхнем углу рабочего поля монитора, в результате чего на экране осциллографа появится изображение ВАХ диода (рис.13.13).

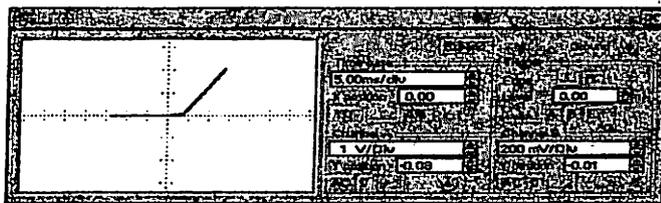


Рис.13.13. Передняя панель осциллографа с изображением ВАХ диода 1N3064

Спустя 3-5 сек желательно приостановить процесс моделирования, щёлкнув мышью по клавише  . Зная масштаб по горизонтали (1 В/дел) и по вертикали (200 мА/дел), можно измерить с экрана осциллографа ВАХ диода. Более точное измерение ВАХ диода можно получить, щёлкнув мышью по клавише  на передней панели осциллографа. В результате произойдёт максимальное раскрытие передней панели осциллографа (рис.13.14). Перемещая с помощью мыши левый (красный) и правый (синий)

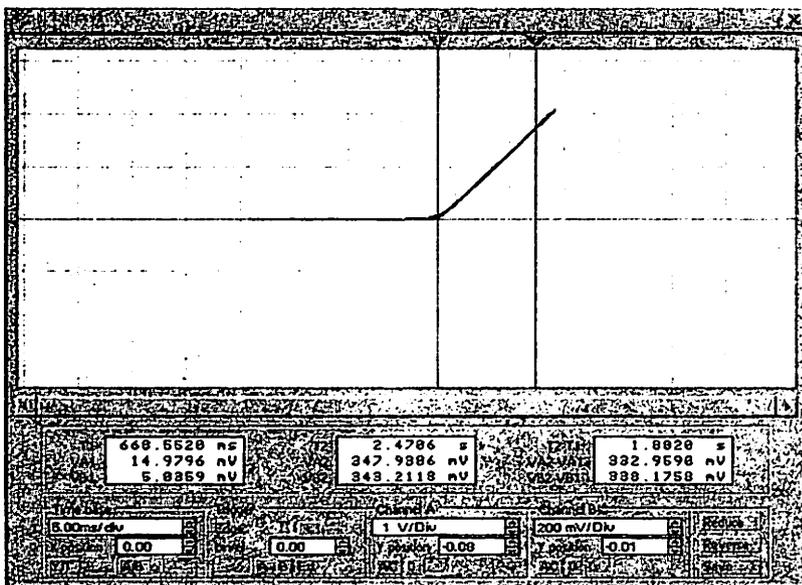


Рис.13.14. Максимально-раскрытая передняя панель осциллографа с ВАХ диода 1N3064

вертикальные линии-маркёры , и снимая отсчёты соответствующих значений напряжений и токов из окошек VA1, VB1, VA2, VB2, VA2-VA1, VB2-VB1, можно с большой точностью измерить ВАХ диода. Для возврата к среднему раскрытию передней панели осциллографа (рис.13.13) достаточно щёлкнуть мышью по клавише  , расположенной на передней панели осциллографа.

Для исследования ВАХ стабилитрона необходимо загрузить схемный файл Lb 13-1b.ewb в результате чего на рабочем поле монитора появится схема для исследования ВАХ стабилитрона, изображённая на рис.13.15,а. На этой схеме, в отличие от схемы для исследования ПП диода (рис.13.12,а), последовательно с источником гармонического напряжения U1 включён дополнительный

