

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

С. А. СИЛЬВАШКО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 621.3 : 621.38(07)

ББК 31.2 + 32.85я7

С 36

Рецензент

доктор технических наук, профессор В. Н. Булатов

Сильвашко, С. А.

С 36 Электротехника и электроника : методические указания к лабораторному практикуму / С. А. Сильвашко. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2009. – 86 с.

Лабораторный практикум состоит из 6 лабораторных работ по исследованию электрических цепей постоянного и переменного тока, а также элементов и узлов аналоговых и цифровых электронных устройств. Каждая работа включает краткое изложение теоретического материала, задание для подготовки к работе, описание методики проведения опытов и контрольные вопросы.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ в пятом и шестом семестрах обучения при изучении дисциплины «Электротехника и электроника» студентами факультета дистанционных образовательных технологий, обучающимися по программам высшего профессионального образования по специальности 230105.65 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

УДК 621.3 : 621.38(07)

ББК 31.2 + 32.85я7

© Сильвашко С. А., 2009

© ГОУ ОГУ, 2009

Содержание

1 Общие сведения.....	5
2 Основные сведения о программе Electronics Workbench	7
2.1 Интерфейс программы	7
2.2 Сборка схемы.....	8
2.3 Измерительные приборы.....	11
2.4 Производство измерений.....	15
3 Лабораторная работа № 1. Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях	16
3.1 Краткие сведения из теории	16
3.2 Подготовка к работе.....	19
3.3 Задание на проведение исследований	20
3.4 Порядок проведения исследований	20
3.5 Контрольные вопросы	22
3.6 Варианты исходных данных	23
4 Лабораторная работа № 2. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях первого порядка.....	24
4.1 Краткие сведения из теории	24
4.2 Подготовка к работе.....	31
4.3 Задание на проведение исследований	31
4.4 Порядок проведения исследований	31
4.5 Контрольные вопросы	34
4.6 Варианты исходных данных	34
5 Лабораторная работа № 3. Исследование спектров периодических и апериодических сигналов.....	35
5.1 Краткие сведения из теории	35
5.1.1 Краткие сведения об использовании программы Mathcad	40
5.2 Подготовка к работе.....	41
5.3 Задание на проведение исследований	42
5.4 Порядок проведения исследований.....	42
5.5 Контрольные вопросы	43
5.6 Варианты исходных данных	44
6 Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик полупроводниковых приборов.....	45
6.1 Краткие сведения из теории.....	45
6.1.1 Полупроводниковые диоды	45
6.1.2 Биполярные транзисторы	48
6.2 Подготовка к работе.....	50
6.3 Задание на проведение исследований	50
6.4 Порядок проведения исследований.....	51
6.5 Контрольные вопросы	54
6.6 Варианты исходных данных	55
7 Лабораторная работа № 5. Исследование преобразователей аналоговых сигналов на операционных усилителях	56

7.1 Краткие сведения из теории.....	56
7.2 Подготовка к работе	65
7.3 Задание на проведение исследований	65
7.4 Порядок проведения исследований.....	65
7.5 Контрольные вопросы	69
7.6 Варианты исходных данных	70
8 Лабораторная работа № 6. Исследование последовательностных логических устройств.....	71
8.1 Краткие сведения из теории.....	71
8.2 Подготовка к работе.....	74
8.3 Задание на проведение исследований	75
8.4 Порядок проведения исследований.....	75
8.5 Контрольные вопросы	78
8.6 Варианты исходных данных	78
9 Список рекомендуемой литературы.....	79
Приложение А Пример оформления отчета по лабораторной работе.....	80

1 Общие сведения

Целью лабораторного практикума по курсу «Электротехника и электроника» является закрепление знаний по основам электротехники, аналоговой и цифровой электроники, а также приобретение навыков исследования процессов в цепях постоянного и переменного тока, экспериментального определения основных характеристик элементов и узлов электрических цепей. В течение двух семестров обучения по курсу «Электротехника и электроника» рабочей программой предусмотрено выполнение шести лабораторных работ (по три в каждом семестре).

Все лабораторные работы выполняются в среде компьютерной программы моделирования электрических и электронных схем Electronics Workbench 5.12 (EWB). Краткие сведения об интерфейсе программы и рекомендации по эффективному использованию ее функциональных возможностей приведены в разделе 2.

В процессе подготовки к выполнению лабораторной работы студент должен изучить теоретические положения по вопросам, предполагаемым к исследованию, используя при этом раздел «Краткие сведения из теории» методических указаний и рекомендованную литературу. После изучения теоретических положений необходимо ознакомиться с методическими указаниями по соответствующей работе и подготовить *отчет* о проведении исследований, в который занести *название и цель работы, электрические схемы, используемые при проведении исследований, заготовки таблиц* для заполнения экспериментальными данными исследований, *расчетные формулы*, используемые для обработки результатов исследований. Если предусмотрено заданием к конкретной лабораторной работе, *выполнить* требуемые *предварительные расчеты*.

Примечание – Каждый студент при выполнении лабораторной работы использует индивидуальные исходные данные (номинальные значения параметров элементов используемых схем, испытательных сигналов и т. д.), приведенные в конце методических указаний к каждой лабораторной работе. Номер варианта исходных данных выбирается с учетом первой буквы в фамилии студента.

Исследования по теме лабораторной работы проводятся в соответствии с требованиями и рекомендациями, изложенными в методических указаниях. *Экспериментальные результаты*, полученные в процессе исследований, заносятся в *отчет*. По полученным результатам, если предусмотрено методическими указаниями, строят *графики* соответствующих *функциональных зависимостей*.

После завершения исследований каждый студент индивидуально оформляет отчет о выполненной лабораторной работе. Пример оформления отчета приведен в приложении А. Отчет должен содержать все элементы, выделенные выше в тексте курсивом. Кроме этого необходимо проанализировать результаты экспериментов, сопоставить их с известными теоретическими положениями, обобщить результаты исследований в виде

лаконичных *выводов* по каждому пункту проведенных исследований. Выводы могут быть помещены либо после каждого выполненного пункта исследований, либо в конце отчета по лабораторной работе.

В процессе подготовки к выполнению лабораторной работы необходимо продумать ответы на вопросы, приводимые в методических указаниях в конце каждой работы.

2 Основные сведения о программе Electronics Workbench

Программа моделирования электрических и электронных схем Electronics Workbench (EWB) позволяет собирать и исследовать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы различной степени сложности.

Исследуемая схема собирается на **рабочем поле** при одновременном использовании **мыши** и **клавиатуры**. Применение в работе только клавиатуры невозможно. При построении и редактировании схем выполняются следующие **операции**:

- выбор компонента из библиотеки компонентов;
- выделение объекта;
- перемещение объекта;
- копирование объектов;
- удаление объектов;
- соединение компонентов схемы проводниками;
- установка значений компонентов;
- подключение приборов.

Если схема не помещается на экране монитора, любой ее участок можно просмотреть при помощи линейек прокрутки, расположенных справа и под рабочим полем.

2.1 Интерфейс программы

После запуска программы EWB открывается главное ее окно, показанное на рисунке 2.1.

