

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕОРИИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**  
**ПО**  
**ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

с использованием программы

«**Electronics Workbench**»

для студентов специального заочного образов:

обучающихся по направлениям:

5522100 – «Телекоммуникация» и

5522200 – «Профессиональное образование (Телекоммуникация)»

Ташкент 2008



Составитель Козлов В.А. «ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ по ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ с использованием программы «Electronics Workbench.» для студентов специального заочного образования, обучающихся по направлениям: 5522100 - «Телекоммуникация» и 5522200 - и «Профессиональное образование (Телекоммуникация)». Ташкент, ТУИТ, 2008.-61 с.

В связи с непрерывным ростом объема информации и сокращением времени, отводимого 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 7 виртуальных лабораторных работ. В первой, ознакомительной лабораторной работе, даются основные сведения, необходимые для самостоятельной работы с программой EWB. В следующих 6 лабораторных работах содержится теоретический материал, необходимый для понимания исследуемых явлений в электрических цепях, а также для выполнения предварительных расчётов. Тематика лабораторных работ соответствует программе курса ТЭЦ. При подготовке к выполнению лабораторной работы надо изучить теорию и воспользоваться ответами 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.

В приложении приводится методика работы с виртуальными измерительными приборами (двухканальным осциллографом и измерителем частотных характеристик – “Bode plotter”).



Составитель Козлов В.А. «ЛАБОРАТОР ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ с использованием программы «Electronics Workbench!» для студентов специального заочного образования, обучающихся по направлениям: 5522100 - «Телекоммуникация» и 5522200 - и «Профессиональное образование (Телекоммуникация)». Ташкент, ТУИТ, 2008.-61 с.

В связи с непрерывным ростом объема информации и сокращением времени, отводимого 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 7 виртуальных лабораторных работ. В первой, ознакомительной лабораторной работе, даются основные сведения, необходимые для самостоятельной работы с программой EWB. В следующих 6 лабораторных работах содержится теоретический материал, необходимый для понимания исследуемых явлений в электрических цепях, а также для выполнения предварительных расчётов. Тематика лабораторных работ соответствует программе курса ТЭЦ. При подготовке к выполнению лабораторной работы надо изучить теорию и 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.

В приложении приводится методика работы с виртуальными измерительными приборами (двухканальным осциллографом и измерителем частотных характеристик – “Bode plotter”).

## ВВЕДЕНИЕ

### Домашняя подготовка

Подготовка к выполнению каждой лабораторной работы должна начинаться с освоения теоретической части материала и выполнения предварительного расчёта. Важной частью подготовки является ответы на контрольные вопросы, содержащиеся в конце каждой лабораторной работы.

### Правила работы в компьютерном классе

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

Нельзя работать на неисправном персональном компьютере (ПК). Если на металлических частях ПК обнаружено напряжение, необходимо сообщить об этом преподавателю, ведущему занятие.

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.

### 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, 7 папок с именами лабораторных работ Lab 1 – Lab 7, что означает лабораторные работы № 1 - № 7.

2). Выбирается папка требуемой лабораторной работы и по ней делается двойной щелчок мышью, в результате чего раскрывается окно, содержащее текстовый файл, содержит краткую теоретическую часть, методику выполнения предварительного расчёта, исследуемую схему с подключёнными к ней моделями измерительных приборов, необходимых для выполнения лабораторной работы. Текстовый файл загружаются двойным щелчком мыши по соответствующему ярлыку-пиктограмме. После чего производится загрузка программы анализа электрических схем Electronics Workbench (EWB) и на рабочем поле монитора студентом выполняется сборка схемы и установка требуемых параметров её элементов.

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 **0 1**. Для прекращения моделирования надо однократно щёлкнуть мышью на кнопке выключателя **0 1**.

Для продолжения исследований открывается новое рабочее поле программы EWB, собирается следующая схема, выполняются соответствующие измерения и т.д.

Для ускорения выполнения работы можно воспользоваться готовыми схемными файлами формата .ewb, содержащимися в каждой лабораторной работе.

### **Оформление отчёта и защита выполненной работы**

Перед началом выполнения новой лабораторной работы студент должен представить преподавателю отчёт о предыдущей работе и результаты предварительного расчёта по следующей работе.

На титульном листе отчёта 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 необходимо привести 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).

### 1.1. Структура рабочего окна программы

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

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

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



Рис.1.1. Меню программы EWB

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



Рис.1.2. Панель инструментов программы EWB

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



Рис. 1.3. Панель компонентов программы EWB

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

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

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

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

## 1.2. Содержание некоторых панелей компонентов

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

**Упражнения:** Откройте 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 индуктивности и т.д.) (рис.1.5). На каждой



Рис. 1.5. Библиотека основных пассивных элементов Basic  
кнопке показано условное изображение элемента схемы.

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



Рис. 1.6. Библиотека индикаторных приборов Indicators



Откройте библиотеку – измерительные приборы Instruments (рис. 1.7)

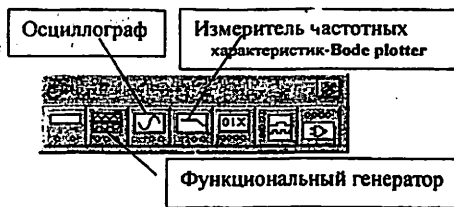


Рис. 1.7. Библиотека измерительных приборов Instruments

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

### 1.3. 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.

#### 1.3.1. 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  $90^\circ$ , 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.

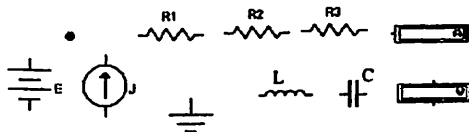


Рис. 1.8. Элементы и приборы схе-

Перемещение производится нажатием левой клавиши мыши на изображении компонента и перемещении значка по полю при нажатой клавише

Поворот элемента на  $90^\circ$  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 изображения 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.

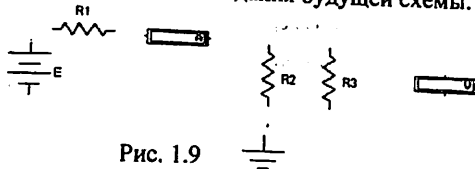


Рис. 1.9

### 1.3.2. 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:

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

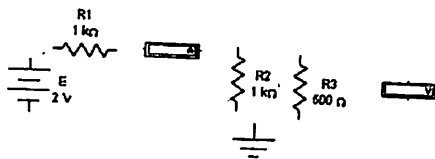


Рис.1.10

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

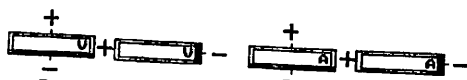


Рис. 1.11. Полярность выводов приборов

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

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

Входное сопротивление амперметра  $R_A$  обычно выбирают значительно меньше сопротивления ветви, в которую включают амперметр, например, в 100 раз с точностью измерения в 1%.

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

Установите параметры вольтметра и амперметра: режим DC, входные сопротивления  $R_V = 10 \text{ МОм}$ ,  $R_A = 1 \text{ нОм}$ .

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

### 1.3.3. 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 удастся, 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.

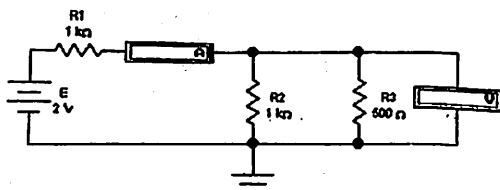


Рис. 1.12. Пример электрической схемы

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.

#### 1.4. Запуск модели на расчёт

Включение измерительных приборов и процесса измерения производится щелчком по кнопке запуска моделирования **0 | 1**.

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

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

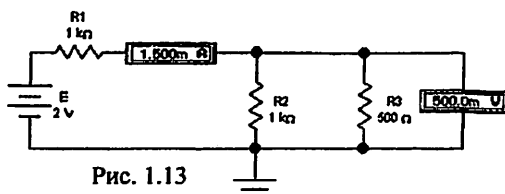


Рис. 1.13

1.4.2. Измените значение сопротивления резистора:  $R1 = 4 \text{ k}\Omega$  и повторите измерения  $I$  и  $U$ . Для этого остановите процесс измерения кнопкой **Pause** – временная остановка моделирования. Откройте диалоговое окно резистора R1

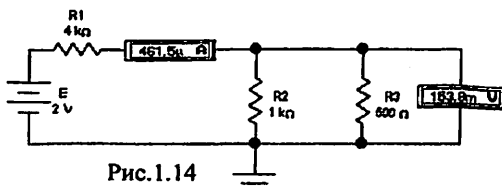


Рис.1.14

и измените величину сопротивления. Запустите модель вторичным нажатием кнопки **Pause**. Результаты измерений изменятся:

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

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.

### 1.5. 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.

### 1.6. Контрольные вопросы

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

1.6.2. Где находятся индикаторные, приборы?

1.6.3. Где находятся измерительные приборы?

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

1.6.5. Как произвести перемещение изображения элементов по рабочему полю, их поворот на  $90^\circ$ , удаление?

1.6.6. Как задать численные значения сопротивлений, конденсаторов, индуктивных катушек, ЭДС источника напряжения?

1.6.7. Как установить параметры вольтметра и амперметра?

1.6.8. Как соединить элементы схемы между собой проводниками?

1.6.9. Как производится запуск модели?

1.6.10. Как остановить процесс моделирования?

## 2. ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА ДЛЯ ЛЭЦ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы - для разветвлённой линейной цепи постоянного тока проверить выполненные законы Кирхгофа при моделировании на ПК

### 2.1. Теоретические сведения

**Первый закон Кирхгофа** – в любом узле алгебраическая сумма токов всех ветвей, присоединённых к узлу, равна нулю  $\sum_{k=1}^n I_k = 0$ , (2.1)

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

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k, \quad (2.2)$$

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

При составлении уравнений по 2-му закону Кирхгофа обычно со знаком «+» берут напряжения  $R_i I_i$ , на которых направление обхода контура совпадает с направлением тока  $I_i$ , в сопротивлении  $R_i$ . В противоположном случае падения напряжения  $R_i I_i$  берутся со знаком «-». ЭДС источников  $E_i$  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.2.1,а) с двумя источниками напряжения  $E_1$  и  $E_2$  и схема (рис. 2.1,б) с источником напряжения  $E_1$  и источником тока  $J$ .

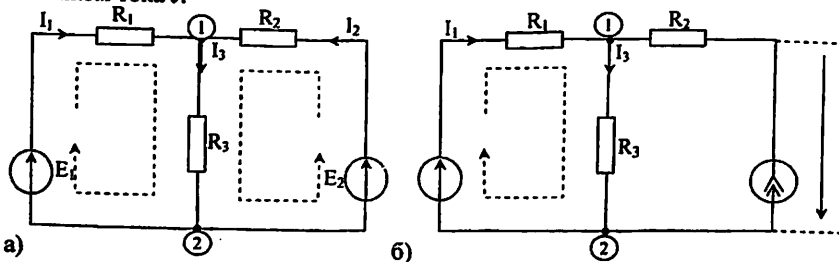


Рис.2.1. Схема с двумя источниками напряжения  $E_1, E_2$  (а) и схема с источником напряжения  $E_1$  и источником тока  $J$

Для схемы рис.2.1,а токи в ветвях  $I_1, I_2, I_3$  могут быть определены из решения системы уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1; \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Откуда  $I_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$ ;  $I_2 = \frac{E_2(R_1 + R_3) - E_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$ ;  $I_3 = I_1 + I_2$ . (2.4), (2.5), (2.6)

Напряжения на сопротивлениях цепи соответственно равны:

$$U_1 = R_1 I_1; \quad U_2 = R_2 I_2; \quad U_3 = R_3 I_3. \quad (2.7)$$

Для схемы рис.2.1,6 токи в ветвях можно определить из решения системы уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1 + J - I_3 = 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 = E. \end{cases} \quad (2.8)$$

Откуда  $I_1 = \frac{E - R_3 J}{R_1 + R_3}$ ;  $I_3 = \frac{E_1 + R_1 J}{R_1 + R_3}$ . (2.9), (2.10)

Напряжение на сопротивлениях цепи

$$U_1 = R_1 I_1; \quad U_2 = R_2 J; \quad U_3 = R_3 I_3; \quad (2.11)$$

Напряжение на зажимах источника тока J

$$U_J = U_2 + U_3 = R_2 J + R_3 I_3. \quad (2.12)$$

Правильность расчёта токов можно определить из решения уравнения баланса мощностей

$$\Sigma P_{\text{пр}} = \Sigma P_{\text{ист}}$$

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

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

Для первой схемы (см. рис.2.1,а) уравнение баланса мощностей имеет вид:

$$R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = E_1 I_1 + E_2 I_2. \quad (2.13)$$

Для второй схемы (см. рис.2.1,б)

$$R_1 I_1^2 + R_2 J^2 + R_3 I_3^2 = E_1 I_1 + U_J J, \quad (2.14)$$

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

## 2.2. Предварительный расчёт

Для схемы, приведённой на рис.2.1,а, по заданному варианту исходных данных (см.табл.2.1) рассчитать значения токов в ветвях  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  по формулам (2.4) - (2.6) и напряжение на сопротивлениях цепи  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  по формулам (2.7). Проверить правильность расчёта токов из решения уравнения баланса мощностей. (2.13). Результаты предварительного расчёта занести в таблицу 2.2.