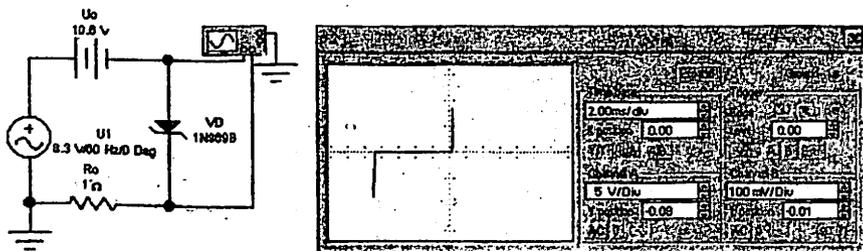


Рис.13.15. Схема для исследования ВАХ стабилитрона (а), передняя панель осциллографа с ВАХ стабилитрона 1N969В ($U_{cr}=22,08 В$)

источник постоянного напряжения $U_0=10,8$ В, создающий отрицательное смещение. Подбирая величины U_1 и U_0 , можно добиться практически одинаковых значений прямого и обратного тока через стабилитрон. При отсутствии дополнительного источника постоянного напряжения U_0 к стабилитрону со стороны генератора гармонического напряжения U_1 будет прикладываться чрезмерно большое прямое напряжение ($U > U_{ст}$), и будет наблюдаться его большая перегрузка.

Далее процесс исследования ВАХ стабилитрона ничем не отличается процесса исследования ВАХ ПП диода.

2.2. Исследование однополупериодного выпрямителя на ПП диоде

Загрузить схемный файл Lb 13-2.ewb в результате чего на рабочем поле монитора появляется схема однополупериодного выпрямителя (рис.13.16,а) без фильтровой ёмкости. После раскрытия передней панели осциллографа и запуска схемы на расчёт на экране осциллографа (рис.13.16,б) появляются графики напряжения на входе u_1 (красная линия) и выходе u_2 (чёрная линия) выпрямителя.

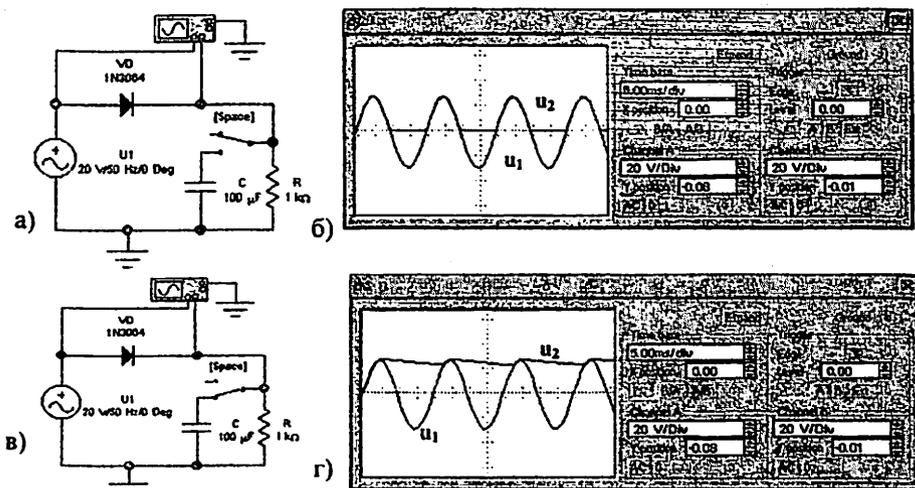


Рис.13.16. Схема однополупериодного выпрямителя без фильтровой ёмкости(а), передняя панель осциллографа, на экране которого видны напряжения на его входе u_1 и выходе u_2 (б); схема выпрямителя с подключённой фильтрующей ёмкостью C (в), передняя панель осциллографа, на экране которого видны напряжения на его входе u_1 и выходе u_2 (г)

Для подключения ёмкости параллельно нагрузке достаточно на клавиатуре нажать клавишу «пробел» в результате чего ключ «Space» перейдёт из разомкнутого состояния (см. рис.13.16,а) в замкнутое (см. рис.13.16,в).