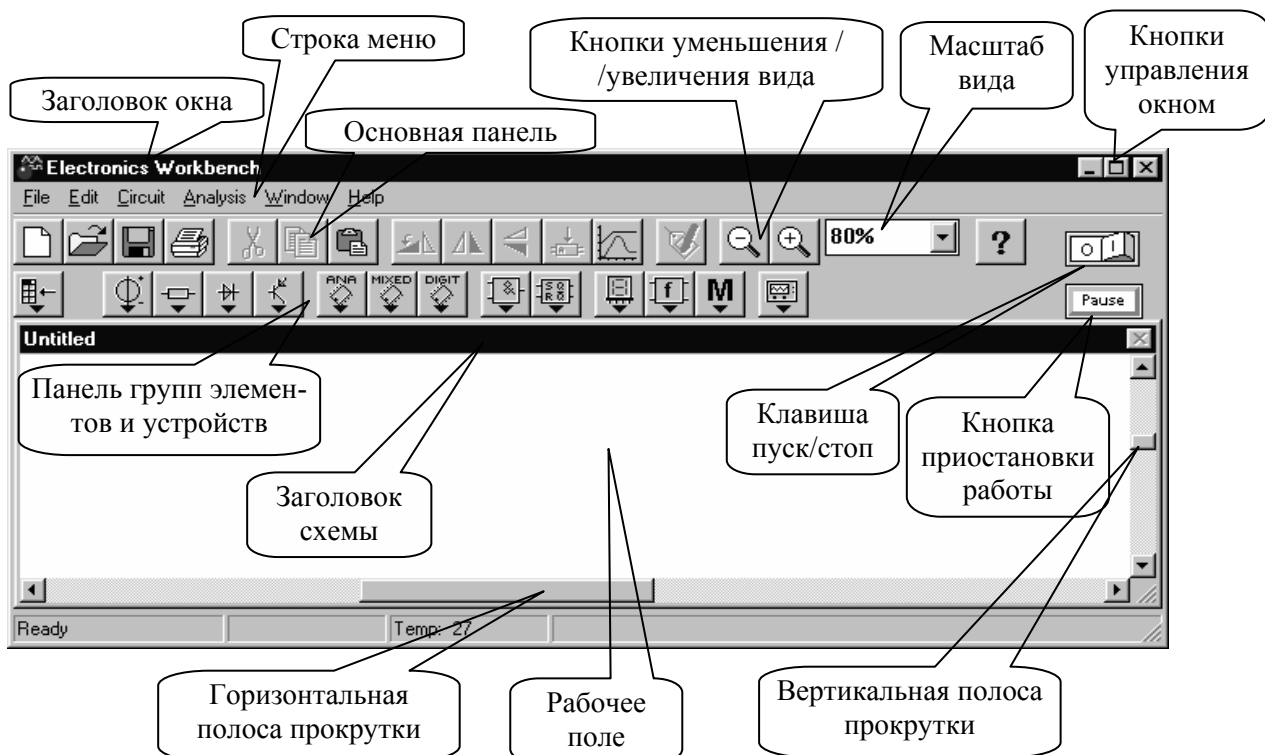


Рисунок 2.1

Главное окно программы устроено аналогично всем окнам MS Windows. Под заголовком окна находится строка меню с группами команд (*File*, *Edit*, *Circuit*, *Analysis*, *Window* и *Help*). Под строкой меню расположены две панели с кнопками: основная (для работы с файлами, элементами окна, параметрами внешнего вида) и панель с группами элементов. В правом верхнем углу окна находятся клавиша «Пуск / Стоп» для запуска – остановки моделирования (обозначена «O/I») и кнопка приостановки моделирования («Pause»). Под строкой заголовка схемы находится рабочее поле для сборки электрической цепи и подключения приборов.

2.2 Сборка схемы

Процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле EWB элементов цепи из наборов компонентов программы в соответствии с подготовленным эскизом.

Для открытия нужного набора компонентов необходимо подвести курсор мыши к соответствующей кнопке наборов и нажать один раз левую клавишу, после чего откроется окошко с кнопками – компонентами. На рисунке 2.2 показана нажатая кнопка с набором элементов «Источники» («Sources»).

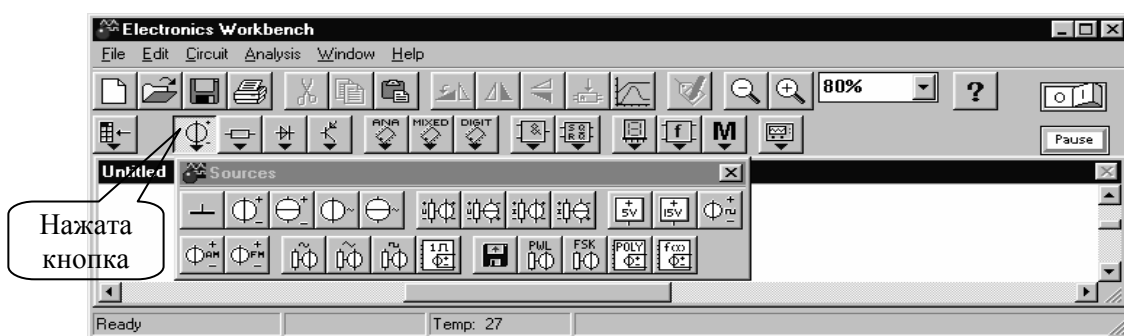


Рисунок 2.2

Необходимый для создания схемы элемент переносится (перетаскивается) из открывшегося окошка группы элементов на рабочее поле программы движением мыши при нажатой и удерживаемой левой кнопке. Требуемые параметры элементов схемы (например, сопротивление резистора, его метка – обозначение на схеме) устанавливаются в раскрывающемся диалоговом окне (рисунок 2.3) после двойного щелчка мышью по значку компонента (ввод значений производится с клавиатуры, а кратность /дольность единиц измерения с помощью мыши), выбор подтверждается нажатием кнопки «Ok» или клавиши «Enter».

Измерительные приборы также имеют элементы настройки. На рисунке 2.4 показаны диалоговые окна «Свойств» вольтметра и амперметра. Здесь, в частности, на вкладке «Значение» можно выбрать режим измерений и установить внутреннее сопротивление.

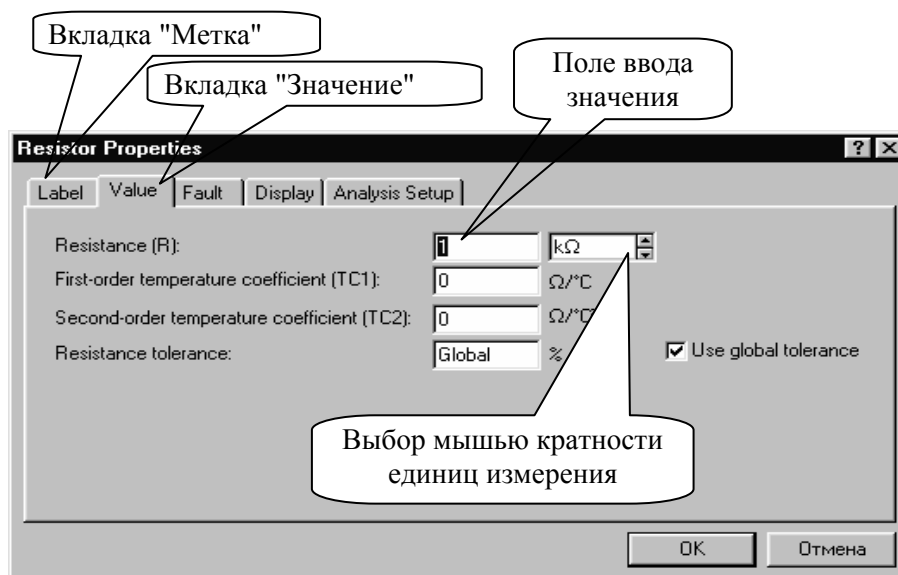


Рисунок 2.3

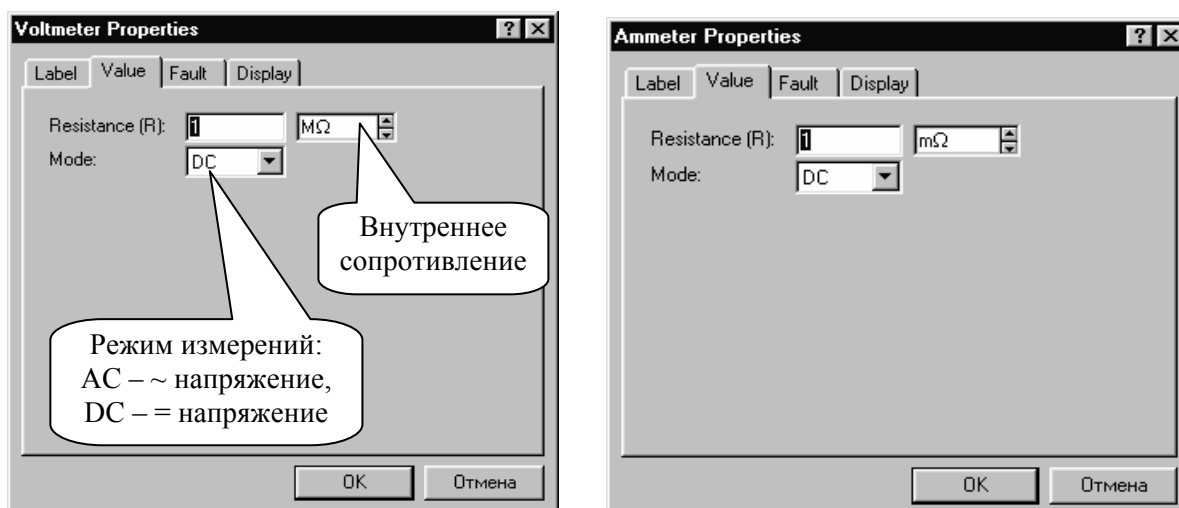


Рисунок 2.4

Наиболее важным при использовании измерительных приборов является правильный выбор *режима измерений*. В режиме **DC** измеряется среднее значение (**постоянные напряжения, токи**), а в режиме **AC** – действующее (**переменные напряжения, токи**).

После размещения всех необходимых компонентов схемы на рабочем поле, производится *соединение их выводов проводниками*. При этом необходимо учитывать, что **к выводу компонента можно подключить только один проводник**. Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента, после появления кружочка черного цвета нажимается левая кнопка и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нем такого же кружочка черного цвета. После этого кнопка мыши отпускается и соединение готово.

Если соединение нужно разорвать (удалить), курсор подводится к одному из выводов компонентов или точке соединения и при появлении кружочка нажимается левая кнопка. Проводник при удерживаемой левой кнопке отводится на свободное место рабочего поля, после чего кнопка отпускается. Удалить имеющееся соединение («проводник») можно и другим способом: подвести курсор мыши к удаляемому соединению, нажать правую кнопку и в открывшемся контекстном меню выбрать команду «Delete».