Для схемы рис.2.1,б по заданному варианту исходных данных (см. табл.2.1) рассчитать токи в ветвях  $I_1$ ,  $I_2$  по формулам (2.9), (2.10) и напряжение на сопротивлениях  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  по формулам (2.11), напряжение на зажимах источника тока  $U_J$  по формуле (2.12). Проверить правильность расчёта токов из решения

уравнения баланса мощностей (2.14). Результаты предварительного расчёта за-  
нести в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Исходные данные для предварительного расчёта

№ узла	$P_{гн}$	$P_{л}$	$I_{л, MA}$	$R_{г}$	$R_{л}$	$R_{с}$
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 2.2

Результаты предварительного расчёта и измерений

Вариант	№	$I_{л, MA}$	$I_{г, MA}$	$I_{с, MA}$	$U_{л, В}$	$U_{г, В}$	$U_{с, В}$
Схема рис. 2.1.а	Расчёт						
	Измерено						
Схема рис. 2.1.б	Расчёт						
	Измерено						

2.3. Выполнения работы



### 2.3.1. Исследование схемы с двумя источниками напряжения

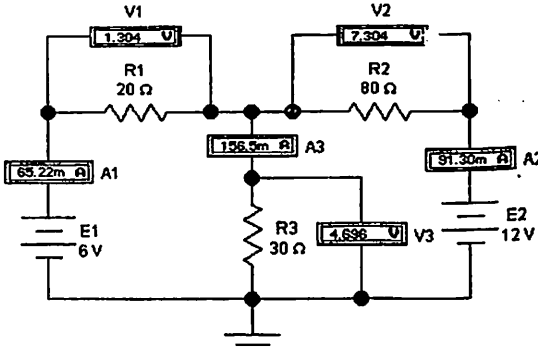


Рис 2.2. Схема с двумя источниками напряжения E1 и E2

Производится загрузка программы EWB. Собирается схема, представленная на рис. 2.2. или раскрывается папка Lab\_TEC и загружается файл Lb2\_1 с готовой схемой. Установить параметры элементов цепи (E1, E2 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>) согласно исходным данным варианта задания (см. табл.2.1).

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 , расположенной ниже кнопки .

Значения токов в ветвях I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub> определяются по показаниям амперметров A1, A2, A3- напряжений на сопротивлениях U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>- вольтметров V1, V2, V3. Результаты изменений занести в табл.2.2.

Относительная погрешность измерений токов и напряжений определяется по формуле 
$$\delta = (A_p - A_n) / A_p \quad (2.15)$$

где A<sub>p</sub> – рассчитанная величина тока или напряжения;  
A<sub>n</sub> – измеренная величина тока или напряжения.

### 2.3.2. Исследование схемы с независимыми источником напряжения и источником тока

Собирается схема, представленная на рис. 2.3. или раскрывается папка Lab\_TEC и загружается файл Lb2\_2 с готовой схемой.

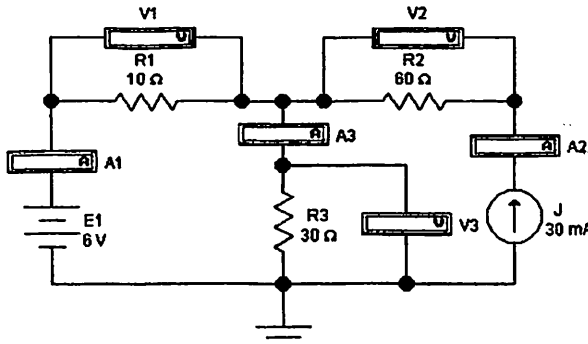
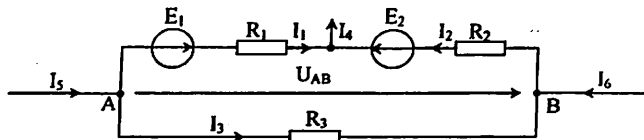


Рис.2.3. Схема с источником напряжения E1 и источником тока J

Устанавливаются параметры цепи ( $E_1, J, R_1, R_2, R_3$ ) согласно требуемого варианта задания (см. табл.2.1). Запустить расчёт схемы. Результаты изменений заносятся в табл. 2.2.

## 2.4. Контрольные вопросы

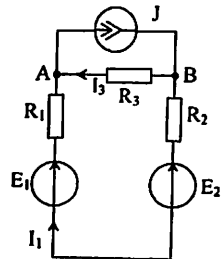
- 2.4.1. Какие основные топологические понятия используются в ТЭЦ?
- 2.4.2. Что называется ветвью, узлом и контуром в ЭЦ?
- 2.4.3. Для чего применяются законы Кирхгофа в ЭЦ?
- 2.3.4. Как формулируется первый закон Кирхгофа для ЭЦ?
- 2.4.5. Сколько уравнений необходимо составить по первому закону Кирхгофа?
- 2.4.6. Как формулируется второй закон Кирхгофа?
- 2.4.7. Сколько уравнений необходимо составить по второму закону Кирхгофа?
- 2.4.8. Какие контуры в ЭЦ называется независимым?
- 2.4.9. Какое общее количество уравнений необходимо составить по законам Кирхгофа?
- 2.4.10. Как определяется мощность, отдаваемая источником напряжения?
- 2.4.11. Как определяется мощность, отдаваемая источником тока?
- 2.4.12. Как определяется мощность, потребляемая в сопротивлении?
- 2.4.13. Что такое баланс мощностей в ЭЦ постоянного тока?



- 2.4.14. Для чего используется уравнение баланса мощностей в ЭЦ?
- 2.4.15. Для заданной схемы определить напряжение  $U_{AB}$ , если

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.

$E_1=10$  В;  $E_2=20$  В;  $R_1=10$  Ом;  $R_2=20$  Ом;  $I_1=0,7$  А;  $I_2=1,3$  А.



- 2.4.16. Для заданной цепи составить систему уравнений по законам Кирхгофа.
- 2.4.17. Для схемы (п.2.4.16) определить токи в ветвях методом наложения.
- 2.4.18. Для схемы (п.2.4.16) составить уравнение баланса мощностей.
- 2.4.19. Для схемы (п.2.4.16) определить напряжение  $U_{AB}$ .
- 2.4.20. В схеме (п.2.4.15) определить все токи:  $I_3, I_4, I_5$ .

### 3. 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.

#### 3.1. Теоретические сведения

##### 3.1.1. Свойства последовательной RL-цепи при гармоническом напряжении

В общем случае напряжение на входе RL-цепи (рис 3.1,а)

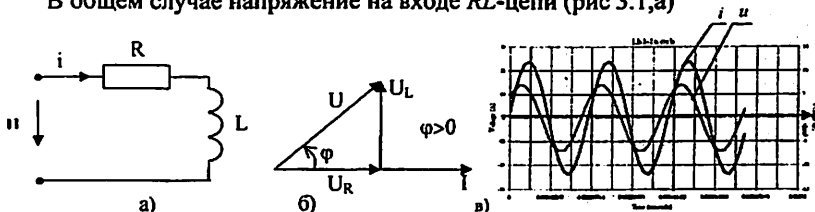


Рис. 3.1. Схема RL-цепи (а), векторная диаграмма (б), кривые мгновенных значений тока и напряжения на входе (в).

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

$$u = u_R + u_L \quad (3.1)$$

При установившемся гармоническом режиме напряжение на входе RL - цепи (рис.3.1,а)

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (3.2)$$

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

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (3.3)$$

$$u_L = L di/dt = \omega LI_m \cos(\omega t + \psi_i) = X_L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ), \quad (3.4)$$

где  $U_{Rm} = RI_m$  - амплитудное значение напряжения на сопротивлении;

$U_{Lm} = \omega LI_m = X_L I_m$  - амплитудное значение напряжения на индуктивности;

$X_L = \omega L$  - индуктивное сопротивление.

Из (3.3) видно, что напряжение на сопротивлении  $u_R$  совпадает по фазе с током  $i$ , из (3.4) - напряжение на индуктивности  $u_L$  опережает по фазе ток  $i$  на  $90^\circ$  (см. рис.3.1, б). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи RL приведены на рис. 3.1,б.

Подставляя (3.2), (3.3), (3.4) в (3.1) получим

$$U_m \sin(\omega t + \psi_u) = RI_m \sin(\omega t + \psi_i) + X_L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = Z I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \quad (3.5)$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$  - полное сопротивление цепи;  $(3.6)$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg(\omega L / R) = \arctg(X_L / R) = \arctg(U_L / U_R). \quad (3.7)$$

Из (3.5) определяем амплитуду и начальную фазу входного тока

$$U_m = Z I_m \text{ откуда } I_m = U_m / Z, \quad (3.8)$$

$$\omega t + \psi_u = \omega t + \psi_i + \varphi \text{ откуда } \psi_i = \psi_u - \varphi, \quad (3.9)$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (3.10)$$

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

$$U_R = RI; \quad U_L = X_L I; \quad U = ZI = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}. \quad (3.11)$$

На рис.3.2. приведены графики частотных характеристик действующих значений напряжений на сопротивлении  $U_R$  (рис.3.2,а), индуктивности  $U_L$  (рис.3.2,б) и сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi = \psi_u - \psi_i$  (рис.3.2,в).

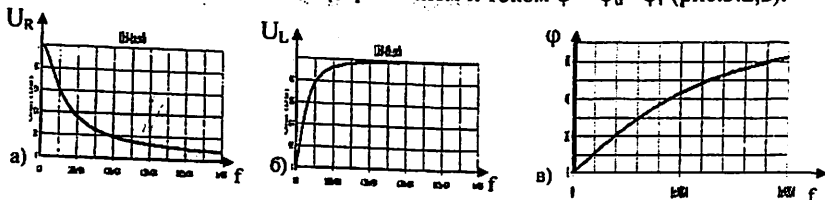


Рис. 3.2. Зависимости  $U_R(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  для RL-цепи

### 3.1.2. Свойства последовательной RC-цепи при гармоническом токе

Напряжение на входе последовательной RC-цепи (рис.3.3,а) равно сумме мгновенных значений напряжений на её элементах  $u = u_R + u_C$ . (3.12)

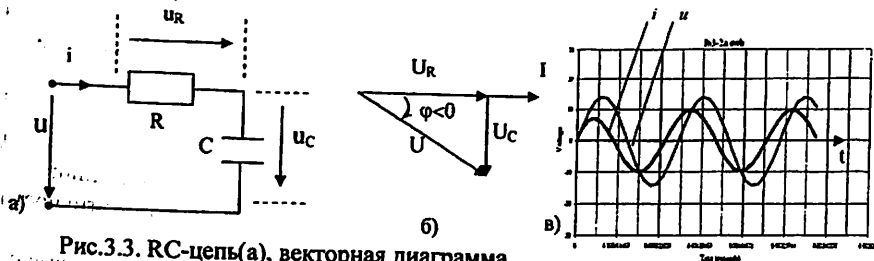


Рис.3.3. RC-цепь(а), векторная диаграмма напряжений и тока(б); временная диаграмма напряжения и тока на входе RC-цепи(в).

При установившемся гармоническом режиме напряжение на входе RC - цепи (рис.3.3,а)

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (3.13)$$

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

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (3.14)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi_i) = -X_C I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ), \quad (3.15)$$

где  $U_{Rm} = RI_m$  - амплитудное значение напряжения на сопротивлении;

$U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} I_m = X_C I_m$  - амплитудное значение напряжения на ёмкости;

$X_C = 1/\omega C$  - ёмкостное сопротивление.

Из (3.14) 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  $90^\circ$  (см. рис.3.3,б). Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи RC приведены на рис.3.3,б.

Подставляя (3.13), (3.14), (3.15) в (3.12) получим

$$U_m \sin(\omega t + \psi_u) = R I_m \sin(\omega t + \psi_i) - X_C I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ = \sqrt{R^2 + X_C^2} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = Z I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi), \quad (3.16)$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  - полное сопротивление цепи; (3.17)

$$\varphi = -\arctg(X_C/R) = -\arctg(U_C/U_R). \quad (3.18)$$

Из (3.16) определяем амплитуду и начальную фазу тока

$$U_m = Z I_m \text{ откуда } I_m = U_m/Z, \quad (3.19)$$

$$\omega t + \psi_u = \omega t + \psi_i + \varphi \text{ откуда } \psi_i = \psi_u - \varphi, \quad (3.20)$$

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

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

$$U_R = RI; \quad U_C = X_C I; \quad U = ZI = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}, \quad (3.21)$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  - полное сопротивление RC- цепи. (3.22)

На рис. 3.4. приведены графики частотных характеристик действующих значений напряжений  $U_R, U_C$  и сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ .

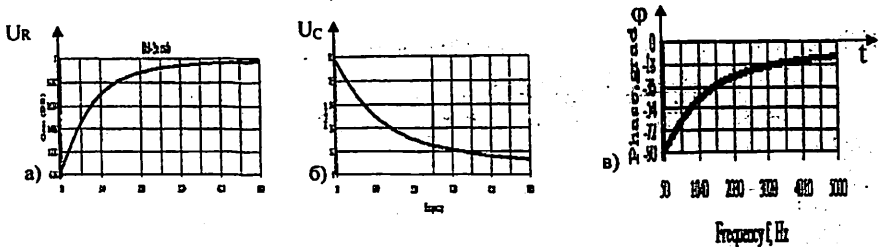


Рис. 3.4. Графики  $U_R(\omega)$ ,  $U_C(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$ .

Активная  $P$ , реактивная  $Q$  и полная  $S$  мощности для обеих схем (рис.3.1,а и рис.3.2,а) определяются по формулам:

$$P = RI^2 = UI \cos \varphi, \text{ Вт}; \quad Q = X I^2 = UI \sin \varphi, \text{ ВАр}, \quad S = ZI^2 = UI, \text{ ВА} \quad (3.23)$$

Необходимо учесть, что в формуле (3.23) для RL-цепи реактивное сопротивление  $X = X_L = \omega L$ . (3.24)

Для RC-цепи реактивное сопротивление  $X = -X_C = -1/\omega C$ . (3.25)

### 3.2. Предварительный расчёт

Для заданного варианта параметров  $RL$ - или  $RC$ -цепи (рис.3.1,а); (рис.3.3,а), приведённого в таблице 3.1.