Срисовать поточнее схемы выпрямителей (рис.13.16,а,в) и напряжения на входе u_1 и выходе u_2 с экрана осциллографа (рис.13.16,б,г) с соблюдением масштаба при двух значениях фильтровой ёмкости $C=100$ мкФ и $C=200$ мкФ

Обратить внимание на уменьшение пульсаций при увеличении фильтровой ёмкости.

2.3. Исследование ограничителей напряжения на ПП диодах

Загрузить схемный файл Lb 13-3.ewb в результате чего рабочем поле программы EWB появится схема для исследования ограничителя напряжения снизу на ПП диодах (рис.13.17,а). С помощью клавиши «пробел» и буквенной клавиши «к» можно получить схему ограничителя напряжения сверху (рис.13.17,б), сверху - снизу (рис.13.17,в).

Для получения на экране осциллографа передаточной характеристики ограничителя (см. рис.13.17,г,д,е) перед пуском программы на расчёт надо щёлкнуть мышью по клавише **Alt**, расположенной на передней панели осциллографа.

Для получения на экране осциллографа напряжения на входе u_1 и выходе u_2 каждого из ограничителей (см. рис.13.17,ж,з,и) перед пуском программы на расчёт надо щёлкнуть мышью по клавише **Ctrl**, расположенной на передней панели осциллографа.

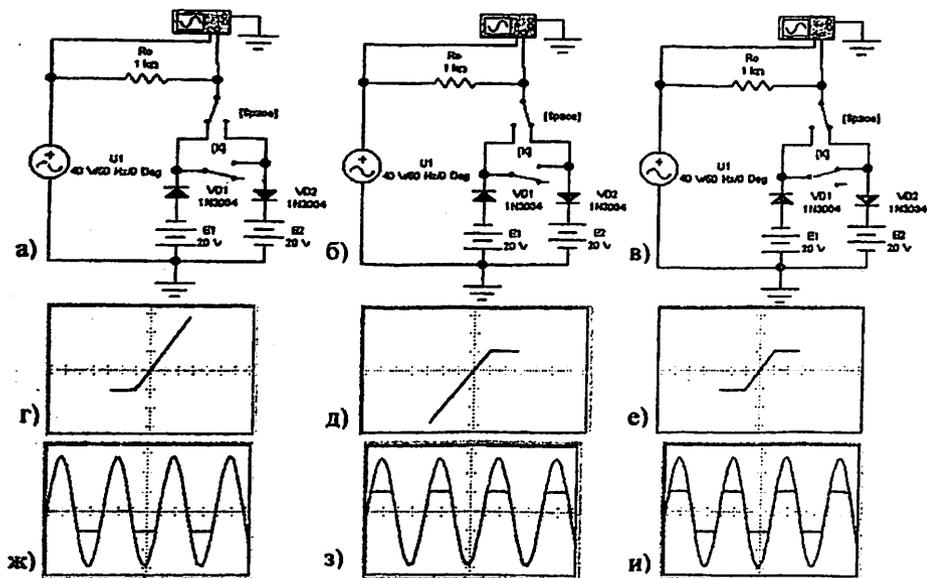


Рис.13.17. Схемы ограничителей напряжения на ПП диодах (а,б,в), осциллограммы их передаточных характеристик (г,д,е) и осциллограммы напряжения на входе и выходе ограничителей (ж,з,и)

2.4. Исследование ограничителей напряжения на ПП диодах и стабилитронах

Загрузить схемный файл Lt 13-4.ewb в результате чего в рабочем поле программы EWB появится схема для исследования ограничителя напряжения снизу на ПП диодах и стабилитронах (рис.13.18,а). С помощью клавиши «пробел»-«Space» и буквенной клавиши «К» можно получить схему ограничителя напряжения сверху (рис.13.17,б) (К-слева, Space-справа), сверху - снизу (рис.13.18,в) (К-справа). Методика исследования ограничителей напряжения снизу на ПП диодах и стабилитронах ничем не отличается от рассмотренной выше методики исследования ограничителей напряжения на ПП диодах.