Если необходимо подключить вывод компонента к уже имеющемуся на схеме проводнику, то проводник от вывода компонента курсором подводится к указанному проводнику и после появления точки соединения кнопка мыши отпускается.

Если необходимо переместить отдельный сегмент проводника, к нему подводится курсор, нажимается левая кнопка и после появления в вертикальной или горизонтальной плоскости двойного курсора (рисунок 2.5) можно произвести нужные перемещения (не отпуская кнопки мыши).

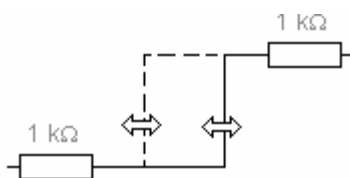


Рисунок 2.5

Все проводники в EWB по умолчанию черного цвета. Но цвет проводника можно изменить. В частности при использовании для анализа сигналов (их формы, параметров) осциллографа удобно, чтобы сигналы на входе и выходе исследуемой схемы отображались на экране разными цветами. Для изменения цвета проводника необходимо двойным щелчком на изображении проводника открыть окно, приведенное на рисунке 2.6, и в открывшемся окне мышью выбрать требуемый цвет.

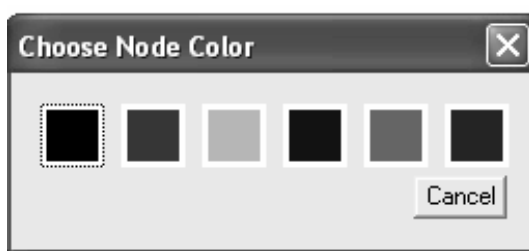





Рисунок 2.6

Для поворота какого-либо элемента (**не соединенного проводниками**) на 90° нужно щелкнуть на нем мышью (элемент выделяется красным цветом) и нажать комбинацию клавиш $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{R} \rangle$, либо нажать мышкой на кнопку  на основной панели инструментов. Для поворота выделенного элемента вдоль

вертикальной или горизонтальной оси следует нажать мышкой на кнопку  или  на основной панели инструментов.

2.3 Измерительные приборы

В программе EWB для анализа электрических и электронных схем могут быть использованы различные источники сигналов и измерительные приборы. Источники сигналов постоянного и переменного тока различной формы (в том числе немодулированных и модулированных) сосредоточены в наборе элементов «Источники» («*Sources*»). Кроме этого в наборе инструментов («*Instruments*») (рисунок 2.7) содержится функциональный генератор (рисунок 2.8), позволяющий подать на вход исследуемой схемы колебание синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы.

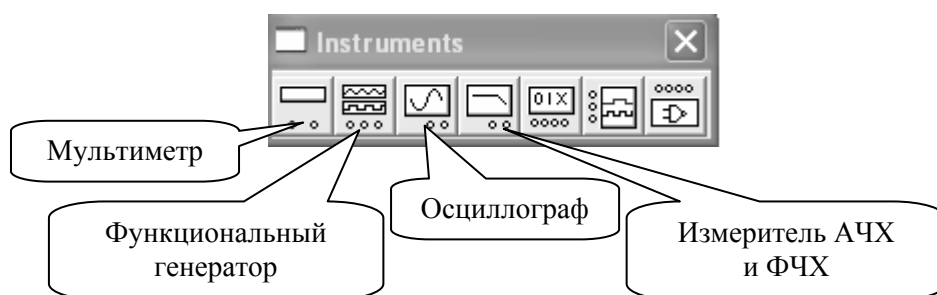


Рисунок 2.7

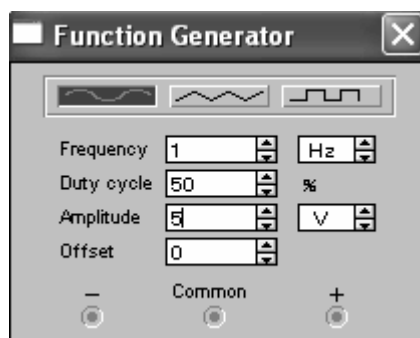


Рисунок 2.8

С помощью клавиш на передней панели прибора можно установить частоту «*Frequency*» в Гц; коэффициент заполнения «*Duty cycle*» в %; амплитуду «*Amplitude*» в В и постоянную составляющую (смещение нулевого уровня) «*Offset*» в В. Генератор имеет два выхода «+» и «-», с помощью которых можно получить два выходных сигнала, сдвинутых на 180°. При заземленном общем выводе «*Common*» можно получить парафазный сигнал.

При анализе электрических схем аналоговых устройств из семи приборов, предусмотренных в программе, используются первых четыре (рисунок 2.7).

Мультиметр («*Multimeter*») можно использовать при измерениях напряжения V , тока A , сопротивления Ω и затухания dB . Прибором можно измерять постоянные и переменные напряжения и токи. Выбор режима работы прибора определяется с помощью клавиш на его передней панели. При измерениях переменного напряжения и тока прибор показывает *действующие значения*.

При использовании мультиметра можно задать его паразитные параметры: внутреннее сопротивление амперметра «*Ammeter resistance*»; внутреннее сопротивление вольтметра «*Voltmeter resistance*»; измерительный ток омметра «*Ohmmeter Current*»; эталонное напряжение при измерении затухания «*Decibel Standard*». Значения этих паразитных параметров выбираются в режиме «*Setting*». Внешний вид передней панели прибора показан на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9

Осциллограф («*Oscilloscope*») имеет два канала A и B с отдельными регулировками чувствительности («*Channel A*», V/Div ; «*Channel B*», V/Div); регулировку смещения по вертикали («*Y Position*» A ; «*Y Position*» B); закрытый «*AC*», заземленный « 0 » и открытый «*DC*» входы по каждому каналу. Развертка осциллографа может работать в трех режимах: временном «*Y/T*» и функциональном «*B/A*» или «*A/B*». При работе во временном режиме коэффициент развертки «*Time base*» выбирается в пределах от $0,1$ нс/дел до 1 с/дел. Смещение по горизонтали регулируется кнопками «*X Position*». Чтобы получить отчетливое изображение сигнала во временной области на экране осциллографа, необходимо правильно согласовать коэффициент развертки «*Time base*» с периодом сигнала. Целесообразно устанавливать такой коэффициент развертки, чтобы по горизонтали в одном делении укладывалось $0,5 \dots 1$ периода анализируемого колебания.

Запуск развертки может быть автоколебательным «*Auto*» или ждущим «*Trigger*». В ждущем режиме запуск развертки может выполняться по переднему или заднему фронту синхроимпульса «*Edge*». Уровень сигнала синхронизации регулируется с помощью клавиши «*Level*». Вид сигнала синхронизации выбирается с помощью клавиш A , B , Ext . Внешний сигнал синхронизации Ext подается на вход «*Trigger*». При синхронизации от внутренних сигналов используются каналы A или B . Вывод «*Ground*» осциллографа предусмотрен для подключения к земле (по умолчанию такое соединение выполнено). Внешний вид передней панели осциллографа приведен на рисунке 2.10.

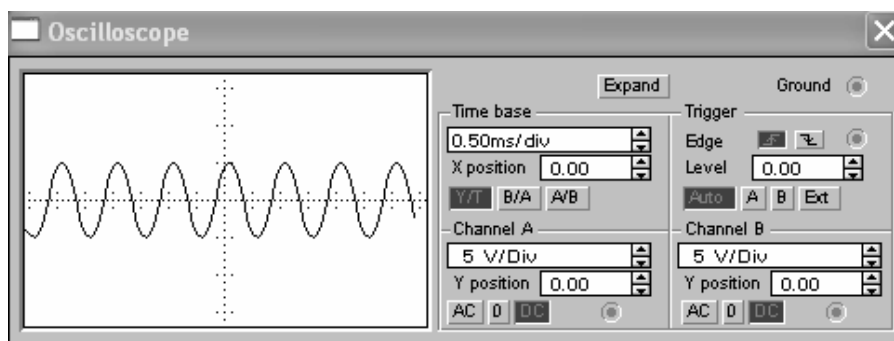


Рисунок 2.10

Осциллограф может работать в режиме масштабирования, который вызывается кнопкой «Expand» на передней панели прибора. В этом режиме изменяется передняя панель прибора: увеличивается размер экрана, создается возможность прокрутки изображения по вертикали и горизонтали или сканирования его с помощью разноцветных *вертикальных визирных линий* (1 – красного цвета и 2 – синего цвета), которые можно перемещать по экрану с помощью указателя мыши. При этом под экраном выводятся цифровые значения временных положений $T1$, $T2$ визирных линий и их разность $T2 - T1$.

В индикаторных окнах под экраном также приводятся мгновенные значения напряжений, соответствующих положениям визирных линий: $VA1$, $VB1$, $VA2$, $VB2$ и их разности ($VA2 - VA1$) и ($VB2 - VB1$).

Изображение на экране можно инвертировать нажатием кнопки «Reverse» и запоминать в памяти нажатием кнопки «Save». Возврат к обычному режиму работы осциллографа выполняется по команде «Reduce», подаваемой с передней панели прибора. Внешний вид передней панели осциллографа в режиме «Expand» приведен на рисунке 2.11.