Таблица 3.1  
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.3.1,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 (3.11) на частотах

$$f = (0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,4) \cdot f_r, \quad (3.25)$$

где  $f_r = R/2\pi L$  – частота, на которой индуктивное сопротивление равно резистивному ( $X_L = R$ ). Сдвиг фаз  $\phi$  между напряжением и током  $i$  рассчитывается по формуле (3.7).

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. 3.2.

На частоте  $f_r$  построить векторную диаграмму для тока, напряжений и треугольник мощностей. По результатам предварительного расчёта и измерений построить графики  $U_R(f/f_r)$ ,  $U_L(f/f_r)$  и  $\phi(f/f_r)$ , аналогичные рис.3.2.

Таблица 3.2

Результаты предварительного расчёта и измерений для  $RL$ -схемы

f, кГц	Предварительный расчёт			Измерения		
	U <sub>R</sub> , В	U <sub>L</sub> , В	φ, град	U <sub>R</sub> , В	U <sub>L</sub> , В	φ, град
0,2f <sub>r</sub>						
0,5f <sub>r</sub>						
1f <sub>r</sub>						
1,5f <sub>r</sub>						
2f <sub>r</sub>						
4f <sub>r</sub>						
10f <sub>r</sub>						

Для  $RC$ -цепи (рис.3.3,а) рассчитать действующие значения напряжений на ёмкости  $U_C$  и сопротивлении  $U_R$  по формулам (3.21) на частотах (3.25), 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 (3.17). Результаты расчёта  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $\varphi$  на разных частотах занести в табл. 3.3.

По результатам предварительного расчёта и измерений построить графики частотных характеристик напряжений  $U_R(f/f_r)$ ,  $U_C(f/f_r)$  и  $\varphi(f/f_r)$ , аналогичные частотным характеристикам, приведённым на рис.3.3 и рис.3.4.

Таблица 3.3

Результаты предварительного расчёта и измерений для RC- схемы

$f$	$f_r$ кГц	Предварительный расчёт			Измерения		
		$U_R$ , В	$U_C$ , В	$\varphi$ , град	$U_R$ , В	$U_C$ , В	$\varphi$ , 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 $f_r$							
$U = \dots$ , $R = \dots$ , $C = \dots$ , $f_r = \dots$ , $P(f) = \dots$ , $Q(f) = \dots$ , $S(f) = \dots$							

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  $\varphi(f/f_r)$ , аналогичные частотным характеристикам, представленным на рис.3.3 и рис.3.4.

На частоте  $f_r$  рассчитать активную  $P(f_r)$ , реактивную  $Q(f_r)$  и полную мощность  $S(f_r)$ . Результаты расчётов занести в табл. 3.3.

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

### 3.3. Выполнение работы

#### 3.3.1. Исследование RL-цепи

Произвести загрузку программы EWB. Собрать схему рис. 3.5 или открыть файл Lb3\_1 с готовой схемой.. Выполнить переустановку параметров элементов

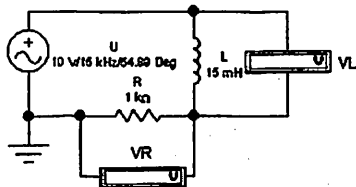


Рис.3.5. Схема исследования RL-цепи

RL- цепи в соответствии с вариантом (см. табл. 3.1), т.е. установить параметры цепи, которые использовались в предварительном расчёте.

Установить первую частоту генератора. Запустить схему на расчёт. После установления процесса расчёта записать в табл. 3.2 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  $\varphi$   $RL$ -цепи может быть измерен с помощью измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Bode Plotter (BP). Для этого собирается схема рис.3.6 или загружается файл Lb3\_2 с готовой схемой. 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.3.4,в. Установив курсор мыши у левого края экрана BP, нажать левую клавишу мыши и не отпуская её, перетащить вертикальную ви-

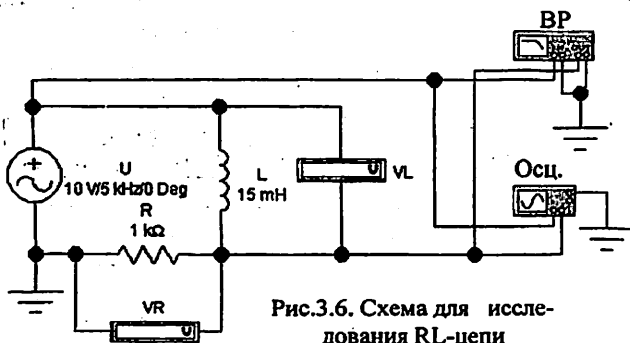


Рис.3.6. Схема для исследования  $RL$ -цепи

зирную линию на ту частоту, на которой требуется выполнить измерение  $\varphi$ . Результаты измерений  $\varphi(f)$  занести в табл.3.2.

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 графики  $u(t)$  и  $u_R(t)$ , которые имеют вид, приведённый на рис.3.1,в.

### 3.3.2. Исследование $RC$ -цепи

Собрать схему рис 3.7 или загрузить файл Lb3\_3 с готовой схемой.

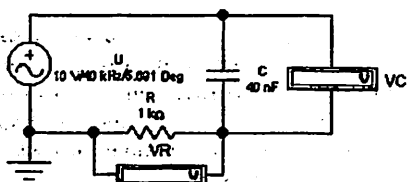


Рис.3.7. Схема измерения АЧХ  $RC$ -цепи

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. 3.3.

Сдвиг фаз между входным напряжением и током  $\varphi$   $RC$ -цепи может быть

измерен с помощью ИЧХ BP. Для измерения сдвига фаз  $\varphi$  между входным напряжением  $RC$ -цепи загружается файл Lb3\_2 в результате чего на рабочем поле EWB появляется схема рис.3.6. Заменить L на C. Установить значения параметров R и C. После чего необходимо раскрыть переднюю панель BP и выполнить измерения  $\varphi(f)$  на заданных частотах, аналогично п.3.3.1.

Исследование мгновенных значений  $u = u(t)$  и  $u_R = u_R(t)$  выполняются аналогично описанному выше (см. п.3.3.1).



### 3.4. Содержание отчёта

- 3.4.1. Название и цель работы.
- 3.4.2. Электрические схемы исследуемых цепей и параметры их элементов.
- 3.4.3. Предварительный расчёт.
- 3.4.4. Таблица результатов предварительного расчёта и компьютерного эксперимента.
- 3.4.5. 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.
- 3.4.6. Графики мгновенных значений  $u(t)$ ,  $u_k(t)$  на частоте  $f_r$ .
- 3.4.7. Расчёт активной  $P$ , реактивной  $Q$  и полной мощности  $S$  на частоте  $f_r$ .
- 3.4.8. Построить треугольник мощностей на частоте  $f_r$ .
- 3.4.9. Выводы из результатов расчёта и моделирования на ПЭВМ.

### 3.5. Контрольные вопросы и задачи

- 3.5.1. Найти напряжение  $u_R$  на сопротивлении  $R = 10 \text{ Ом}$ , если через него протекает ток  $i = 1,41 \sin(\omega t - \pi/6) \text{ А}$ .
- 3.5.2. Найти напряжение  $u_L$  на индуктивности  $L = 1,0 \text{ мГн}$ , если через неё протекает ток (см. п.3.5.1) и  $\omega = 1000 \text{ рад/с}$ ?
- 3.5.3. Чему равны комплексные амплитудные и комплексные действующие значения тока  $I$  и напряжения на сопротивлении  $U_R$  (см. п.3.5.1) и на индуктивности  $U_L$  (см. п.3.5.2)?
- 3.5.4. Чему равно напряжение на сопротивлении  $u_R$  в момент времени  $t = 1 \text{ мс}$  (см. п.3.5.1), если  $\omega = 1000 \text{ рад/с}$ ?
- 3.5.6. В какой ближайший к нулю момент времени ток в цепи  $i = 14,1 \sin(1000t - \pi/6) \text{ А}$  равен нулю?
- 3.5.7. Чему равно действующее значение напряжения на входе последовательной  $RL$ -цепи, если  $U = 40 \text{ В}$ ,  $U_R = 40 \text{ В}$ ?
- 3.5.8. Чему равно действующее значение напряжения на индуктивности  $U_L$  в последовательной  $RL$ -цепи, если  $U = 50 \text{ В}$ ,  $U_R = 40 \text{ В}$ ?
- 3.5.9. Чему равен сдвиг фаз  $\phi$  между напряжением  $u$  и током  $i$  на входе последовательной  $RL$ -цепи (см. п.3.5.7)?
- 3.5.10. Чему равно полное сопротивление  $Z$  последовательной  $RL$ -цепи при  $R = 40 \text{ Ом}$ ,  $X_L = 40 \text{ Ом}$ ?
- 3.5.11. 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.
- 3.5.12. 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.

## 4. 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.

### 4.1. Теоретические сведения

Для последовательного колебательного контура (рис 4.1,а) на основании

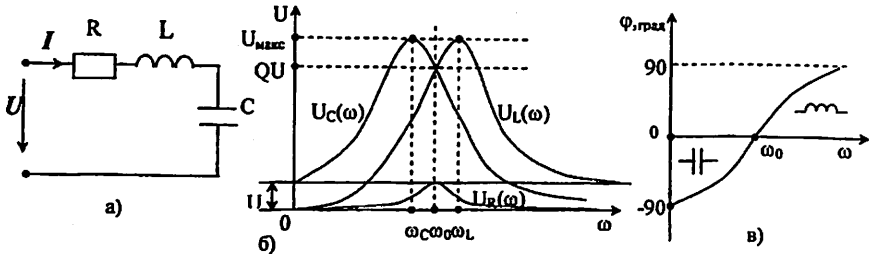


Рис. 4.1. Схема последовательного колебательного контура (а), его АЧХ (б) и ФЧХ (в)

второго закона Кирхгофа для комплексных действующих значений напряжений можно записать

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} - j(1/\omega C)\underline{I} = [R + j(\omega L - 1/\omega C)]\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}. \quad (4.1)$$

Комплексное действующее значение тока в цепи  $\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z}$ , (4.1)

где  $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I} = R + j(\omega L - 1/\omega C) = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi}$  - (4.2)

комплексное сопротивление контура;

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} - \quad (4.3)$$

- полное сопротивление контура;

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i = \arctg X/R = \arctg (X_L - X_C)/R = \arctg (\omega L - 1/\omega C)/R - \quad (4.4)$$

- сдвиг фаз между напряжением и током;

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

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

$$X = X_L - X_C = \omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0, \quad (4.5)$$

откуда резонансная угловая частота  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . (4.6)

Угловой частоте  $\omega_0$  соответствует частота резонанса  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$  (4.7)

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

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

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

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

Важнейшим параметром последовательного колебательного контура

является его добротность  $Q = \rho/R = \sqrt{L/C}/R$ . (4.8)

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

$$U_{L0}/U = U_{C0}/U = I_0\omega_0 L/U = (I_0/\omega_0 C)/U = \rho/R = Q. \quad (4.9)$$

Величина d, обратная добротности, называется затуханием колебательно-го контура  $d=1/Q$ . (4.10)

Зависимость действующего значения тока в контуре от частоты опреде-ляется выражением  $I(\omega) = U/Z$ . (4.11)

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

$$U_R(\omega) = RI(\omega); U_L(\omega) = X_L I(\omega); U_C(\omega) = X_C I(\omega). \quad (4.12)$$

На рис. 4.1,б изображены АЧХ, определяемые выражениями (4.12) и на рис. 4.1,в - ФЧХ  $\varphi(\omega)$ , определяемая по формуле (4.4).

Анализ зависимости  $U_R(\omega)$  показывает, что напряжение на сопротивлении  $U_R(\omega)$  имеет максимальное значение на резонансной частоте  $\omega_0$  и равно вход-ному напряжению  $U_{R0}=U$ .

Напряжения на индуктивности и емкости при резонансе равны между собой и в Q раз больше входного напряжения (см. рис. 4.2,б)

$$U_{L0} = U_{C0} = \rho I_0 = \rho (U/R) = UQ. \quad (4.13)$$

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

$$U_{C_{\max}} = U_{L_{\max}} = \frac{QU}{\sqrt{1-1/4Q^2}} \quad (4.14)$$

и получаются на частотах (см. рис.4.2,б):

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1-1/2Q^2}; \quad \omega_L = \omega_0 / \sqrt{1-1/2Q^2}. \quad (4.15)$$

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

$$U_{L_{\max}} = U_{C_{\max}} \approx QU. \quad (4.16)$$

Степень отклонения частоты генератора  $\omega$  от резонансной частоты колебатель-ного контура  $\omega_0$  принято оценивать тремя видами расстройк:

- абсолютной  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ , (4.17)

- относительной  $\delta = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0$ , (4.18)

- обобщённой  $\xi = X/R = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = (\omega_0 L/R)(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega) = Q(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)$ . (4.19)

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  $\xi$ , т.к. её использование существенно упрощает расчёт. Например, выражение для АЧХ тока (4.11) и сдвига фаз между входными напряжением и током можно записать через обобщённую расстройку в виде:

$$I = \frac{U}{R\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1+\xi^2}}; \quad \varphi = \arctg \xi. \quad (4.20)$$

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.4.2). На граничных частотах ПП выполняется условие:

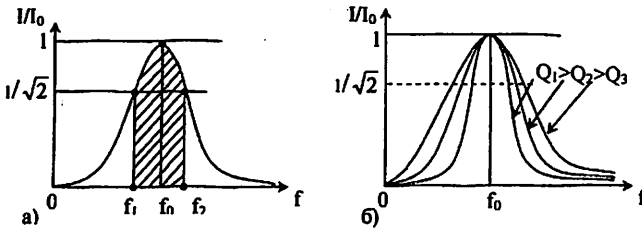
$$n(\xi) = I/I_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (4.21)$$

откуда

$$\xi_{1,2} = X/R = \pm 1. \quad (4.22)$$

Рис.4.2. К определению ПП колебательного контура (а), зависимость формы резонансной кривой от добротности (б).