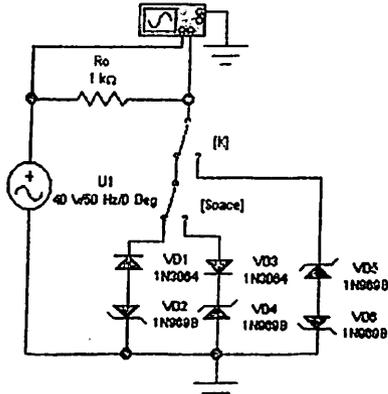


Рис. 13.18. Схема исследования ограничителей на ПП диодах и стабилитронах

2.5. Исследование компараторов на ОУ

Загрузить схемный файл Lb 13-5.ewb, в результате чего на рабочем поле программы EWB появится схема для исследования компараторов - на ОУ (рис.13.19,а).

Ко входу «А» осциллографа подводится входное напряжение компаратора.

В левом положении ключа «Space» ко входу «В» осциллографа подводится напряжение с выхода компаратора на неинвертирующем ОУ (рис.13.19,а), в правом - напряжение с выхода компаратора на инвертирующем ОУ (рис.13.19,в). На рис.13.19,б,г приведены осциллограммы напряжений на входе и выходе компараторов.

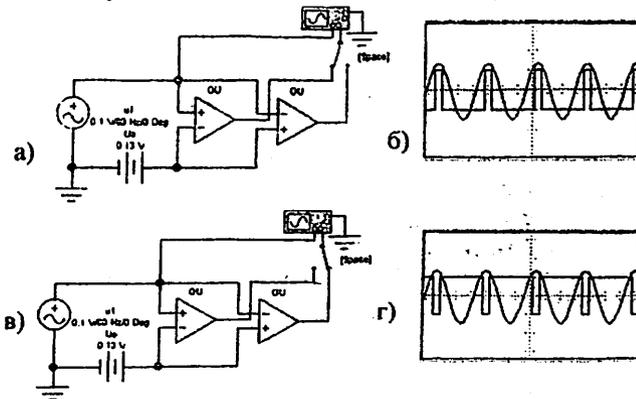


Рис. 13.19. Схема компаратора на неинвертирующем ОУ (а), и напряжение на его входе и выходе (б); схема компаратора на инвертирующем ОУ (в) и напряжение на его входе и выходе (г)

Срисовать схемы и осциллограммы напряжений на входе u_1 и выходе u_2 компараторов (рис.13.19,а,в).

Простейшие схемы компараторов на неинвертирующем и инвертирующем ОУ без источника опорного (сравнивающего) напряжения ($U_0=0$) (рис.13.11,а,г), преобразующие гармоническое напряжение в периодическую последовательность биполярных прямоугольных импульсов (рис.13.11,в,е), появятся на экране монитора ПЭВМ после загрузки схемного файла Lb 13-6.ewb (см. рис.13.20,а,в).

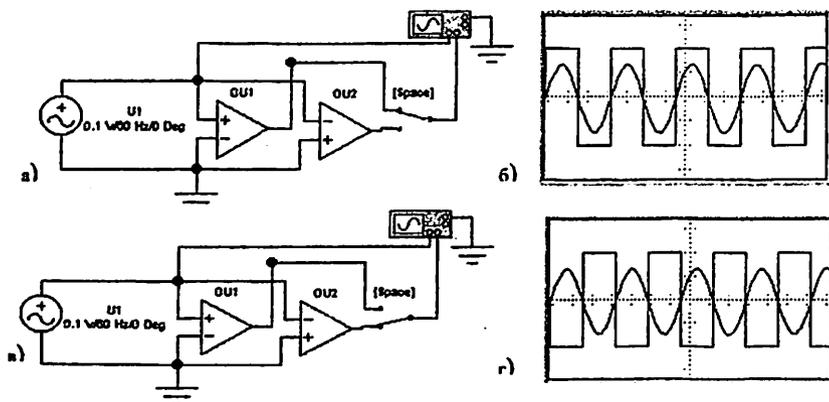


Рис. 13.20. Схема компаратора на неинвертирующем ОУ (а), и напряжения на его входе и выходе (б); схема компаратора на инвертирующем ОУ (в) и напряжения на его входе и выходе (г)

Срисовать схемы и осциллограммы напряжений на входе u_1 и выходе u_2 компараторов (рис.13.19,б,г) компараторов (рис.13.19,а,в).