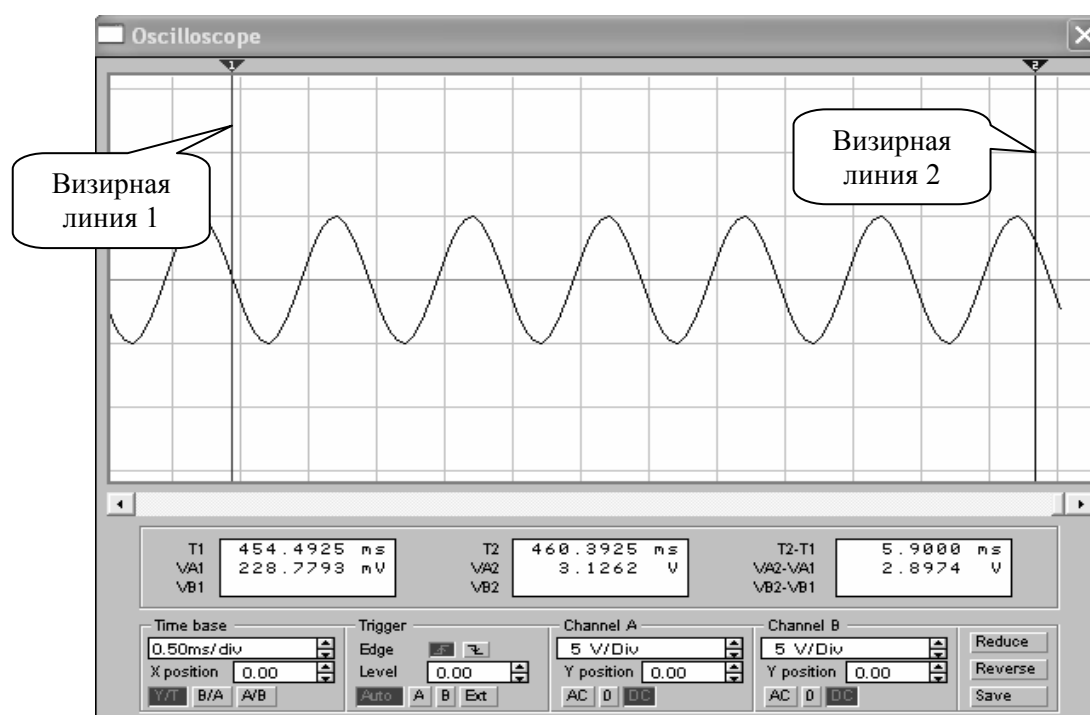


Рисунок 2.11

Анализатор частотных характеристик («*Bode Plotter*») предназначен для измерения *амплитудно-частотных* (в режиме «*Magnitude*») и *фазочастотных* (в режиме «*Phase*») характеристик цепей. Он измеряет отношение амплитуд и разность начальных фаз двух сигналов, подаваемых на входы *In* и *Out*. При этом частоты входного и выходного сигналов имеют одинаковые значения и задаются внутренним генератором, который входит в состав прибора *Bode Plotter*. Внешний вид передней панели анализатора приведен на рисунке 2.12. Левые зажимы входа и выхода подключают к исследуемой цепи, а правые зажимы соединяют с общей точкой «*Ground*» (по умолчанию такое соединение уже выполнено). Кроме этого, ко входу цепи должен быть подключен какой-либо источник переменного напряжения, при этом каких-либо настроек в этом источнике производить **не нужно**.

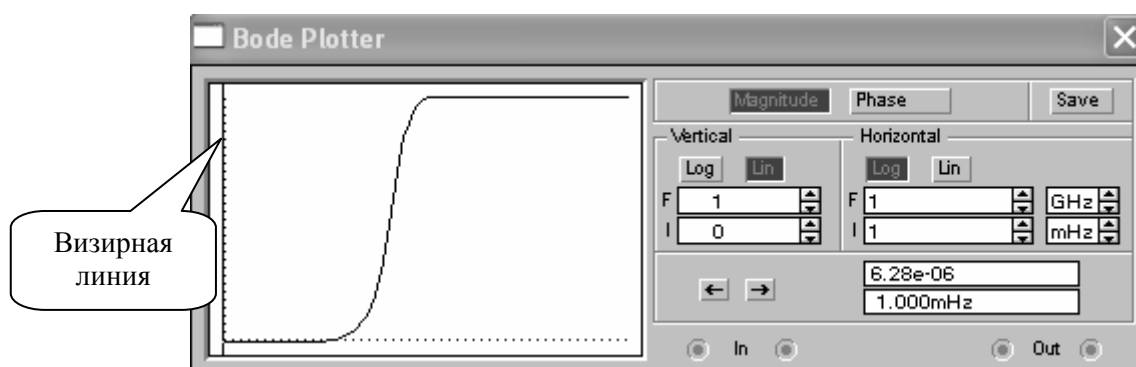


Рисунок 2.12

По вертикальной оси прибора («*Vertical*») откладывают значения амплитудно-частотных характеристик («*Magnitude*») цепи в относительных единицах в линейном режиме (*Lin*) или в децибелах – в логарифмическом режиме (*Log*). При измерении фазочастотных характеристик («*Phase*») по вертикальной оси откладывают значения угла сдвига фазы в градусах, как в линейном, так и в логарифмическом режимах работы. При этом указывают минимальное *I* («*Initial*») и максимальное *F* («*Final*») значения шкалы прибора.

По горизонтальной оси прибора («*Horizontal*») также указывают минимальное *I* и максимальное *F* значения частоты в Гц, как в линейном (*Lin*), так и в логарифмическом (*Log*) режимах работы.

С помощью вертикальной *визирной линии*, которую можно перемещать по экрану посредством указателей ←, → или мыши, определяют численное значение частоты и выходной величины в месте положения визирной линии. Эти значения в цифровой форме выводятся в нижней части передней панели прибора и могут быть записаны в текстовый файл при помощи команды, подаваемой клавишей «*Save*».

2.4 Производство измерений

После построения схемы и подключения измерительных приборов производится анализ ее работы. Анализ начинается нажатием выключателя «О/П» в правом верхнем углу окна программы (рисунок 2.1). Сделать паузу при выполнении моделирования работы схемы можно нажатием клавиши F9 на клавиатуре или кнопки «*Pause*». Возобновить процесс моделирования можно повторным нажатием клавиши F9 (кнопки «*Pause*»).

Чтобы перенести в отчет по лабораторной работе изображение схемы электрической цепи или измерительного прибора, расположенных на рабочем поле, необходимо в меню «*Edit*» выбрать опцию «*Copy as Bitmap*», установить указатель курсора мыши (в виде знака «+») в левой верхней части выделяемого фрагмента рабочего поля и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, охватить подлежащий копированию фрагмент рамкой. После отпускания кнопки мыши копируемый фрагмент будет помещен в буфер обмена, откуда его можно вставить в текстовый документ.

3 Лабораторная работа № 1. Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях

Целью лабораторной работы № 1 является закрепление знаний о резонансных явлениях в линейных электрических цепях, а также исследование условий возникновения и особенностей проявления резонанса в последовательном колебательном контуре, влияния сопротивления потерь в колебательном контуре на ширину его резонансной характеристики (избирательные свойства колебательного контура).

3.1 Краткие сведения из теории

Резонансом называется режим электрической цепи, при котором собственная частота колебаний цепи совпадает с частотой вынужденных (внешних) колебаний. Различают два вида резонанса: **резонанс напряжений** и **резонанс токов**.

Резонанс напряжений возникает в последовательном колебательном контуре (рисунок 3.1), когда эквивалентное сопротивление такой электрической цепи относительно зажимов источника приобретает чисто резистивный характер. При этом реактивные составляющие входного сопротивления взаимно компенсируются.

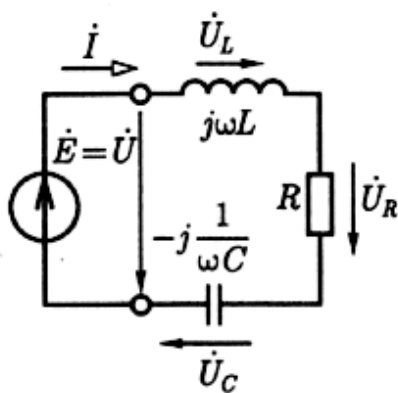


Рисунок 3.1

Входное сопротивление двухполюсника, представляющего собой последовательное соединение элементов R , L и C (рисунок 3.1) (относительно зажимов источника ЭДС) равно

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C), \quad (3.1)$$

а его модуль и аргумент, соответственно, равны

$$Z_{\text{вх}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (3.2)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(X_L - X_C)}{R}. \quad (3.3)$$

Резонанс возникает при условии, когда $\omega L - \frac{1}{\omega C} = X_L - X_C = 0$. При этом частота, определяемая из равенства

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3.4)$$

называется **резонансной частотой** колебательного контура.

В (3.3) через L и C , соответственно, обозначены индуктивность катушки индуктивности и емкость конденсатора, образующих колебательный контур.