Таким образом, на границах ПП реактивное сопротивление (по абсолютной ве-



личине) равно активному (резистивному) сопротивлению.

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  $f_2$ .

$$f_{1,2} = f_0 \left( \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} \mp \frac{1}{2Q} \right) \approx f_0(1 \pm 1/2Q). \quad (4.23)$$

Абсолютная ширина ПП (см. рис. 4.2.) колебательного контура

$$S_a = f_2 - f_1 = f_0/Q = df_0, \quad (4.24)$$

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

$$(4.25)$$

Уравнение (4.24) используется для экспериментального определения добротности колебательного контура по измеренным значениям резонансной частоты  $f_0$  и абсолютной ширине ПП  $f_2 - f_1$ .

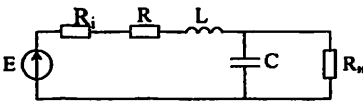


Рис. 4.3. Схема подключения колебательного контура к источнику и нагрузке

Добротность контура снижает внутреннее сопротивление источника (генератора) сигнала  $R_i$  (рис. 4.3) и сопротивление нагрузки  $R_n$ , подключённая параллельно ёмкости (рис.4.3), либо индуктивности. При  $R_n \gg \rho$  эквивалентная добротность колебательного контура с учётом влияния  $R_i$  и  $R_n$  определяется по формуле  $Q_s = \rho / (R + R_i + \rho^2 / R_n).$

## 4.2. Предварительный расчёт

4.2.1. Для заданных параметров  $R, L, C$  (рис.4.1,а) (см. табл. 4.1) рассчитать резонансную частоту  $f_0$ , характеристическое сопротивление  $\rho$ , добротность  $Q$ , затухание  $d$  и абсолютную ширину ПП.

Результаты расчёта занести в табл. 4.2

Таблица 4.1

Исходные данные для предварительного расчёта и моделирования на ПК

Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом	Вариант №	B, мВ	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

Параметры колебательного контура

Таблица 4.2

L=.....;	C=.....;	R=.....;
$f_0$ =.....;	$\rho$ =.....;	Q=.....;
D=.....;	$S_n=f_2-f_1$ =.....;	
При $R_i=0,5R$ ; $R_n=50 \text{ кОм}$ ; $Q_0$ =.....; $d_0$ =.....; $S_{0n}$ =.....		

4.2.2. Рассчитать эквивалентную добротность  $Q_0$ , затухание  $d_0$  и абсолютную ширину ПП  $S_{0n}$  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.4.2). Результаты расчёта занести в табл. 4.2.

Рассчитать частотные характеристики  $U_R(f), U_L(f), U_C(f), \phi(f)$  по формулам (4.4), (4.12) 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. 4.3.

Результаты предварительного расчёта и моделирования

Таблица 4.3

№	Результаты измерения				Предварительный расчёт				
	$f$ , кГц	$U_R/U_0$	$U_L/U_0$	$U_C/U_0$	$\phi$ , град	$U_R/U_0$	$U_L/U_0$	$U_C/U_0$	$\phi$ , 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	$f_0 + 3\Delta f$								

#### 4.2. Выполнение работы

##### 3.1. Измерение АЧХ и ФЧХ RLC-цепи (рис. 4.1,а) с помощью вольтметров

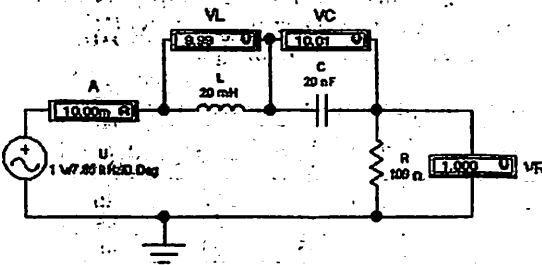


Рис.4.4. Схема исследования последовательного RLC-контура

ся равенства напряжений на индуктивности и ёмкости (одинаковые показания вольтметров V1 и V2). Записать значения экспериментально измеренной резонансной частоты  $f_0$ , напряжения на индуктивности  $U_L$ , ёмкости  $U_C$  при резонансе и тока при резонансе  $I_0$ .

Устанавливая частоту генератора  $f$  согласно табл. 4.3, измерить действующие значения 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.4.3.

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

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

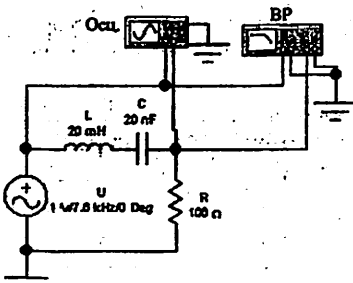


Рис.4.5. Схема для измерения АЧХ, ФЧХ и мгновенных значений  $u(t)$  и  $u_R(t)$

следующей схеме (рис.4.5) знак  $\varphi$  получается противоположный истинному

Загрузить систему EWB

Собрать схему рис. 4.4. или загрузить файл Lb4-1.ewb с готовой схемой. Выполнить переустановку параметров элементов RLC-цепи согласно варианта (см. табл. 4.1). Включить расчёт. Определить (экспериментально) резонансную частоту  $f_0$  контура. Для этого, изменяя частоту генератора (при  $U_L > U_C$  частоту- уменьшить) добиться

Для измерения АЧХ и ФЧХ RLC-собирается схема рис.4.5 или загружается файл Lb4\_2.ewb, содержащий готовую схему. Два раза щёлкнув левой клавишей мыши по изображению BP, раскроем его переднюю панель. После установки диапазона изменения частоты и фазы на экране монитора ПК появится изображение АЧХ (при нажатой кнопке **Magnitude**) (рис.4.6) или ФЧХ (при нажатой кнопке **Phase**) (рис.4.7).

Установив курсор мышки на левой границе экрана BP, и нажав левую клавишу мыши тянуть вертикальный визир на частоту, на которой был выполнен предварительный расчёт. Необходимо учесть, что в

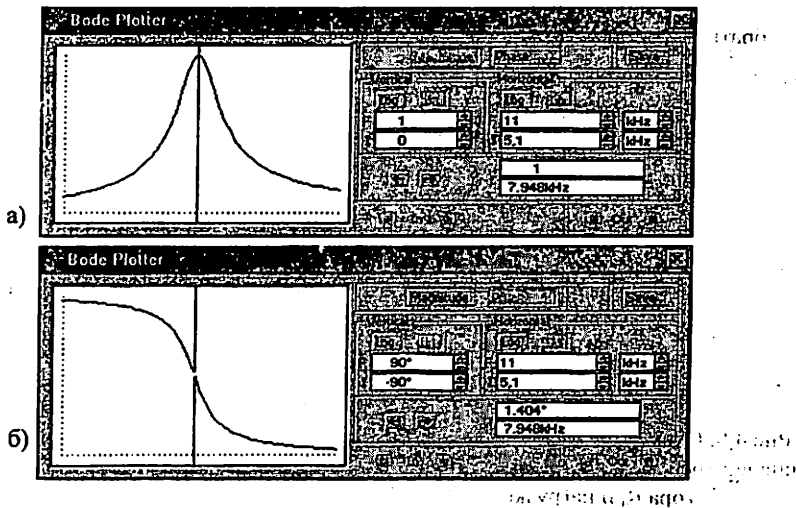


Рис.4.6. Передняя панель ИЧХ Bode Plotter с АЧХ (а) и с ФЧХ (б).

Далее, сдвигая вертикальную визирную линию вдоль оси частот и, устанавливая её на требуемые частоты, измерить  $\varphi$  (при нажатой кнопке **Phase**) и  $H_R(f)$  (при нажатой кнопке **Magnitude**). Результаты измерений  $\varphi(f)$  и  $H_R(f)$  занести в табл. 4.2.

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. 4.7). Методика работы с Bode Plotter подробно изложена в приложении П2 в конце данного методического пособия.

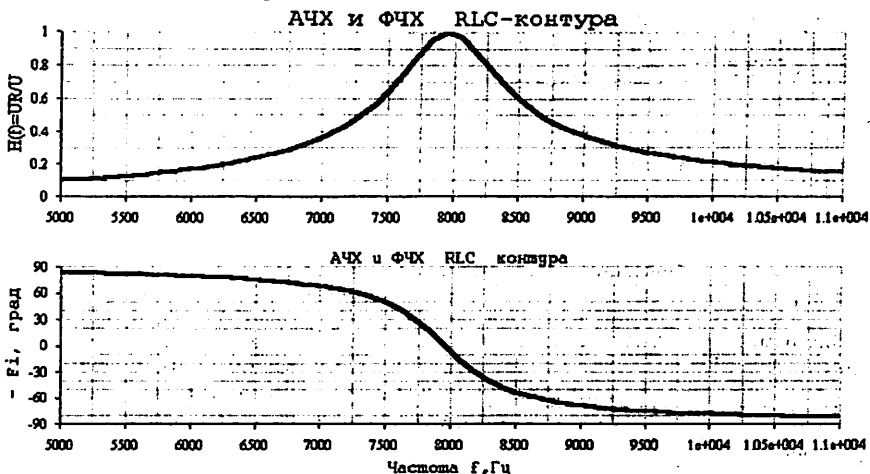
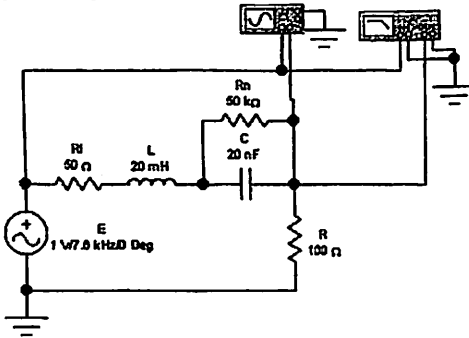


Рис. 4.7. Изображения АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью ИЧХ Bode Plotter

### 4.3.3. Исследование влияния внутреннего сопротивления генератора и нагрузки на АЧХ и ФЧХ RLC-цепи (рис.4.3)

Собрать схему рис. 4.8. или загрузить файла Lb4\_3.ewb, содержащий готовую схему.



Установить параметры RLC-цепи, согласно требуемого варианта (см. табл. 4.1, табл. 4.2). Измерить АЧХ  $H_{R2}(f) = U_R(f)/U$  и ФЧХ  $\varphi_3(f) = \psi_{u2} - \psi_{u1}$ . Методика измерения АЧХ и ФЧХ, аналогична п.4.4.2. После соответствующей настройки Vode Plotter можно получить изображения АЧХ и ФЧХ, представленные на рис. 4.9. Результаты измерений заносятся в табл.4.3.

Рис.4.8. Схема для исследования влияния внутреннего сопротивления генератора  $R_i$  и нагрузки  $R_n$  на АЧХ и ФЧХ RLC контура.

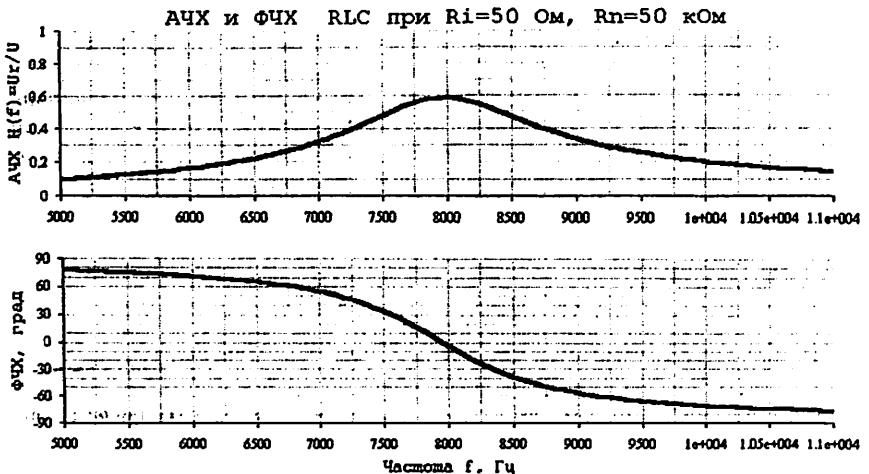


Рис.4.9. Изображения АЧХ и ФЧХ последовательного RLC контура при  $R_i=50$  Ом,  $R_n=50$  кОм, полученные с помощью ИЧХ Vode Plotter

Для измерения мгновенных значений входного напряжения  $u(t)$  и напряжения на сопротивлении  $u_R(t)$  закрывается передняя панель ВР и открывается передняя панель двухканального осциллографа «Осц.». После установки частоты генератора  $f = f_r$  срисовать осциллограммы  $u(t)$  и  $u_R(t)$ , которые имеют вид, приведённый на рис.4.1,в.



#### 4.4. Содержание отчёта

4.4.1. Название и цель работы. 4.4.2. Схемы измерения частотных характеристик.

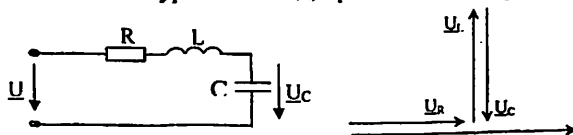
4.4.3. Графики частотных характеристик  $U_R(f)/U$ ,  $U_L(f)/U$ ,  $U_C(f)/U$ ,  $\varphi(f)$ , построенных по результатам предварительного расчёта и эксперимента.

4.4.4. По графику  $U_R(f)/U$  определить абсолютную ширину полосы пропускания и сравнить полученное значение с результатом предварительного расчёта.

4.4.5. Выводы по результатам исследований.

#### 4.5. Контрольные вопросы и задачи

4.5.1. 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.  $X_L = X_C$ .

4.5.2. 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.