3. Обработка результатов измерений

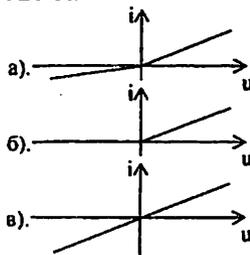
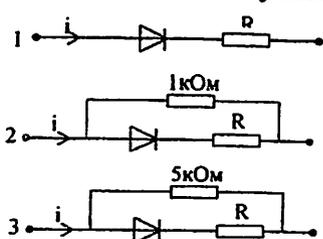
3.1. Сравнить токи в цепи при разных ВАХ. Сделать вывод о зависимости формы тока от вида ВАХ цепи.

3.2. Дать объяснение изменению формы ВАХ исследуемой цепи, если параллельно вентилю включить линейный резистор.

3.3. Сравнить форму кривых, полученных на выходе двустороннего ограничителя и компаратора.

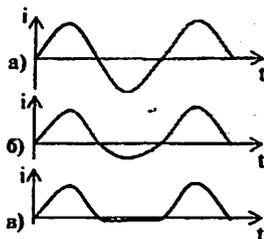
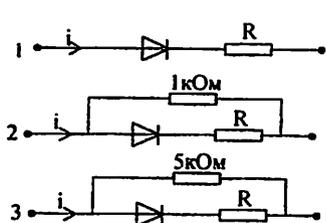
4. Контрольные вопросы

4.1. Установить соответствие между схемами и ВАХ.



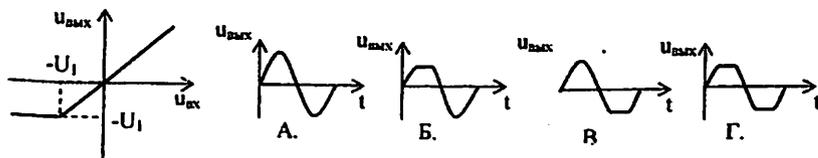
Ответы: А. 1-а, 2-в, 3-б. Б. 1-б, 2-а, 3-в. В. 1-б, 2-в, 3-а. Г. 1-в, 2-а, 3-б.

4.2 Установите соответствие между схемами и $i(t)$, если к ним прикладывается синусоидальное напряжение.

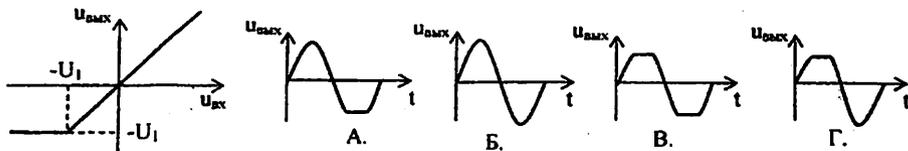


Ответы: А. 1-в, 2-б, 3-а; Б. 1-в, 2-а, 3-б; В. 1-а, 2-б, 3-в; Г. 1-а, 2-в, 3-б.

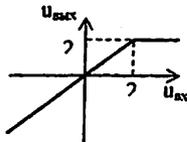
4.3. Укажите график выходного напряжения при $u_{вх} = U_m \sin \omega t$ и заданной ВАХ цепи, если $|U_m| < |U_I|$



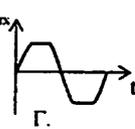
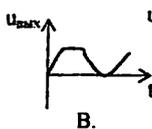
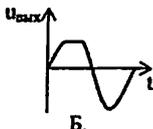
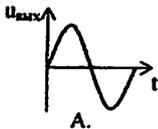
4.4. Укажите график выходного напряжения $u_{вых}$ при $u_{вх} = U_m \sin \omega t$ и заданной ВАХ цепи, если $|U_m| > |U_I|$



4.5. К нелинейному элементу с заданной ВАХ приложено напряжение $u_{вх} = U_m \sin \omega t$. Установите соответствие между величиной порога ограничения и сигналом на входе.