Учитывая, что между угловой и циклической частотами существует связь вида $\omega = 2\pi f$, можно записать

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.5)$$

Параметр ρ , определяемый из соотношения

$$\omega_{рез}L = \frac{1}{\omega_{рез}C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho, \quad (3.6)$$

называется *характеристическим сопротивлением контура*.

При резонансе в рассматриваемой цепи (рисунок 3.1) модуль комплексного входного сопротивления (полное сопротивление) резонансного контура минимален и равен $Z_{вх} = R$, а аргумент комплексного сопротивления $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(X_L - X_C)}{R} = 0$. Фаза тока и напряжения в цепи в этом случае совпадают, а действующее значение тока достигает своего максимума, определяемого из выражения

$$I_{рез} = \frac{U}{R}, \quad (3.7)$$

где U – действующее значение приложенного к контуру напряжения. А поскольку при резонансе $X_L = X_C$, то

$$U_{Lрез} = U_{Cрез} = \omega_{рез}L I_{рез} = \frac{I_{рез}}{\omega_{рез}C}. \quad (3.8)$$

При резонансе напряжения на емкостном и индуктивном элементах могут (и во много раз) превысить напряжение питания, если выполняется условие

$$\omega_{рез}L = \frac{1}{\omega_{рез}C} > R. \quad (3.9)$$

На рисунке 3.2 приведены зависимости напряжений на элементах контура от частоты. Такие зависимости называют резонансными кривыми.

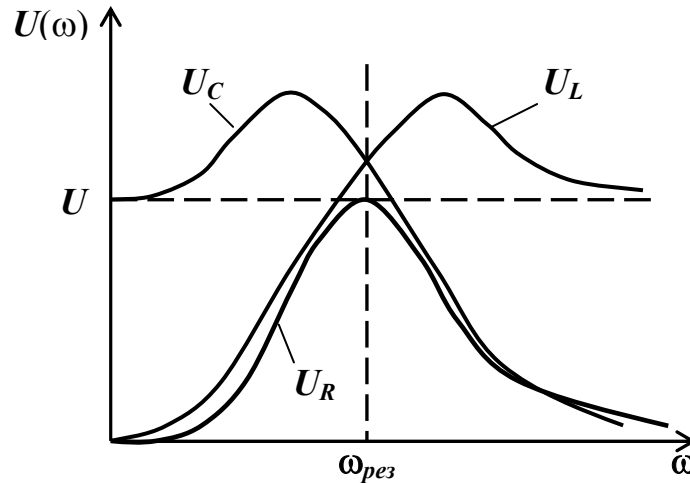


Рисунок 3.2

Как видно из рисунка 3.2, максимумы напряжений на индуктивном L и емкостном C элементах не совпадают с максимумом напряжения на резистивном элементе R . При этом частоты, на которых достигаются максимумы напряжений U_C и U_L , зависят от добротности колебательного контура Q .

Добротность контура Q может быть определена из выражения

$$Q = \frac{U_{Lрез}}{U_R} = \frac{I_{рез}\omega_{рез}L}{I_{рез}R} = \frac{\rho}{R}. \quad (3.10)$$

Чем выше добротность контура, тем ближе к резонансной частоте расположены частоты, соответствующие максимумам напряжений на индуктивном L и емкостном C элементах. Теоретически максимумы напряжений U_C и U_L будут достигнуты на резонансной частоте, если $Q \rightarrow \infty$.

Перепишем выражение (3.2) для полного сопротивления колебательного контура с учетом (3.6) и (3.10):

$$\begin{aligned} Z_{ex} &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = R \sqrt{1 + \frac{(\omega_{рез}L)^2}{R^2} \left(\frac{\omega}{\omega_{рез}} - \frac{1}{\omega_{рез}L\omega C}\right)^2} = \\ &= R \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{рез}} - \frac{\omega_{рез}}{\omega}\right)^2}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Выражение (3.11) позволяет построить резонансные кривые для последовательного колебательного контура при разных значениях добротности Q . На рисунке 3.3 показаны две резонансные кривые тока в контуре при условии, что $Q_1 < Q_2$.

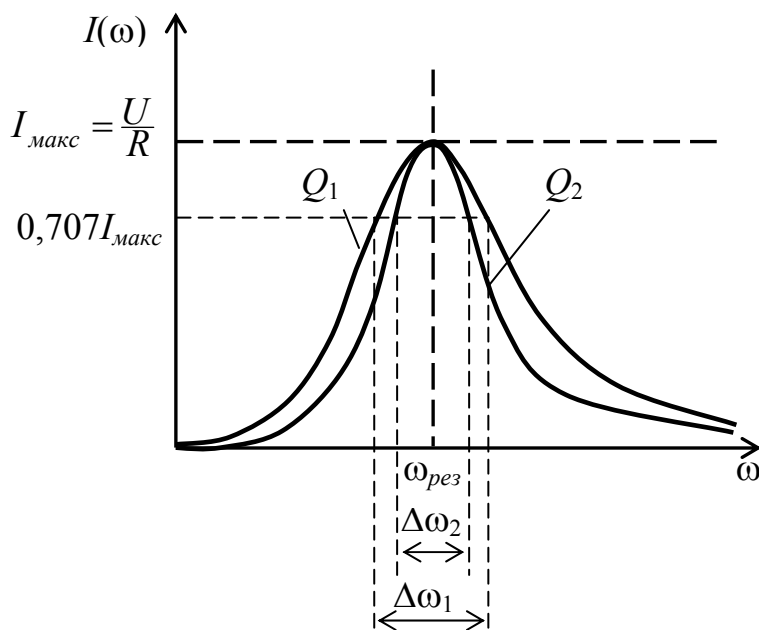


Рисунок 3.3

Ширина резонансной кривой на уровне 0,707 от максимального значения ($\Delta\omega$) называется *шириной полосы пропускания контура*. Из рисунка 3.3 видно, что чем больше добротность контура Q , тем уже ширина его полосы пропускания. С учетом этого выражение для добротности колебательного контура можно представить следующим образом

$$Q = \frac{\omega_{рез}}{\Delta\omega}. \quad (3.12)$$

Граничные частоты ω_1 и ω_2 полосы пропускания колебательного контура (то есть, частоты на уровне 0,707 резонансной кривой) могут быть найдены из выражений

$$\omega_1 = \omega_{рез} - \frac{\Delta\omega}{2}, \quad (3.13)$$

$$\omega_2 = \omega_{рез} + \frac{\Delta\omega}{2}. \quad (3.14)$$

3.2 Подготовка к работе

3.2.1 Изучить раздел 2 методических указаний о работе в среде моделирующей компьютерной программы Electronics Workbench.

3.2.2 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя рекомендованную литературу и подраздел 3.1 методических указаний.

3.2.3 Для схемы, изображенной на рисунке 3.4, рассчитать: резонансную частоту последовательного колебательного контура $f_{рез}$, добротность Q , граничные частоты f_1 и f_2 полосы пропускания, ширину полосы пропускания Δf , величину тока при резонансе $I_{рез}$, напряжение на конденсаторе при резонансе $U_{Cрез}$ и на границах полосы пропускания $U_C(f_1)$ и $U_C(f_2)$, напряжение на катушке индуктивности при резонансе $U_{Lрез}$.

Примечание – При выполнении расчетов полагать $R = \frac{\rho}{5}$. Параметры элементов схемы взять из таблицы 3.3 согласно номеру варианта. Для всех вариантов напряжение внешнего источника принять равным $U_{Г} = 10$ В.

3.2.4 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

3.3 Задание на проведение исследований

3.3.1 Исследовать условия возникновения резонанса в последовательном колебательном контуре.

3.3.2 Исследовать влияние добротности контура на ширину полосы пропускания.

3.4 Порядок проведения исследований

3.4.1 Собрать схему лабораторной установки для проведения исследований резонансных явлений (рисунок 3.4). Номиналы элементов L и C установить в соответствии с номером варианта, номинал резистора R – соответствующим расчетному значению.

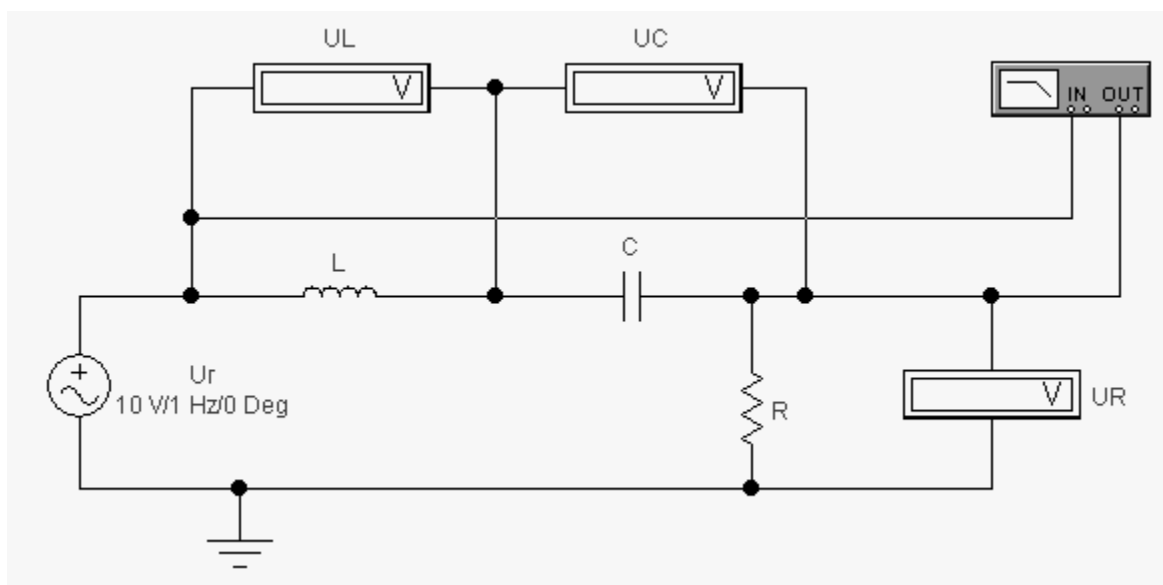


Рисунок 3.4

Примечание – До начала проведения исследований перевести все вольтметры в режим измерения параметров переменного тока (режим «АС»).