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

4.5.4. 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.

4.5.5. 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.

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

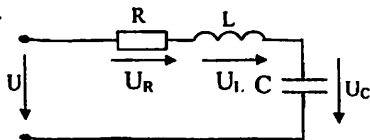
- Ответы: А. Не изменится. Б. Увеличится в два раза.  
В. Уменьшится в два раза. Г. Увеличится в четыре раза.

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

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

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

4.5.9. 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.

## 5. 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.

### 5.1. Теоретические сведения

#### 5.1.1. Переходные процессы в последовательной RC-цепи

Переходный процесс исследуется в RC- цепи, изображённой на рис.5.1,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.5.1,б)..

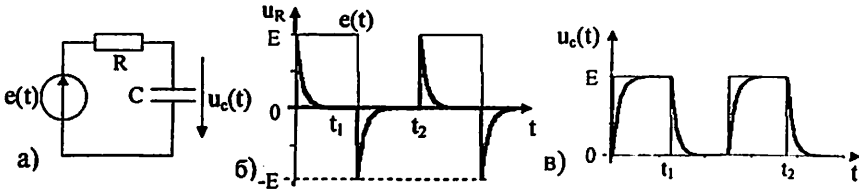


Рис. 5.1. Исследуемая RC-цепь (а), входное напряжение  $e(t)$ , напряжение на сопротивлении  $u_R(t)$ , ёмкости  $u_C(t)$  (в).

**Подключение RC- цепи к источнику постоянного напряжения** в интервале  $0 \leq t \leq t_1$  (рис.5.1,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

$$E = RC(du_C/dt) + u_C, \quad (5.1)$$

которому соответствует решение

$$u_C = E(1 - e^{-t/\tau}), \quad u_R = E - u_C = E e^{-t/\tau}, \quad i = u_R/R = (E/R) e^{-t/\tau} \quad (5.2)$$

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

$$u_C = E e^{-(t-t_1)/\tau}, \quad u_R = -u_C = -E e^{-(t-t_1)/\tau}. \quad (5.3a)$$

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 (5.3a) упростятся

$$u_C = E e^{-t/\tau}, \quad u_R = -u_C = -E e^{-t/\tau}. \quad (5.3б)$$

#### 7.1.2. Переходные процессы в последовательной RL-цепи

**При включении цепи RL (рис. 5.2) на постоянное напряжение  $e(t) = E$**  (в интервале  $0 \leq t \leq t_1$ ) (рис.5.1,б) переходной процесс описывается дифференциальным уравнением:

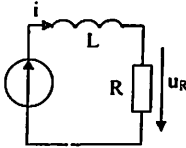


Рис.5.2. Цепь RL

для переходного тока

$$E = u_R + u_L = Ri + Ldi/dt, \quad (5.4)$$

которому соответствует характеристическое уравнение  $R + Lp = 0$

и его корень  $p_1 = -R/L = -1/\tau$ ,

где  $\tau = L/R$  - постоянная времени RL - цепи.

Дифференциальному уравнению (5.4) соответствует решение

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

и для переходных напряжений на сопротивлении и индуктивности

$$u_R = Ri = E(1 - e^{-t/\tau}), \quad u_L = E - u_R = Ee^{-t/\tau}; \quad (5.5)$$

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

$$u_R = Ee^{-(t-t_1)/\tau}; \quad i = (E/R)e^{-(t-t_1)/\tau}; \quad u_L = -u_R. \quad (5.6a)$$

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 (5.6a) упрощаются

$$u_R = Ee^{-t/\tau}; \quad i = (E/R)e^{-t/\tau}; \quad u_L = -u_R. \quad (5.6b)$$

Следует отметить, что графики  $u_R(t)$ ,  $u_L(t)$  RL - цепи (рис.5.2) будут соответственно такими же, как  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$  RC - цепи (рис.5.1,а).

### 5.1.3. Переходные процессы в последовательной RLC-цепи

Переходную характеристику колебательного контура рассмотрим на примере схемы рис.5.3, когда выходное напряжение снимается с емкости.

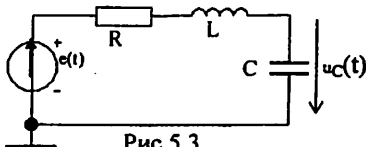


Рис.5.3

При воздействии скачка напряжения в контуре возникает затухающий колебательный процесс, вызванный периодическим зарядом и разрядом емкости через индуктивность и сопротивление (рис.5.4).

Аналитическое выражение переходной характеристики напряжения на емкости имеет вид:

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

где

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

$$\delta = \frac{R}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} \text{ - коэффициент затухания,} \quad (5.7)$$

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

- коэффициент затухания,

(5.8)

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

Амплитуда колебаний со временем затухает за счет потери энергии в сопротивлении и R. Скорость затухания колебаний зависит от коэффициента затухания  $\delta$  (5.8).

Вид переходной характеристики зависит от величины добротности Q контура. С увеличением добротности частота собственных колебаний  $\omega_1$  стремится к резонансной частоте  $\omega_0$ , а скорость затухания переходного процесса уменьшается.

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

## 5.2. Предварительный расчёт

5.2.1. Рассчитать постоянную времени  $\tau$  цепи RC или RL (рис. 5.1,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. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры RC и RL-цепей для предварительного расчёта и измерений на ПК

Вариант	R, Ом	C, мкФ	L, мГн	R, Ом	C, мкФ	L, мГн
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	

5.2.2. Для RC (см.рис.6.1) или RL (см.рис.5.2) рассчитать временные зависимости напряжения на ёмкости  $u_C(t)$  или индуктивности  $u_L(t)$  и сопротивлении  $u_R(t)$ , для  $t = (0; 0.5; 1; 1.5; 2; 4) \cdot \tau$ . Для всех вариантов использовать  $e(t) = E = 6$  В. Результаты расчета занести в табл.5.2.

Таблица 5.2

Результаты предварительного расчета и измерений на ПК

Схем	Схема	0	0,5τ	1,5τ	2τ	4τ
RC, В	Расчет					
	Измерение					
RL, В	Расчет					
	Измерение					
RC, В	Расчет					
	Измерение					

## 5.3. Выполнение работы

### 5.3.1. Исследование переходных процессов в RC-цепи

Загрузить программу EWB. Собрать схему рис.5.5 или загрузить файл Lb5-1.ewl, содержащий готовую схему. Она позволяет исследовать переходные процессы в последовательной RC-цепи при включении её на постоянное напряжение (зарядка ёмкости) и при её коротком замыкании (разрядка ёмкости).

Zapusk razvertki osc

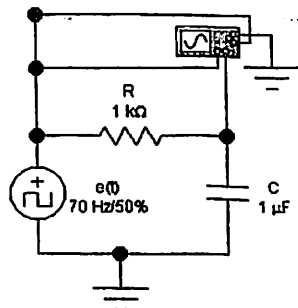


Рис.5.5.

Схема рис.5.5 содержит RC-цепь, источник напряжения положительных прямоугольных импульсов  $e(t)$  и двухканальный осциллограф. Для того, чтобы запуск развертки происходил в начале или в конце импульса напряжения устанавливается ждущий режим осциллографа (нажата клавиша **Ext**) и к зажиму входа синхроимпульсов подводится напряжение от генератора импульсов (рис.5.5).

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

са на осциллографе должно быть нажата правая кнопка

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

На рис.5.6. 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 положительного

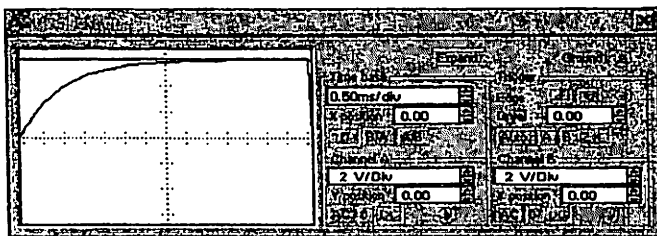


Рис.5.6

импульса с максимальным напряжением 6 В. По горизонтали – время  $t$  с масштабом  $m_t=0,5$  мс/деление. По вертикали – напряжение с масштабом  $m_u=2$  В/деление. Учи-

тывая масштабы по горизонтали и вертикали можно приблизительно измерить зависимость  $u_c(t)$  и заполнить таблицу экспериментальными данными (табл.5.2)

Гораздо более точные результаты моделирования можно получить, если выполним большее расширение передней панели осциллографа. Если щёлкнуть мышкой по кнопке **Expand**, то на рабочем поле EWB появится расширенная передняя панель осциллографа (рис.5.7).

На рис.5.7. 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, обозначенные цифрами «1» и «2». Ниже экрана расположены три окошка заполненные цифрами.

В левом окошке:

$T1 = 298,7013$  мкс - отражает интервал времени от начала расчёта до

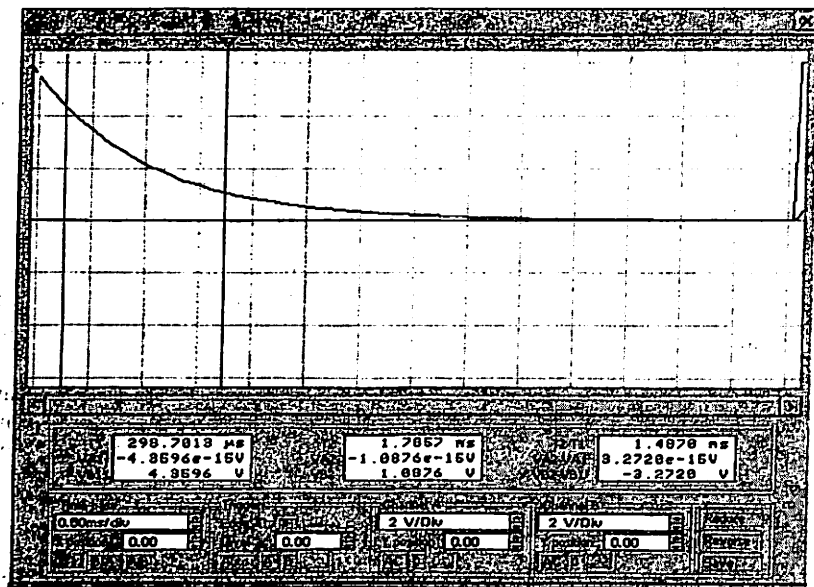


Рис.5.7.

точки расположения визирной линии 1;

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

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

В среднем окошке:

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

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

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

В правом окошке:

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

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

$V_{B2}-V_{B1} = -3,2720 \text{ В}$  – разность значений напряжений на ёмкости в момент  $T_2$  и  $T_1$

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:

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln[u_c(t_1) / u_c(t_2)] = 1,487 / \ln(4,3596 / 1,0876) = 2,0646 \text{ мс.} \quad (5.9)$$

### 3.2. Исследование переходных процессов в последовательной RL-цепи

Собрать схему рис.5.9 или загрузить файл Lb 5.2.ewb, содержащему готовую схему. 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. 5.10. На нём мы видим напряжение переходного процесса на индуктивности  $u_L(t)$  при включении RL-цепи на постоянное напряжение. Как видно из графика  $u_L(t)$  сначала скачком возрастает от нуля до входного напряжения  $E=6 \text{ В}$ , и дальше плавно уменьшается до

Zapusk razvertki osc

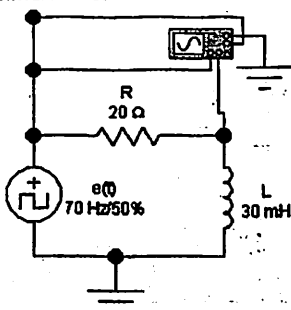


Рис.5.9.

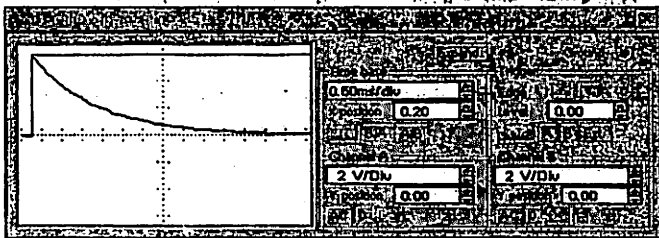


Рис.5.10.

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

Собрать схему рис. 5.11 или загрузить файл Lb 5.3.ewb, содержащему готовую схему. 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.

Устанавливается частота генератора

Zapusk razvertdi osc

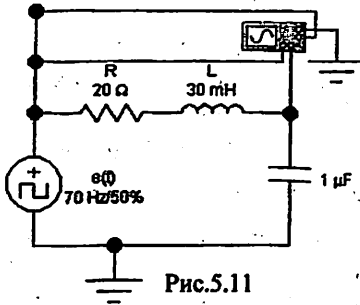


Рис.5.11

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

После настройки передняя панель осциллографа может выглядеть так, как показано на рис. 5.12. На нём мы видим напряжение переходного процесса на ёмкости  $u_C(t)$  при включении RLC на постоянное напряжение.

Для увеличения точности измерения напряжения и времени выполним полное раскрытие передней панели осциллографа, щёлкнув мышью по кнопке **Expand**. В результате чего на рабочем

поле EWB появится рис. 5.13.