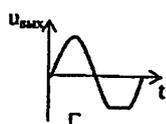
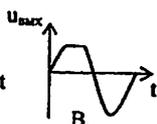
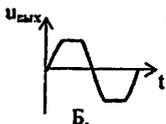
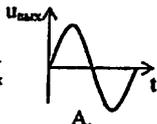
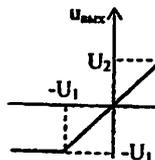
1. $|U_m| > |U_1|$.
2. $|U_m| < |U_1|$.



Ответы: А. 1-б, 2-а. Б. 1-а, 2-б. В. 1-в, 2-б. Г. 1-а, 2-в.

4.6. К нелинейному элементу с заданной ВАХ приложено напряжение $u_{вх} = U_m \sin \omega t$. Установите соответствие между величинами порогов и входным сигналом.

1. $|U_1| > |U_m|, |U_2| > |U_m|$
2. $|U_1| > |U_m|, |U_2| < |U_m|$
3. $|U_1| < |U_m|, |U_2| > |U_m|$
4. $|U_1| < |U_m|, |U_2| < |U_m|$



Ответы: А. 1-б, 2-в, 3-г, 4-а. Б. 1-а, 2-в, 3-б, 4-г.
В. 1-а, 2-в, 3-г, 4-б. Г. 1-б, 2-а, 3-б, 4-г.

4.7. Какое напряжение необходимо подать на вход двухстороннего ограничителя с порогами ограничения снизу U_1 и сверху U_2 , чтобы получить напряжение, близкое к прямоугольной форме?

- Ответы: А. $|U_1| > |U_m|, |U_2| > |U_m|$. Б. $|U_1| < |U_m|, |U_2| < |U_m|$.
В. $|U_1| \ll |U_m|, |U_2| \ll |U_m|$. Г. $|U_1| \gg |U_m|, |U_2| \gg |U_m|$.

4.8. Как изменится период напряжения на выходе компаратора, если частоту входного напряжения увеличить в три раза?

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

4.9. Установите соответствие между изменениями опорного и выходного напряжений компаратора.

Опорное напряжение

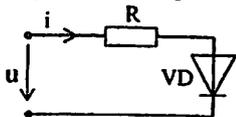
1. Увеличится.
2. Уменьшится.

Выходное напряжение компаратора

- а. Не изменится.
- б. Увеличится. в. Уменьшится.

Ответы: А. 1-б, 2-в; Б. 1-а, 2-а; В. 1-в, 2-б; Г. 1-б, 2-а.

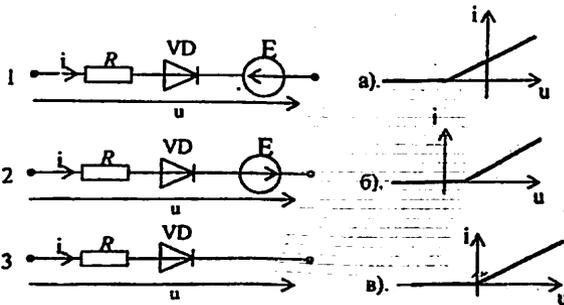
4.10. Определите амплитудное значение приложенного напряжения, если при амплитудном значении прямого тока $I_n=14,1$ А на диоде падает напряжение 1 В и сопротивлен ε резистора $R=10$ Ом.



$$u = U_m \sin \omega t$$

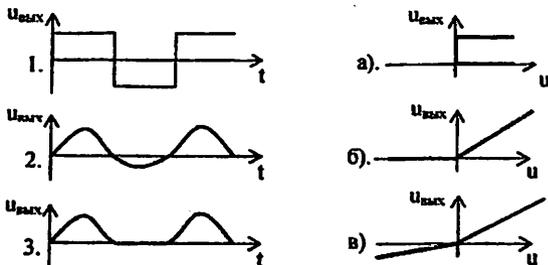
- Ответы: А. 141 В;
 Б. 142 В;
 В. 100 В;
 Г. 200 В.