3.4.2 Включить моделирование. Изменяя частоту колебаний внешнего источника в диапазоне от $0,5f_{рез}$ до $1,5f_{рез}$ (12 ... 15 значений частоты), снимать показания вольтметров и заносить в таблицу 3.1.

Примечание – В таблицу 3.1 должны быть занесены, в том числе, и значения напряжений на элементах колебательного контура на резонансной $f_{рез}$ частоте и граничных частотах f_1 и f_2 .

Таблица 3.1 – Результаты измерений

f , кГц											
U_L , В											
U_C , В											
U_R , В											

3.4.3 По данным таблицы 3.1 построить в одной системе координат зависимости $U_L = F(f)$, $U_C = F(f)$ и $U_R = F(f)$, сравнить их.

Используя резонансную кривую $U_R = F(f)$, определить граничные частоты (f_1 и f_2), ширину полосы пропускания (Δf), добротность Q колебательного контура, ток при резонансе $I_{рез}$. Сравнить экспериментально полученные данные с результатами расчетов при подготовке к работе (п. 3.2.3). Сформулировать выводы.

Используя зависимости $U_L = F(f)$ и $U_C = F(f)$, определить напряжение на конденсаторе при резонансе $U_{Cрез}$ и на границах полосы пропускания $U_C(f_1)$ и $U_C(f_2)$, напряжение на катушке индуктивности при резонансе $U_{Lрез}$. Сравнить экспериментально полученные данные с результатами расчетов при подготовке к работе (п. 3.2.3). Сформулировать выводы.

3.4.4 Используя измеритель АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter), снять АЧХ последовательного колебательного контура.

Органы настройки измерителя установить, как показано на рисунке 3.5, при этом минимальное (I) и максимальное (F) значения частотного диапазона прибора задать с учетом частоты резонанса $f_{рез}$: $I \approx \frac{f_{рез}}{2}$, $F \approx 2f_{рез}$.

Пользуясь визирной линией прибора, определить резонансную частоту $f_{рез}$ и граничные частоты f_1 и f_2 полосы пропускания. Сравнить полученные результаты с расчетными значениями. Сформулировать выводы.

3.4.5 Изменяя сопротивление резистора R в диапазоне значений от $0,2\rho$ до ρ , с помощью измерителя АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter) определять резонансную частоту $f_{рез}$ и граничные частоты f_1 и f_2 полосы пропускания. Результаты исследования записать в таблицу 3.2.

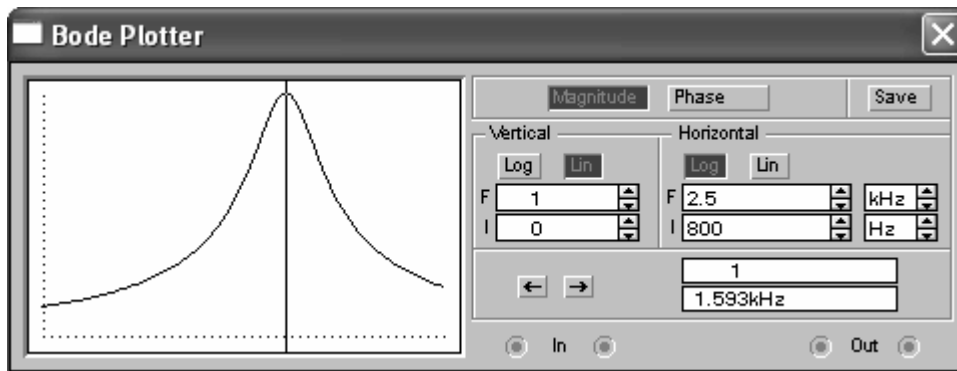


Рисунок 3.5

Таблица 3.2 – Результаты измерений

R , Ом									
$f_{рез}$, кГц									
f_1 , кГц									
f_2 , кГц									
Δf , кГц									
Q									

Пользуясь данными таблицы 3.2, вычислить добротность колебательного контура для каждого значения сопротивления резистора R .

Сформулировать выводы о зависимости ширины полосы пропускания колебательного контура от его добротности Q , а также о зависимости добротности колебательного контура от сопротивления потерь в нем R .

3.5 Контрольные вопросы

3.5.1 В каких электрических цепях может иметь место явление электрического резонанса?

3.5.2 При каком условии в колебательном контуре возникает резонанс напряжений (резонанс токов)?

3.5.3 Почему резонанс в последовательном колебательном контуре называют «Резонансом напряжений»?

3.5.4 Чему равно реактивное сопротивление последовательного колебательного контура на резонансной частоте?

3.5.5 Написать выражение для определения резонансной частоты колебательного контура.

3.5.6 Написать выражение для определения характеристического сопротивления колебательного контура.

3.5.7 От чего зависит ток в последовательном колебательном контуре на резонансной частоте?

3.5.8 Привести вид резонансной кривой последовательного колебательного контура.

3.5.9 Показать графически законы изменения напряжений на индуктивном и емкостном элементах последовательного колебательного контура при изменении частоты в диапазоне от 0 до $+\infty$.

3.5.10 Написать выражение для определения добротности колебательного контура.

3.5.11 Что называется полосой пропускания колебательного контура?

3.5.12 Как определить граничные частоты полосы пропускания по резонансной кривой?

3.5.13 Как зависит ширина полосы пропускания колебательного контура от его добротности?

3.5.14 Как зависит добротность колебательного контура от сопротивления потерь в нем?

3.6 Варианты исходных данных

Таблица 3.3

Вариант	L , мГн	C , мкФ	Вариант	L , мГн	C , мкФ
А	1	10	П	1	11
Б	1.2	15	Р	1.2	13
В	1.4	20	С	1.4	17
Г	1.3	12	Т	1.3	19
Д	1.5	14	У	1.5	21
Е	1.6	16	Ф	1.6	25
Ж	1.7	18	Х	1.7	24
З	1.8	11	Ц	1.8	22
И	1.9	13	Ч	1.9	10
К	2	17	Ш	2	15
Л	1.1	19	Щ	1.1	20
М	2.1	21	Э	2.1	12
Н	2.2	25	Ю	2.2	14
О	2.3	24	Я	2.3	16

4 Лабораторная работа № 2. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях первого порядка

Целью лабораторной работы № 2 является закрепление знаний о переходных процессах в линейных электрических цепях, а также исследование особенностей протекания переходных процессов в электрических цепях первого порядка.

4.1 Краткие сведения из теории

Электрические цепи, содержащие только источники ЭДС и резистивные элементы в качестве потребителей энергии, не накапливают электрической энергии. В таких цепях токи в ветвях и напряжения на участках цепи в текущий момент времени не зависят от предшествующего состояния цепи и определяются схемой соединения и параметрами резистивных элементов и ЭДС на данный момент.

По-иному ведут себя электрические цепи, содержащие реактивные элементы – индуктивные и емкостные. Реакция таких электрических цепей на внешнее воздействие (например, подключение или отключение источников ЭДС, изменение схемы соединения элементов и др.) зависит не только от характера этого воздействия, но и от запасов энергии на реактивных элементах в момент возникновения внешнего воздействия.

Если в электрической цепи длительное время токи в ветвях и напряжения на элементах цепи (в цепи переменного тока – их амплитуды) остаются неизменными, то такой режим ее работы называется *установившимся (стационарным)*. **Условием** сохранения в электрической цепи установившегося режима **является неизменность среднего запаса энергии**, обеспечиваемого источниками энергии (напряжения и тока), ЭДС самоиндукции катушек индуктивности, накопленным зарядом конденсаторов.