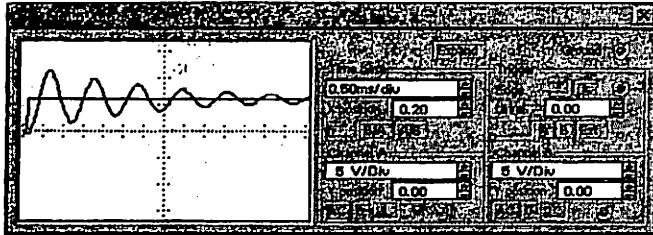


Рис.5.12

Мышкой устанавливаются вертикальные визирные линии на максимумы  $u_C(t)$  и выполняется 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

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

и постоянную времени

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



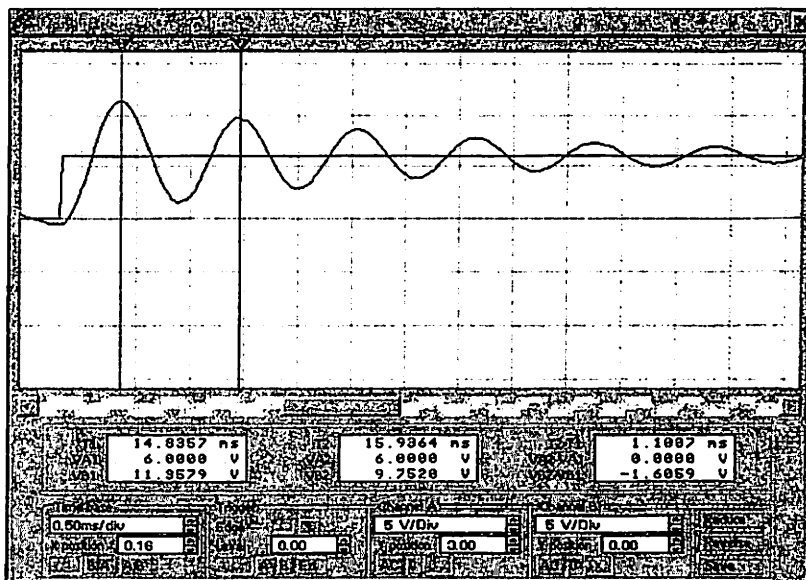


Рис. 5.13

#### 5.4. Содержание отчёта

В отчёте по лабораторной работе должны быть приведены:

- 5.4.1. Цель работы.
- 5.4.2. Электрическая схема исследуемой цепи и её исходные данные.
- 5.4.3. Расчётные формулы и результаты предварительного расчёта и моделирования.
- 5.4.4. Графики, полученные в результате моделирования (осциллограммы).
- 5.4.5. Выводы по результатам исследований.

#### 5.5. Контрольные вопросы

5.5.1. Постоянная времени цепи RL равна:

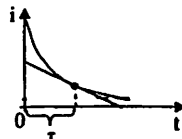
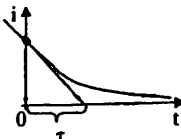
Ответы: А.  $L/R$ ; Б.  $LR$ ; В.  $R/L$ ;

5.5.2. Постоянная времени цепи RC равна:

Ответы: А.  $1/(RC)$ ; Б.  $RC$ ; В.  $C/R$ ;

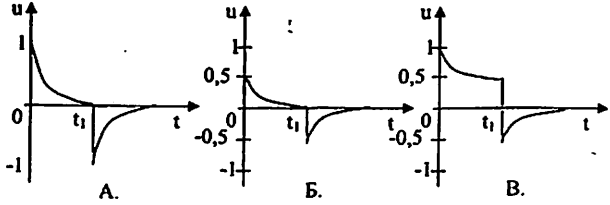
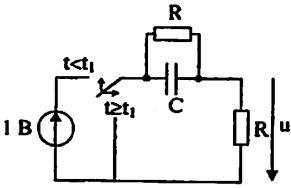
5.5.3. Графическое определение  $\tau$  ведётся согласно рисунку:

Ответы:



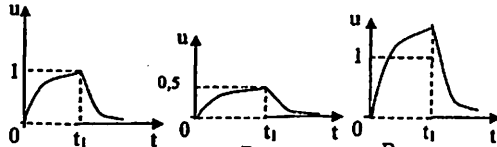
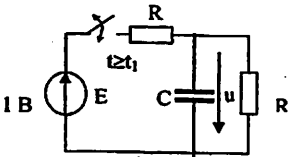
5.5.4. График переходного напряжения  $u$  на выходе цепи:

**Ответы:**

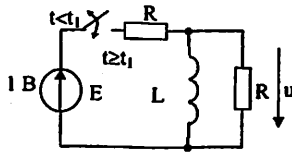


5.5.5. График переходного напряжения  $u$  на выходе цепи

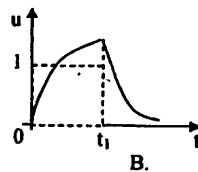
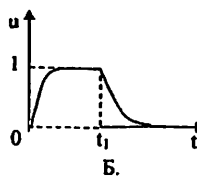
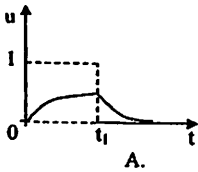
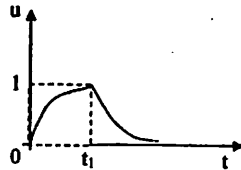
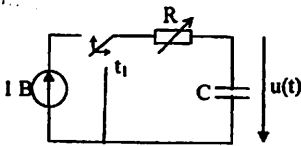
**Ответы:**



5.5.6. Используя ответы задания 5.5.4 указать график переходного напряжения  $u$  для цепи:



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



## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ

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

### 6.1. Теоретические сведения

Дифференцирующими цепями (ДЦ) называют такие четырехполюсники, (рис.6.1,а) напряжение на выходе которых  $u_2$  пропорционально производной от входного напряжения  $u_1$ , т.е.  $u_2 = \alpha (du_1/dt)$ , где  $\alpha$  - постоянный коэффициент.

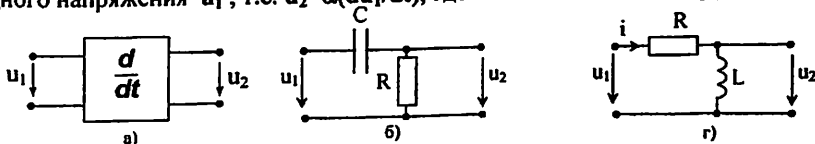


Рис. 6.1. Общее обозначения ДЦ (а), пассивная RC (б) и RL (в) ДЦ.

Различают пассивные и активные ДЦ. Простейшие пассивные двухэлементные RC- и RL- цепи (рис. 6.1,в, г) при определённых условиях являются пассивными ДЦ. Наибольшее применение для приближенного дифференцирования напряжения находит RC-цепь (рис. 6.1, б), для которой:

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

При  $u_R \ll u_C$

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

$$u_2 = u_R \approx RC \frac{du_C}{dt} = \tau \frac{du_1}{dt}, \quad (6.1)$$

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  $t_d$  сигналов ( $\tau \ll t_d$ ).

При установившемся гармоническом режиме комплексная передаточная функция RC-цепи (рис. 6.1,б)

$$H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (6.2)$$

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

$$\text{RC ДЦ} \quad H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} \approx j\omega RC = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (6.3)$$

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.

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  $\tau$  показаны на рис. 6.2.

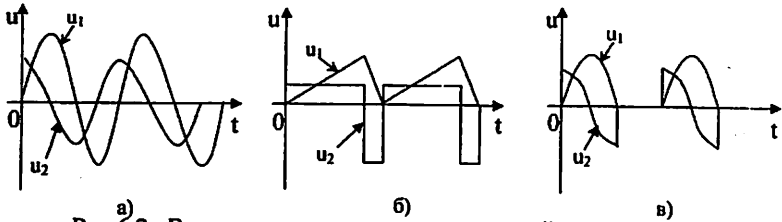


Рис.6.2. Временные диаграммы напряжений на входе  $u_1$  и выходе  $u_2$  ДЦ

На рис. 6.3 показаны напряжения на выходе  $u_2$  пассивной ДЦ (рис. 6.1) при подаче на её вход напряжения  $u_1$  в виде периодической последовательности однополярных прямоугольных импульсов (рис. 6.3,а) и разных значениях постоянной времени цепи  $\tau=RC$  (рис. 6.3,б-д). Наибольшее применение в импульсной технике находят режимы работы, когда  $\tau \ll t_u$  (см. рис. 6.3,в) и  $\tau \gg t_u$  (см. рис. 6.3,д). В первом случае (рис. 6.3,в) ДЦ используется для преобразования прямоугольных импульсов в короткие биполярные импульсы. Во втором случае (рис. 6.3,д) ДЦ используется как разделительная цепь.

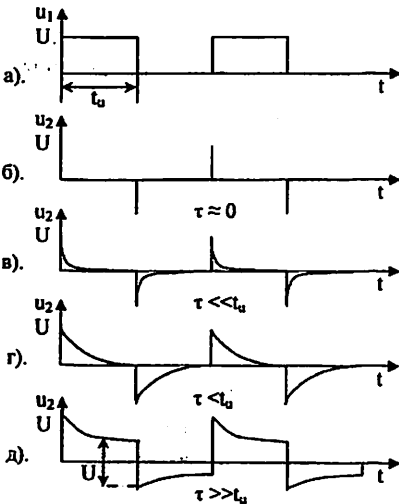


Рис. 6.3. Временные диаграммы напряжения на входе  $u_1$  и выходе  $u_2$  ДЦ.

## 6.2. Предварительный расчёт

6.2.1. По заданному варианту исходных данных (табл. 6.1) рассчитать:

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

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

6.2.2. Нарисовать примерную форму напряжения на выходе идеальной и реальной ДЦ  $u_2$  (рис. 6.2), если входное напряжение  $u_1$ :

а) синусоидальное;

б) пилообразное;

в) периодическая последовательность однополярных прямоугольных импульсов (рис.6.3,а).

Параметры ёмкостей конденсаторов

Таблица 6.1

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

### 6.3. Выполнение работы

#### 6.3.1. Исследование пассивной дифференцирующей RC- цепи при гармоническом воздействии

Собрать схему рис. 6.4,а или загрузить файл Lb6\_1.ewb, который содержит указанную схему.

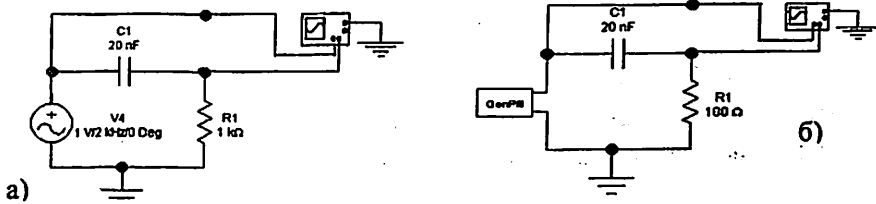


Рис.6.4. Исследование дифференцирующей RC- цепи: при гармоническом (а) и пилообразном (б) воздействии.

В схеме устанавливают требуемые параметры ёмкости  $C$  согласно табл. 6.1 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 . При этом картинка на экране модели осциллографа останавливается и производится регулировка с помощью управляющих клавиш наилучшей картинки. Зарисовать осциллограммы напряжений на входе  $u_1$  и выходе  $u_2$  ДЦ.

Зарисовать осциллограммы выходных напряжений  $u_2$  при уменьшении постоянной времени  $\tau$  в 10 раз путём уменьшения значения сопротивления  $R$  в 10 раз.

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

Для исследования пассивной дифференциальной RC-цепи (рис.6.1,б) при воздействии на неё напряжения пилообразной формы собрать схему рис.6.4,б или загрузить файл Lb6\_2.ewb, содержащий готовую схему. Далее повторяют действия, согласно п.6.3.1.

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

Для исследования пассивной дифференциальной RC-цепи (рис.6.1,б) при воздействии на неё периодической последовательности положительных прямоугольных импульсов (рис.6.3,а) собрать схему рис 6.5 или загрузить файл Lb6\_3.ewb, содержащий готовую схему.

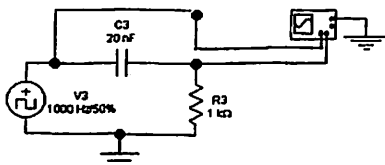


Рис.6.5. Исследование дифференцирующей RC- цепи при воздействии на неё положительных прямоугольных импульсов напряжения.

Далее, при заданном значении ёмкости С и рассчитанном значении сопротивления R и 0,1R выполняются исследования, аналогичные п.6.3.1.

### 6.4. Обработка результатов исследований

6.4.1. Сравните графики напряжений на входе  $u_1$  и выходе  $u_2$  ДЦ.

6.4.2. 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.

### 6.5. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

6.5.1. Название и цель работы.

6.5.2. Схемы исследуемых цепей и параметры элементов.

6.5.3. Результаты предварительного расчёта.

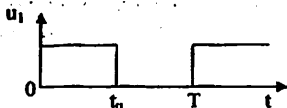
6.5.4. Графики входных и выходных напряжений исследуемых цепей.

6.5.5. Выводы по результатам расчётов и измерений.

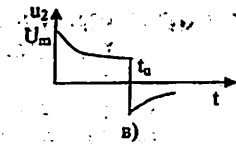
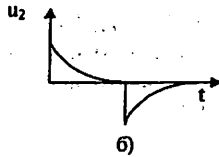
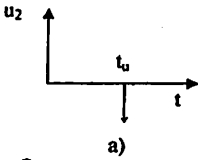
### 6.6. Контрольные вопросы и задачи

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

Качество дифференцирования



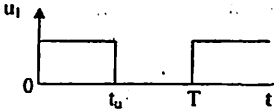
1. Идеальное
2. Удовлетворительное
3. Неудовлетворительное



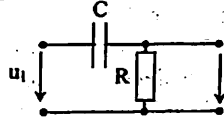
Ответы:

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

6.6.2. Значения  $\tau$  ДЦ для удовлетворительного дифференцирования.

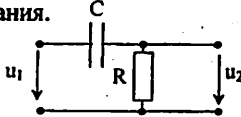


$t_u = 10 \text{ мс}$



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

6.6.3. Укажите соотношение между величинами постоянной времени  $\tau$  и длительностью входного импульса  $t_u$  для удовлетворительного дифференцирования.