4.11. Установите соответствие между схемами и ВАХ, считая вентиль идеальным.



- Ответы: А. 1-а, 2-б, 3-в. Б. 1-а, 2-в, 3-б. В. 1-б, 2-в, 3-а. Г. 1-б, 2-а, 3-в.

4.12. Установите соответствие между входным сигналом и передаточной характеристикой цепи при $u_{вх}=U_m \sin \omega t$.



- Ответы: А. 1-б, 2-в, 3-а. Б. 1-а, 2-в, 3-б. В. 1-а, 2-б, 3-в. Г. 1-в, 2-б, 3-а.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Работа с виртуальными осциллографом и Vode plotter в системе EWB

П1. 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.

- 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.
- 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 «AC», или «0», или «DC», расположенных в нижней части панели каждого канала.

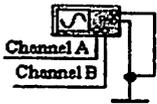


Рис.П.1

Режим «AC» предназначен для наблюдения только сигналов переменного

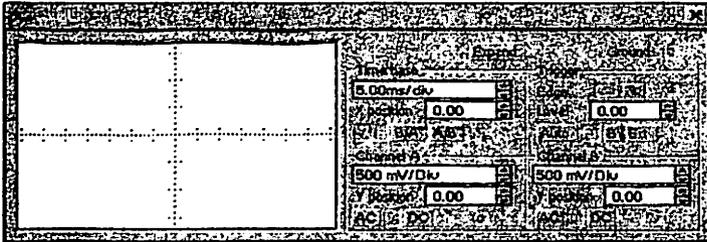


Рис.П.2

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 постояннóго, 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 $0.1 \text{ ns/div} - 1.0 \text{ s/div}$. 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 появиться 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 такого 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) – увеличился 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.

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 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.

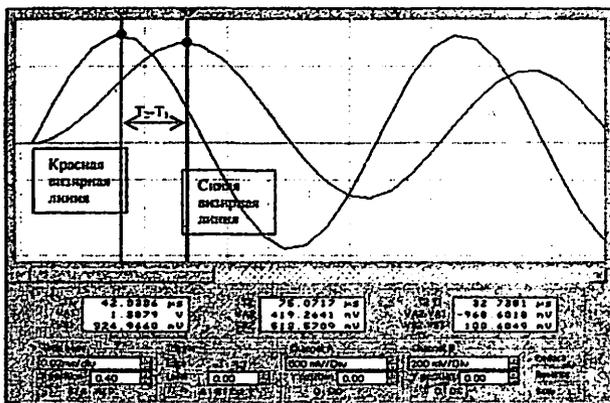


Рис.П.3

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

$$\varphi(f_k) = -(T_2 - T_1) f_k \cdot 360^\circ \text{ [градусы]}.$$

П2. Правила работы с измерителем частотных характеристик - «Bode plotter»

Кнопка Измерителя АЧХ-ФЧХ находится в библиотеке Instruments рабочего окна программы. На рис.П.4 показано условное обозначение измерителя и назначение внешних полюсов прибора также способ подключения его к исследуемой схеме. Измеритель предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке



Рис П.4

MAGNITUDE), включена по умолчанию) и ФЧХ (при нажатой кнопке PHASE) характеристик. На рис.П.5 показана передняя панель измерителя в режиме измерения АЧХ (VERTICAL) — на панели расположен два канала: по оси Y (HORIZONTAL) — 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.