В электрической цепи могут иметь место *коммутации* – подключение или отключение источников энергии, короткое замыкание элементов в отдельных ветвях или между узлами цепи и т. д. – приводящие к изменению конфигурации цепи. Как разновидность коммутации можно рассматривать скачкообразное изменение напряжения (тока) на входе цепи. **Вследствие коммутации цепь, как правило, переходит из одного установившегося режима в другой.** Если цепь кроме источников энергии содержит только резистивные элементы, то переход ее из одного установившегося режима в другой происходит практически мгновенно. Если же цепь содержит **накопители реактивной энергии** (индуктивные или емкостные элементы), то изменение конфигурации цепи вследствие коммутации, как правило, приводит к перераспределению энергии между элементами цепи (реактивные элементы либо дополнительно накапливают энергию, либо возвращают накопленную энергию в цепь). А такие процессы мгновенно произойти не

могут, требуется некоторое время для установления нового равновесного состояния.

*Процесс, возникающий в электрической цепи при переходе ее от одного установившегося режима к другому, называется **переходным процессом**.*

Таким образом, переходный процесс является промежуточным между двумя установившимися режимами электрической цепи. **Физической причиной** возникновения переходных процессов в цепях является наличие в них **индуктивных** и **емкостных** элементов, энергия в которых скачком измениться не может (не может быть мгновенно накоплена, так же, как и не может быть мгновенно передана в электрическую цепь).

Одним из часто встречающихся на практике методов анализа переходных процессов в линейных электрических цепях является классический метод. *Сущность* метода состоит в определении реакции цепи на имеющую место коммутацию путем *составления и решения дифференциальных уравнений*.

Задача анализа переходных процессов классическим методом может быть разбита на два этапа. **На первом этапе:**

– строят схему замещения электрической цепи с учетом ее топологии *до коммутации*;

– применяя законы Ома, Кирхгофа, электромагнитной индукции и т. д., составляют **систему дифференциальных уравнений**, описывающих процессы в цепи *после коммутации*.

Исключением переменных получают одно **дифференциальное уравнение** n -го порядка, в общем случае – **неоднородное**, либо систему дифференциальных уравнений относительно искомого тока или напряжения.

На втором этапе решают полученное дифференциальное уравнение (систему уравнений) одним из известных методов.

В общем случае применительно к токам или напряжениям в электрической цепи, **общее решение дифференциального уравнения** (системы уравнений) можно записать в виде:

$$i(t) = i_{\text{вын}} + i_{\text{св}}, \quad (4.1)$$

$$u(t) = u_{\text{вын}} + u_{\text{св}}, \quad (4.2)$$

где $i_{\text{вын}}$, $u_{\text{вын}}$ – вынужденные составляющие реакций электрической цепи (то есть токи и напряжения в установившемся режиме после коммутации), представляющие собой *частное решение* исходного *неоднородного дифференциального уравнения*;

$i_{\text{св}}$, $u_{\text{св}}$ – свободные составляющие реакций, которые представляют собой *общее решение* *однородного дифференциального уравнения* (описывает свободный процесс в цепи – процесс без источников напряжения и тока).

Свободные составляющие обычно находят в виде

$$i_{cв}(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}, \quad (4.3)$$

$$u_{cв}(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}, \quad (4.4)$$

где A_k – постоянные интегрирования, которые определяют с учетом начальных условий;

p_k – корни характеристического уравнения или собственные частоты цепи (например, частота резонанса);

n – порядок цепи, определяющий порядок дифференциального уравнения.

В большинстве случаев порядок цепи определяется числом реактивных элементов

$$n = n_C + n_L, \quad (4.5)$$

где n_C – число емкостных элементов в схеме замещения электрической цепи;

n_L – число индуктивных элементов.

Для нахождения постоянных интегрирования A_k необходимо знать n начальных условий, т. е. токов или напряжений в цепи **в начальный момент времени после коммутации** (в момент времени $t = 0_+$). Начальные условия находят на основе *законов коммутации*:

а) первый закон коммутации – *ток в индуктивном элементе скачком измениться не может*, то есть $i_L(0_+) = i_L(0_-)$;

б) второй закон коммутации – *напряжение на емкостном элементе скачком измениться не может*, то есть $u_C(0_+) = u_C(0_-)$.

Токи в индуктивных элементах $i_L(0_-)$ и напряжения на емкостных элементах $u_C(0_-)$ непосредственно перед коммутацией называются *начальными условиями*.

Рассмотрим в качестве примера анализ переходных процессов в некоторых электрических цепях. Проанализируем процесс заряда емкостного элемента от источника постоянной ЭДС через резистивный элемент (рисунок 4.1).

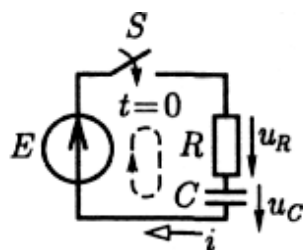


Рисунок 4.1

Для цепи после коммутации (ключ S замкнут в момент времени $t = 0$) можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} u_R + u_C = E, \\ u_R = i_{\text{зар}} R, \\ i_{\text{зар}} = i_C = C \frac{du_C}{dt}. \end{cases} \quad (4.6)$$

На основании системы (4.6) составим неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (4.7)$$

Общее решение уравнения (4.7) запишем в виде суммы двух составляющих

$$u_C(t) = u_{C \text{ вын}} + u_{C \text{ св}}. \quad (4.8)$$

Первая составляющая соответствует установившемуся режиму при $t \rightarrow \infty$ (то есть представляет собой напряжение на полностью заряженном конденсаторе)

$$u_{C \text{ вын}} = E. \quad (4.9)$$

Вторая составляющая соответствует свободному процессу и может быть найдена из решения однородного дифференциального уравнения первого порядка

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0. \quad (4.10)$$

Решение уравнения (4.10) будем искать в виде

$$u_{C \text{ св}}(t) = A e^{pt}. \quad (4.11)$$

Для нахождения корня p составим и решим характеристическое уравнение вида

$$RCp + 1 = 0,$$

$$p = -\frac{1}{RC} = -\frac{1}{\tau},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени RC -цепи (измеряется в секундах).

Таким образом, во время переходного процесса напряжение на емкостном элементе будет изменяться по закону

$$u_{C\text{св}}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.12)$$

Перепишем выражение (4.8) с учетом найденных значений $u_{C\text{вын}}$ и $u_{C\text{св}}$:

$$u_C(t) = E + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.13)$$

Постоянную интегрирования A определим с учетом нулевых начальных условий на момент времени $t = 0$ (поскольку до замыкания ключа конденсатор не был заряжен): $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$. Тогда можно записать

$$u_C(0) = E + Ae^{-\frac{0}{\tau}},$$

$$E + A = 0, \quad A = -E,$$

а общее решение дифференциального уравнения, описывающее закон изменения напряжения на емкостном элементе, примет вид

$$u_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (4.14)$$

Для тока заряда конденсатора можно записать

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.15)$$

а напряжение на резистивном элементе изменяется по закону

$$u_R(t) = Ri_C(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.16)$$

Вид зависимостей тока в цепи и напряжений на элементах цепи после коммутации от времени показан на рисунке 4.2.

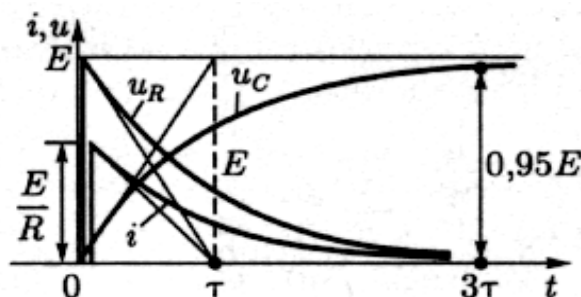


Рисунок 4.2

Теоретически переходный процесс (процесс зарядки конденсатора) окончательно заканчивается только при $t \rightarrow \infty$. Но в большинстве случаев его можно считать законченным через интервал времени, равный 3τ , когда напряжение на конденсаторе достигнет значения $0,95E$.

Проанализируем переходные процессы в электрической цепи, содержащей резистивный и индуктивный элементы, при подключении ее к источнику синусоидальной ЭДС (рисунок 4.3). В такой цепи с источником ЭДС вида $e(t) = u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ в установившемся режиме синусоидальный ток равен

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) \quad (4.17)$$

где $I_m = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ – амплитуда тока;

$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ – аргумент комплексного сопротивления цепи;

ψ_u – начальная фаза напряжения источника ЭДС.

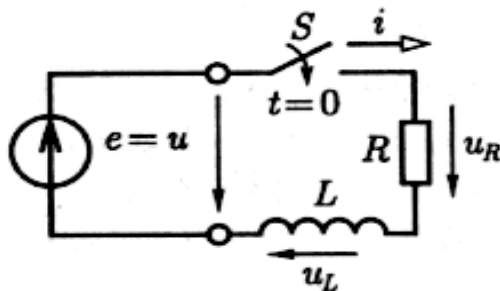


Рисунок 4.3

Для цепи после коммутации (ключ S замкнут в момент времени $t = 0$) можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} u_R + u_L = e, \\ u_R = Ri, \\ u_L = L \frac{di}{dt}. \end{cases} \quad (4.18)$$

С учетом (4.18) неоднородное дифференциальное уравнение, описывающее переходной процесс, возникающий после замыкания ключа, имеет вид

$$L \frac{di}{dt} + Ri = e. \quad (4.19)$$

Найдем решение дифференциального уравнения (4.19) относительно тока в индуктивном элементе в виде

$$i_L(t) = i_{L \text{ вьн}} + i_{L \text{ св}}. \quad (4.20)$$

Первая составляющая соответствует установившемуся режиму при $t \rightarrow \infty$ и представляет собой ток

$$i_{L \text{ вын}} = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi).$$

Свободная составляющая, как и в предыдущем примере, может быть найдена из решения однородного дифференциального уравнения первого порядка и равна

$$i_{L \text{ св}} = A e^{-\frac{R}{L}t},$$

где $\frac{L}{R} = \tau$ – постоянная времени RL -цепи.