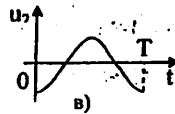
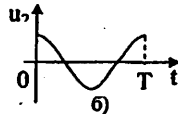
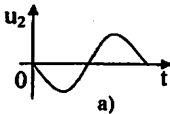
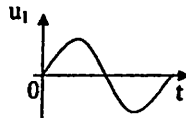


Ответы: а)  $RC < t_u$ ; б)  $RC \ll t_u$ ; в)  $RC = t_u$ ; г)  $RC > t_u$ ; д)  $RC \gg t_u$ .

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

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

6.6.5. Определить выходное напряжение  $u_2$  при идеальном дифференцировании данного сигнала:



Ответы:

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

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

## 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ LC-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА И ЧЕБЫШЕВА

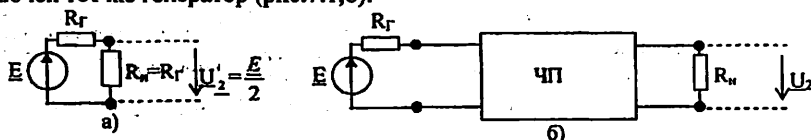
**Цель работы** - расчётно-экспериментальное исследование на ПК пассивных LC-фильтров Баттерворта и Чебышева с помощью программы анализа электрических схем EWB.

### 7.1. 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.7.1,а) к мощности  $P_n$ , которая передаётся в нагрузку  $R_n$  через ЧП, на входе которого включён тот же генератор (рис.7.1,б).



**Рис.7.1.** 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.7.1)

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

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

$$A = 20 \lg \frac{E}{2U_2} = 20 \lg \frac{E}{U_2} - 20 \lg 2 = 20 \lg \frac{E}{U_2} - 6, \text{ дБ.} \quad (7.1)$$

Последняя формула (7.1) удобна при экспериментальном измерении рабочего ослабления.

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

$A_s$  – минимально допустимое рабочее ослабление в ПЗ, дБ;

$f_{\sigma}, f_{\sigma 1}, f_{\sigma 2}$  – граничные частоты ПЗ, Гц;

$f_{\sigma}, f_{\sigma 1}, f_{\sigma 2}$  – граничные частоты ПП, Гц.



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

- фил. тр нижних частот (ФНЧ): ПП( $0 < f < f_r$ ); ПЗ( $f > f_s$ ) рис.7.2,а;
- фильтр верхних частот (ФВЧ): ПП( $f > f_r$ ); ПЗ( $0 < f < f_s$ ) рис.7.2,б;
- полосовой фильтр (ПФ): ПП( $f_{r1} < f < f_{r2}$ ); ПЗ( $0 < f < f_{s1}$ ,  $f > f_{s2}$ ) рис.7.2,в;
- режекторный фильтр (РФ): ПП( $0 < f < f_{r1}$ ,  $f > f_{r2}$ ); ПЗ( $f_{s1} < f < f_{s2}$ ) рис.7.2,г.

Для ПФ и РФ выполняется условие  $f_0 = \sqrt{f_{r1} f_{r2}} = \sqrt{f_{s1} f_{s2}}$ . (7.2)

На рис.7.2. показаны требования, предъявляемые к ЭФ при их проектировании.

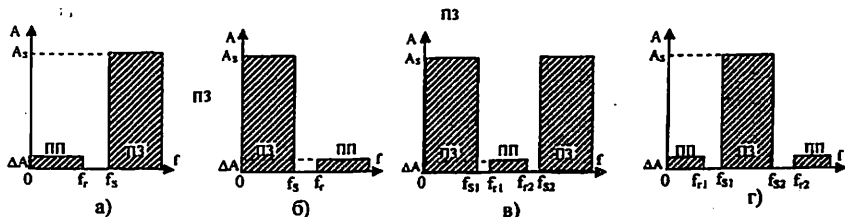


Рис.7.2. Требования к частотным характеристикам рабочего ослабления, предъявляемые при проектировании: ФНЧ(а); ФВЧ(б); ПФ(в); РФ(г).

На рис.7.3 показано обозначаются ЭФ на структурных схемах.

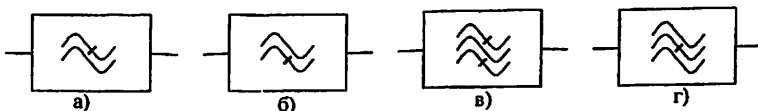


Рис.7.3. Обозначение на структурных схемах: ФНЧ(а); ФВЧ(б); ПФ(в); РФ(г).

Рабочее ослабление фильтров Баттерворта рассчитывается по формуле

$$A = 10 \lg(1 + \Omega^{2n}), \text{ дБ}, \quad (7.3)$$

фильтров Чебышева  $A = 10 \lg[1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)], \text{ дБ}, \quad (7.4)$

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

$\Omega$  - 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  $\Omega = (f_{r2} - f_{r1})/(f - f_0^2/f)$ . (7.5)

-  $T_n(\Omega)$  - полином Чебышева порядка n. Ниже приведены шесть первых полинома Чебышева:  $T_0(\Omega) = 1$ ;  $T_1(\Omega) = \Omega$ ;  $T_2(\Omega) = 2\Omega^2 - 1$ ;  
 $T_3(\Omega) = 4\Omega^3 - 3\Omega$ ;  $T_4(\Omega) = 8\Omega^4 - 8\Omega^2 + 1$ ;  $T_5(\Omega) = 16\Omega^5 - 20\Omega^3 + 5\Omega$ . (7.6)

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

$$T_n(\Omega) = \cos(n \arccos \Omega). \quad (7.7)$$

При  $|\Omega| > 1$  соответствующему ПЗ, полином Чебышева также представляется в тригонометрической форме

$$T_n(\Omega) = \text{ch}(n \text{ arch } \Omega). \quad (7.8)$$

На рис. 7.4 приведены частотные характеристики рабочего ослабления ФНЧ Баттерворта (а) и Чебышева (б).

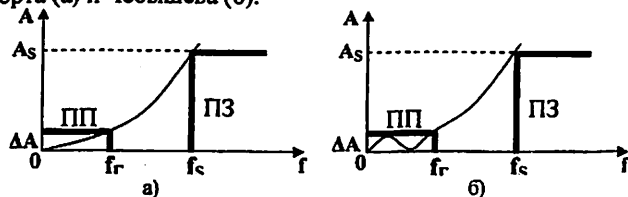


Рис.7.4. Частотные характеристика рабочего ослабления а) ФНЧ Баттерворта; б) ФНЧ Чебышева.

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  $\Delta A$ , наибольшее ослабление в ПЗ  $A_s$  имеет фильтр Чебышева. Однако частотная характеристика рабочего ослабления фильтра Баттерворта имеет в ПП монотонный характер и легче поддаётся корректированию для устранения искажений передаваемых сигналов. Выбор типа ЭФ определяется конкретными условиями их применения в аппаратуре связи.

## 7.2. Предварительный расчёт

Для заданного преподавателем типа ЭФ и варианта технических требований (см. табл. 7.1) выполнить расчет ЭФ.

Таблица 7.1

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

№	Тип ЭФ	$\Delta A$ , дБ	$A_s$ , дБ	$R$ , Ом	ФНЧ			ПФ			РФ			
					$f_r$ , Гц	$f_c$ , Гц	$A_s$ , дБ	$f_{\Pi 1}$ , Гц	$f_{\Pi 2}$ , Гц	$A_s$ , дБ	$f_{\Pi 1}$ , Гц	$f_{\Pi 2}$ , Гц	$A_s$ , дБ	
1	БВ	3	10	50	10	20	20	10	7	10	20	7	10	20
	ЧБ	0,5	10	50	10	20	20	10	7	10	20	7	10	20
2	БВ	3	13	75	20	40	40	20	15	20	30	15	20	30
	ЧБ	1,0	13	75	20	40	40	20	15	20	30	15	20	30
3	БВ	3	15	100	30	60	60	30	25	30	40	25	30	40
	ЧБ	2,0	15	100	30	60	60	30	25	30	40	25	30	40
4	БВ	3,0	17	150	40	80	80	40	35	40	50	35	40	50
	ЧБ	3,0	17	150	40	80	80	40	35	40	50	35	40	50
5	БВ	3	18	300	50	100	100	50	45	50	50	45	50	50
	ЧБ	2,0	18	300	50	100	100	50	45	50	50	45	50	50

Для ПФ и РФ  $f_0 = \sqrt{f_{\Pi 1} f_{\Pi 2}} = \sqrt{f_{\Pi 1} f_{\Pi 2}}$ .

### Последовательность расчета ЭФ Баттерворта и Чебышева

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

7.2.2. Определяется порядок ФНЧП

Баттерворта по формуле 
$$n \geq (A_s - 10 \lg(10^{0,1\Delta} - 1)) / 20 \lg \Omega_s \quad (7.9)$$

Чебышева по формуле 
$$n \geq \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0,1A_s} - 1}{10^{0,1M} - 1}}}{\text{Arch} \Omega_s} \quad (7.10)$$

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

7.2.3. Зная порядок фильтра  $n$ , например  $n=3$ , можно составить две схемы ФНЧП: с Т-образным (см. рис. 7.5, а) и П-образным (см. рис. 7.5, б) входом, которые обеспечивают требуемую частотную характеристику рабочего ослабления  $\Delta A$  в ПП и  $A_s$  в ПЗ.

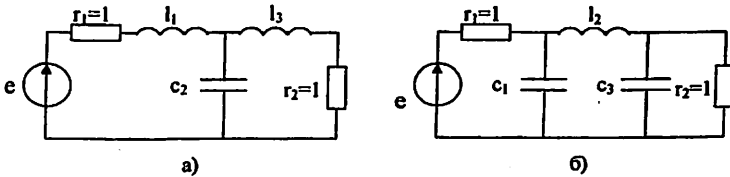


Рис. 7.5 Схема ФНЧП Баттерворта и Чебышева при  $n=3$  с Г-образным входом (а) и с П-образным входом (б)

7.2.4. Определяются нормированные параметры элементов ФНЧП Баттерворта из табл. 7.1, Чебышева – табл. 7.2.

Таблица 7.2

Значения параметров нормированных элементов ФНЧП Баттерворта

$n$	$C_1 = 1/l_1$	$C_2 = l_2$	$C_3 = 1/l_3$	$C_4 = l_4$	$C_5 = 1/l_5$	$C_6 = l_6$	$C_7 = 1/l_7$	$C_8 = l_8$
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 7.3




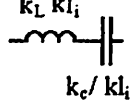
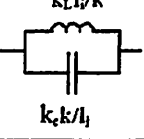



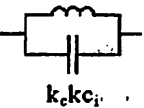
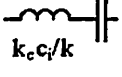
## Нормированные параметры элементов ФНЧП Чебышева

Порядок ФНЧП, n	$\epsilon$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\rho_6$	$\rho_7$	$\rho_8$
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		2,024	0,994	2,024					
		2,135	1,091	3,001	1,091	2,135			
		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		3,349	0,712	3,349					
		3,481	0,762	4,538	0,762	3,481			
		3,519	0,772	4,639	0,804	4,639	0,772	3,519	

7.2.5. Вычерчивают реальную схему электрического фильтра ФНЧ, ФВЧ, ПФ или РФ. Преобразование ФНЧП в реальную схему и расчёт параметров её элементов осуществляется с помощью табл. 7.3.

Таблица 7.3

## Преобразование ФНЧП в схему проектируемого фильтра.

ФНЧП	ФНЧ	ФВЧ	ПФ	РФ
				
				

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

$$k_L = R / (2\pi f_0), \text{ Гн}; \quad k_C = 1 / (2\pi f_0 R), \text{ Ф}; \quad k_R = R, \text{ Ом}; \quad (7.11)$$

$$R = R_1 = R_H, \text{ Ом},$$

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

$$f_0 = \sqrt{f_{r1} f_{r2}} = \sqrt{f_{s1} f_{s2}} - \text{ для ПФ и РФ}; \quad (7.12)$$

$$k=f_0/(f_{r2}-f_{r1}) \text{ - для ПФ и РФ} \quad (7.13)$$

7.2.7. Рассчитать частотную характеристику рабочего ослабления  $A(f)$  в ПЗ фильтра Баттерворта по формуле (7.3), Чебышева по формуле (7.4) при нормированных частотах  $\Omega = 1; 1,5; \Omega_5; 2,5; 3$ . Результаты предварительного расчёта занести в табл. 7.4. Значения реальных частот определяются по формулам: для ФНЧ  $f = \Omega f_r$ ; для ФВЧ  $f = f_r / \Omega$ ; для ПФ  $f_{12} = \Omega \Delta f / 2 + [(\Omega \Delta f / 2)^2 + f_0^2]^{1/2}$ ;  $f_{11} = f_0^2 / f_{12}$ ; для РФ  $f_{12} = [(\Delta f / 2 \Omega)^2 + f_0^2]^{1/2} - \Delta f / 2 \Omega$ ;  $f_{11} = f_0^2 / f_{12}$ ; где  $\Delta f = f_{r2} - f_{r1}$ .

$f_{11}, f_{12}$  – частоты одинакового ослабления  $A(f_{11}) = A(f_{12})$ .

Для ФНЧ и ФВЧ в таблице 7.4 каждой  $\Omega$  соответствует одна реальная частота  $f_i$ . Для ПФ и РФ в таблице 7.4 каждой  $\Omega$  соответствуют две реальные частоты -  $f_{11}$  и  $f_{12}$ , на которых рабочее ослабление одинаковое.

Таблица 7.4

Результаты предварительного расчёта и моделирования

Диаг. ЭФ	С	А	В	С	А	В	С	А	В
Входные частоты									
Выходные частоты									
Расчёт									
Моделирование									

### 7.3. Выполнение лабораторной работы

7.3.1. Загрузить с дискетки или с HD текстовый файл LabRab7.doc и ознакомиться с содержанием и методикой выполнения лабораторной работы. Далее производится измерение частотной характеристики рабочего ослабление  $A(f)$  заданного фильтра двумя методами: с помощью генератора и вольтметра; с помощью измерителя частотных характеристик (ИЧХ) Бюде плоттера.