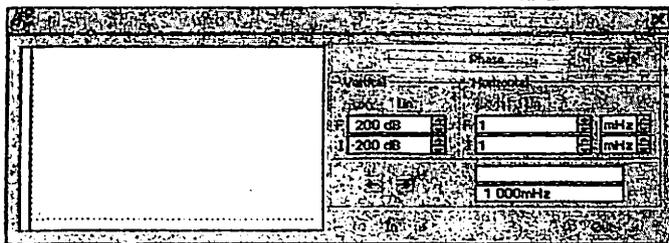


Рис. П.5

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 на чертеже 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 подключаются соответственно ко входу и выходу схемы, а правые — к общей шине. ВНИМАНИЕ: Чтобы измеритель работал необходимо к входу устройства (схемы) подключить функциональный генератор или другой источник переменного напряжения с минимальным входным сопротивлением. При этом других каких-либо настроек в этих источниках не требуется.

ЛИТЕРАТУРА .

1. Лабораторный практикум по теории электрических цепей, часть 1 (в компьютерном классе с использованием программы Electronics Workbench). Составитель Козлов В.А. Ташкент.: ТУИТ, 2004.-65 с.
2. Лабораторный практикум по теории электрических цепей, часть 2 (в компьютерном классе с использованием программы Electronics Workbench). Составитель Козлов В.А. Ташкент.: ТУИТ, 2005.-76 с.
3. 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.
4. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учебник для вузов. М., «Энергия», 1969.- 424 с.
5. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов. –М.: Радио и связь, 1989. - 528 с.
6. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей.-М.: Радио и связь. 1986. - 544 с.
7. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи.-М.: 1981. - 334 с.
8. Попов В.П. Основы теории цепей. - М.: Высшая школа. 1985.-496 с.
9. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей.-М.: Энергия. 1975.-752 с.
10. Толстов Ю.Г., Теврюков А.А. Теория электрических цепей. Учеб. пособие для электротехнич. и радиотехн. специальностей вузов. М., «Высшая школа», 1971. – 296 с.
11. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей: Учеб. для вузов.- М.: Высш. шк., 1987. – 512 с.
12. Кушнир В.Ф., Ферсман Б. А. Теория нелинейных электрических цепей. Учебник для электротехнических институтов связи. М., «Связь», 1974.–384 с.
13. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. М., «Связь», 1972.- 323 с.
14. 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.

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.....	19
4. Исследование RL- и RC- цепей при гармоническом воздействии.....	24
5. Исследование резонанса в последовательном колебательном контуре.....	31
6. Исследование ЛЭЦ при периодическом несинусоидальном воздействии.....	39
7. Исследование переходных процессов в RL- и RC-цепях.....	45
8. Исследование дифференцирующих цепей	54
9. Исследование интегрирующих цепей	62
10. Исследование операционного усилителя с цепью обратной связи.....	73
11. Исследование RC- автогенераторов на операционном усилителе.....	87
12. Исследование пассивных LC- фильтров Баттерворта и Чебышева.....	100
13. Исследование нелинейных электрических цепей при гармоническом воздействии.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ. Работа с осциллографом и Bode plotter в системе EWB	124
П1. Правила работы с двухканальным осциллографом.....	124
П2. Правила работы с измерителем частотных характеристик-«Bode plotter».....	127
Литература.....	128
Содержание.....	129

Лабораторный практикум
по дисциплине
«Теория электрических цепей»
с использованием программы
«Electronics Workbench»

для бакалавров, обучающихся по направлениям:
5140900 «Профессиональное образование (Телекоммуникация)»,
5522000 «Радиотехника»,
5522100 «Телевидение, радиосвязь и радиовещание»,
5522200 «Телекоммуникация»,
5524400 «Мобильные системы связи»

Ташкент, ТУИТ, 2008.-129 с.

Составитель: Козлов В.А.



Рассмотрен и рекомендован к печати
на заседании кафедры ТЭЦ

Корректор - Хасанова Л.Д. 

Ответственный редактор – д.ф.м.н., профессор Арипов Х.К. 

Заказ № 341 Тираж 50.

Бумага офсетная, формат 60x84

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
«ALOQASHI» при ТУИТ.

700084 Ташкент, ул. Амира Тимура 108