7.3.2. Загрузить в ПК с дискетки или с HD схемный файл Lb7-1.ewb в результате чего на экране монитора ПК появится изображение, представленное на рис.7,6.

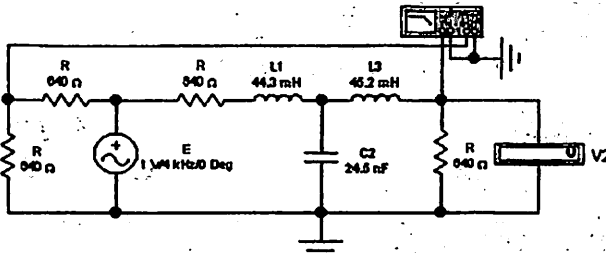


Рис.7.6. Схема для исследования частотной характеристики рабочего ослабления  $A(f)$  фильтра.

7.3.3. Заменить схему ЭФ, представленную на рис.7,6, на заданную схему ЭФ и установить численные значения параметров её элементов ( $R, L1, L3, C2, \dots$ ).

**7.3.4. 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. 7.4). 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 щёлкнув 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. 7.4. Аналогичные измерения выполнить на всех остальных частотах, содержащихся в табл. 7.4. Рабочее ослабление ЭФ на всех частотах рассчитывается по формуле  $A=201g(E/U_2)-6$ , дБ и заносится в табл. 7.4. По результатам предварительного расчёта и измерений (моделирования) строятся графики  $A(f)$ .

**7.3.5. Измерение частотной характеристики  $A(f)$  заданного ЭФ с помощью измерителя частотных характеристик (ИЧХ) – «Бюде 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.7.7).

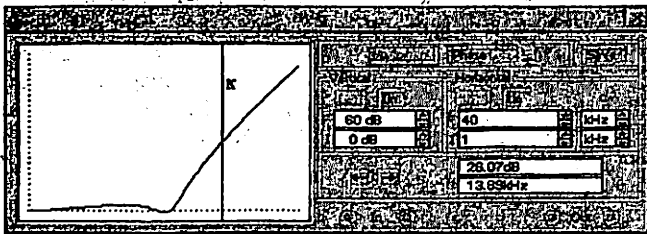


Рис.7.15. Передняя панель Bode Plotter с изображением частотной характеристики  $A(f)$  ФНЧ Чебышева при  $n=3$  (рис.7.6).

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



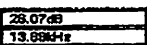
Для измерения  $B(f)$  надо щёлкнуть мышью по клавише



Перемещая вертикальный курсор к бюде 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.7.4.

## 7.4. Содержание отчёта

7.4.1. Название и цель работы.

7.4.2. Требования к частотной характеристике рабочего ослабления исследуемого ЭФ.

7.4.3. Предварительный расчёт ЭФ Баттерворта (Чебышева), результаты которого заносятся в табл. 7.4.

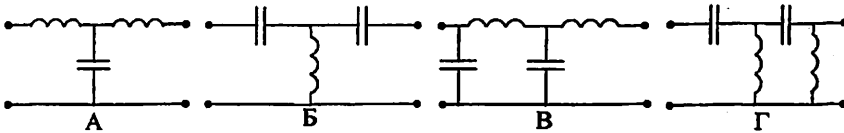
7.4.4. Графики рассчитанной и измеренной частотных характеристик рабочего ослабления  $A(f)$  заданного ЭФ.

7.4.5. Выводы из результатов расчёта и моделирования на ПЭВМ фильтра Баттерворта (Чебышева).

## 7.5. Контрольные вопросы

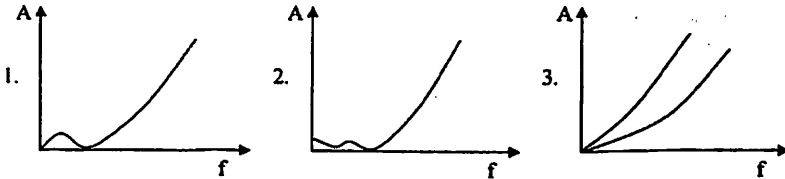
7.5.1. Укажите схему ФНЧ Баттерворта 4-го порядка

Ответы:

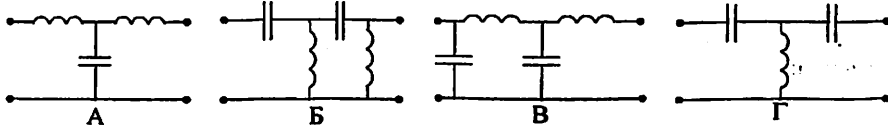


7.5.2. Установите соответствие между частотными характеристиками и схемами.

Частотные характеристики ослабления:



Схемы фильтров:



Ответы:

A. 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

7.5.3. 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, г, е; В. а, в, г, е; Г. а, б, д.

7.5.4. Укажите правильные ответы.

ФНЧ-прототип – это фильтр нижних частот:

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

7.5.5. Укажите достоинства фильтров Баттерворта:

- а) простота схем;  
 б) монотонное возрастание частотной характеристики ослабления в ПП и 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.

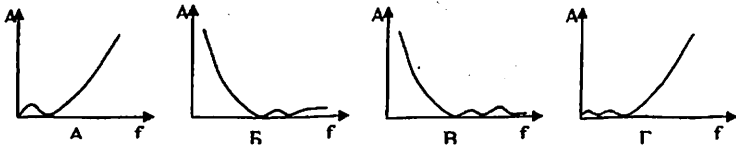
7.5.6. Укажите достоинства фильтров Чебышева:

- 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.

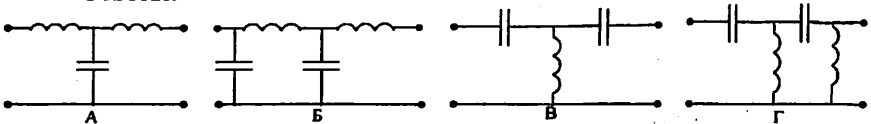
7.5.7. Укажите частотную характеристику ФВЧ Чебышева при  $n=4$ .

Ответы:



7.5.8. Определите порядок и укажите схему фильтра, удовлетворяющего требованиям:  $f_C=2$  кГц,  $f_S=1$  кГц,  $\Delta A=3$  дБ,  $A_S=15$  дБ.

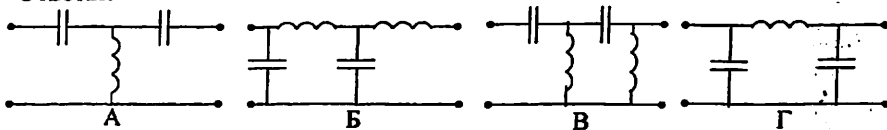
Ответы:





7.5.9. 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:



7.5.10. Как изменится ЧХ ослабления фильтра (рис. 7.4), 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.

7.5.11. Как изменится ЧХ ослабления фильтра (рис. 7.4), 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ПІ

### 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) Заземление 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».

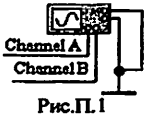


Рис.П.1

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.

Режим «AC» предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (этот режим еще называют режимом «закрытого входа»). В этом режиме усилитель «Y» осциллографа не пропускает постоянную составляющую сигнала. В режиме «0» входной зажим канала соединяется с общим полюсом – «землей». Этот режим используется тогда, когда нужно посмотреть на экране только один сигнал.

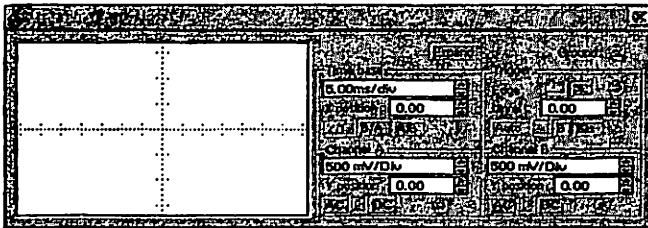


Рис.П.2

В режиме “DC” (включен по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим называют также режимом “открытого входа”.

С правой стороны от кнопки “DC” (рис. П.2) расположены входные клеммы каналов, к которым подключаются исследуемые сигнала (см. рис. П.1).

4) Режим скорости горизонтальной развертки устанавливается в блоке «Time base». Скорость развертки двух каналов можно установить в пределах 0.1 ns/div – 1.0 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 картинка 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) – увеличивается размер экрана и появляется возможность подробно сравнить два сигнала по форме. При сравнении форм сигналов нужно учитывать чувствительность прибора по входным каналам.

С помощью прокрутки (перемещения) изображений сигналов по горизонтали и их сканирования вертикальными визирными линиями (красного и синего цвета), можно измерить мгновенные значения переменных напряжений в заданный момент времени. Эти параметры выводятся в два соответствующих прямоугольных окна на панели осциллографа.

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.

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

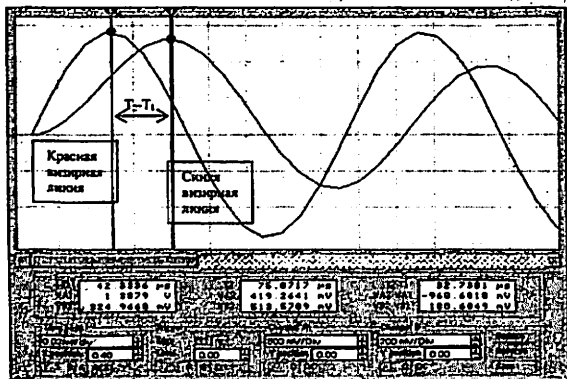
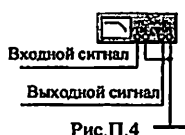


Рис.П.3

## ПРИЛОЖЕНИЕ П2

### Правила работы с измерителем АЧХ – ФЧХ

Кнопка **Измерителя АЧХ-ФЧХ** находится в библиотеке **Instruments** рабочего окна программы. На рис.П.4 показано условное обозначение измерителя и назначение внешних полюсов прибора также способ подключения его к исследуемой схеме. Измеритель предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке **MAGNITUDE** включена по умолчанию) и ФЧХ (при нажатой кнопке **PHASE**) характеристик. На рис.П.5 показана передняя панель измерителя в режиме измерения АЧХ (**MAGNITUDE**). Прибор содержит два канала: по оси **Y (VERTICAL)** –



на панели расположен слева и по оси **X (HORIZONTAL)**. Масштаб по осям можно выбрать логарифмическим (кнопка **LOG**, включена по умолчанию) и линейным (кнопка **LIN**).

Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи и фазы по оси **Y** и вариации

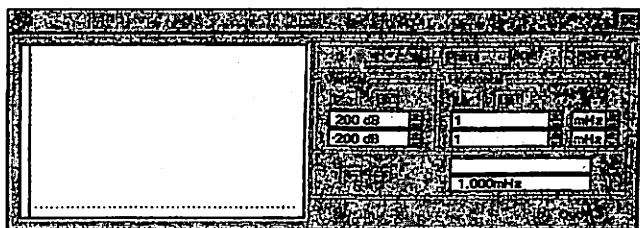


Рис. П.5.

частоты по оси **X** с помощью кнопок в окошках **F** - максимальное и **I** - минимальное значение.

Значения коэффициента передачи и фазы при соответствующей частоте выводятся в двух окошках в правом нижнем углу панели.

Точка на характеристике, в которой требуется определить значения указанных величин, выбирается с помощью вертикальной визирной линейки, находящейся в исходном состоянии в начале координат и перемещаемой по графику мышью или кнопками «←» и «→».

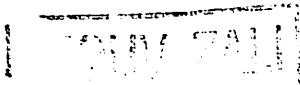
*Перемещая дискретно визирную линейку вдоль характеристики и записывая значения величин  $K(f)$  и  $\varphi(f)$ , можно построить на чертеже АЧХ и ФЧХ по точкам.*

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 про. рамы 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. Бакалов В.П. и др. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов/ В.П. Бакалов, А.Н. Игнатов, Б.И. Крук.-М.: 1989.-528 с.
4. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. «Радиотехника». М.: Высш. шк., 1985.-496 с.
5. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей: Учебник для вузов.- М.: Радио и связь, 1986.-544 с.
6. Толстов Ю.Г, Теврюков А.А. Теория электрических цепей. Учеб. Пособие для электротехнич. и радиотехнич. Вузов. М., «Высшая школа», 1971.-296 с.
7. 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.
8. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. Учеб. пособ. для электротехнич., радиотехнич. спец. вузов.- 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990.-544 с.
9. 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. Проверка законов Кирхгофа для ЛЭЦ постоянного тока.....	12
3. Исследование RL- и RC- цепей при гармоническом воздействии.....	17
4. Исследование резонанса в последовательном колебательном контуре.....	24
5. Исследование переходных процессов в RL, RC и RLC-цепях.....	32
6. Исследование дифференцирующих цепей.....	41
7. Исследование пассивных LC-фильтров Баттерворта и Чебышева.....	46
Приложение П1. Правила работы с двухканальным осциллографом.....	56
Приложение П2. Правила работы с измерителем АЧХ – ФЧХ.....	59
Литература.....	60

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
к  
ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
с использованием программы  
«Electronics Workbench»

для студентов специального заочного образования, обучающихся по  
направлениям:

5522100 - «Телекоммуникация» и

5522200 - «Профессиональное образование (Телекоммуникация)». Ташкент,  
ТУИТ, 2008.-61 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. ....

Е.

Бумага офсетная. Заказ №. 429  
Тираж 50

Отпечатано в типографии ТУИТ  
700084 Ташкент, ул. Амира Тимура 108