Окончательно (4.20) перепишем в виде

$$i_L(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.21)$$

На основании закона коммутации для индуктивного элемента в момент времени $t = 0$ справедливо соотношение

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0 = I_m \sin(\psi_u - \varphi) + A,$$

откуда определяем постоянную интегрирования

$$A = -I_m \sin(\psi_u - \varphi).$$

Получим окончательное выражение для тока в цепи

$$i_L(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) - I_m \sin(\psi_u - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.22)$$

Таким образом, во время переходного процесса ток в цепи состоит из синусоидальной составляющей и свободной составляющей, убывающей экспоненциально (рисунок 4.4). Практически через интервал времени 3τ после замыкания ключа свободной составляющей можно пренебречь.

Из (4.22) видно, что если в момент коммутации ($t = 0$) начальная фаза напряжения источника ψ_u численно равна аргументу комплексного сопротивления φ , то свободная составляющая тока равна нулю и переходной процесс отсутствует (то есть в цепи сразу наступает установившийся режим).

Если же в момент коммутации начальная фаза напряжения источника $\psi_u = \varphi + \pi/2$, то интенсивность переходного процесса наибольшая и зависит от амплитудного значения тока в цепи.

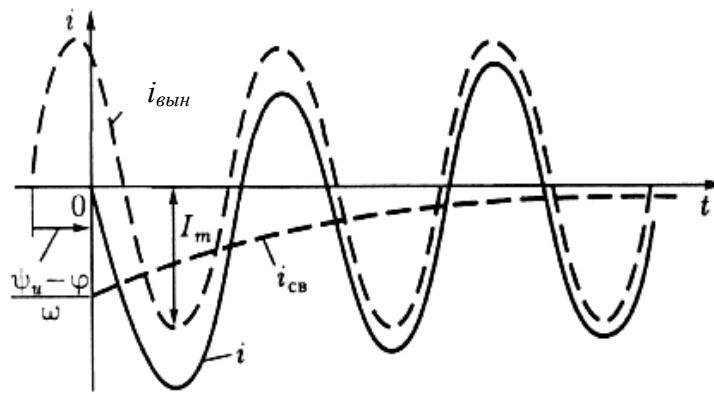


Рисунок 4.4

4.2 Подготовка к работе

4.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя рекомендованную литературу и подраздел 4.1 методических указаний.

4.2.2 Для схемы электрической цепи, изображенной на рисунке 4.5, выполнить расчет постоянной времени τ и напряжения на конденсаторе U_c через интервал времени $t = 3\tau$. Принять $E = 10$ В.

Примечание – При выполнении расчетов для всех вариантов полагать $E = 10$ В. Параметры элементов схемы R и C взять из таблицы 4.2 согласно номеру варианта.

4.2.3 Для схемы электрической цепи, приведенной на рисунке 4.7, выполнить расчет постоянной времени τ и аргумента комплексного сопротивления φ (в градусах). Параметры элементов схемы R и L взять из таблицы 4.2 согласно номеру варианта.

4.2.4 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

4.3 Задание на проведение исследований

4.3.1 Исследовать переходные процессы в электрической цепи с источником напряжения постоянного тока.

4.3.2 Исследовать переходные процессы в электрической цепи с источником напряжения переменного тока.

4.4 Порядок проведения исследований

4.4.1 Собрать схему лабораторной установки (рисунок 4.5) и задать параметры элементов R и C в соответствии с вариантом исходных данных (таблица 4.2). Установить параметры переключателя S : $T_{ON} = 0.05$ с, $T_{OFF} = 0.07$ с.

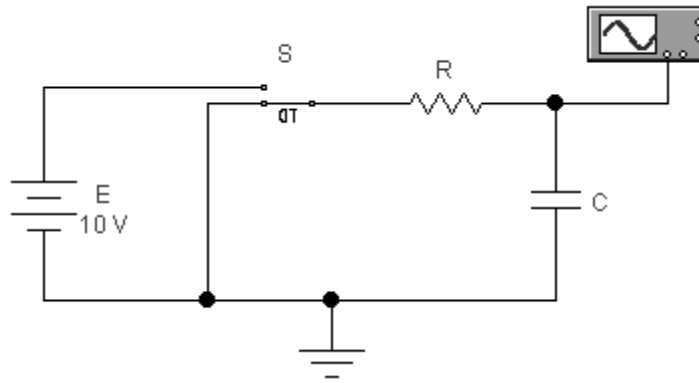


Рисунок 4.5

4.4.2 Запустить моделирование. Определить время нарастания ($\tau_{фр}$) и время спада ($\tau_{ср}$) напряжения на конденсаторе C , а также напряжение $U_{с макс}$. Занести полученные результаты в таблицу 4.1. Вид экрана осциллографа перенести в отчет.

Примечание – Параметры $\tau_{фр}$, $\tau_{ср}$ и $U_{с макс}$ определять, как показано на рисунке 4.6.

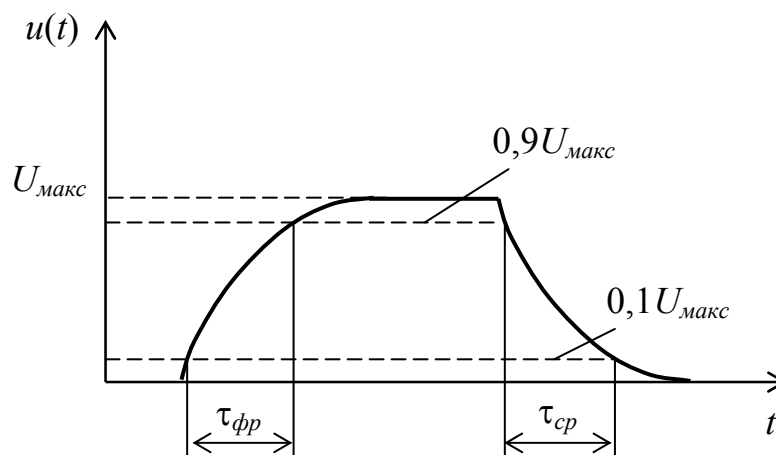


Рисунок 4.6

Таблица 4.1 – Результаты исследований

τ_u , мс	$\tau_{фр}$, мс	$\tau_{ср}$, мс	$U_{с макс}$, В

4.4.3 Изменяя длительность импульса τ_u (с помощью переключателя S) в диапазоне от $\tau_u = \tau$ мс до $\tau_u = 5\tau$ мс с интервалом τ (где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи, вычисленная при выполнении п. 4.2.2), определять значения $\tau_{фр}$, $\tau_{ср}$, $U_{с макс}$. Результаты заносить в таблицу 4.1.

Примечание – Длительность импульса τ_u на входе цепи задавать с помощью переключателя S следующим образом: TON = 0.01 с, TOFF = (0.01 + τ_u) с.

Сравнить значение $U_{c \text{ макс}}$ при $\tau_u = 3\tau$ с расчетным значением U_c , полученным при подготовке к работе (п. 4.2.2). Сформулировать выводы.

Сравнить напряжение $U_{c \text{ макс}}$ при $\tau_u = 3\tau$ и $\tau_u = 5\tau$ с напряжением источника E . Результат сравнения выразить в процентном отношении. Сформулировать выводы.

Проанализировать содержимое таблицы 4.1 и сформулировать выводы о зависимости параметров $\tau_{фр}$, $\tau_{ср}$, $U_{c \text{ макс}}$ от соотношения длительности входного сигнала τ_u и постоянной времени цепи τ .

4.4.4 При $\tau_u = 50$ мс провести исследование зависимости времени заряда конденсатора до уровня $0,95E$ от постоянной времени цепи (изменяя поочередно сопротивление резистора $R = 0,5R$; $2R$ при неизменном значении емкости конденсатора C , и емкость конденсатора $C = 0,5C$; $2C$ при неизменном сопротивлении резистора R). Сформулировать выводы о влиянии величины постоянной времени цепи на длительность переходного процесса.

Сравнить результаты, полученные при значениях параметров элементов цепи: $R = 0,5R$, $C = C$ и $R = R$, $C = 0,5C$. Сформулировать выводы о степени влияния параметров резистивного и емкостного элементов на длительность переходного процесса.

4.4.5 Собрать схему лабораторной установки (рисунок 4.7) и задать параметры элементов R и L в соответствии с вариантом исходных данных (таблица 4.2). Задать параметры источника гармонического колебания e : $E_m = 100$ В, $f_c = 10$ кГц. Установить параметры переключателя S : $TON = 0.01$ с, $TOFF = 0.1$ с.

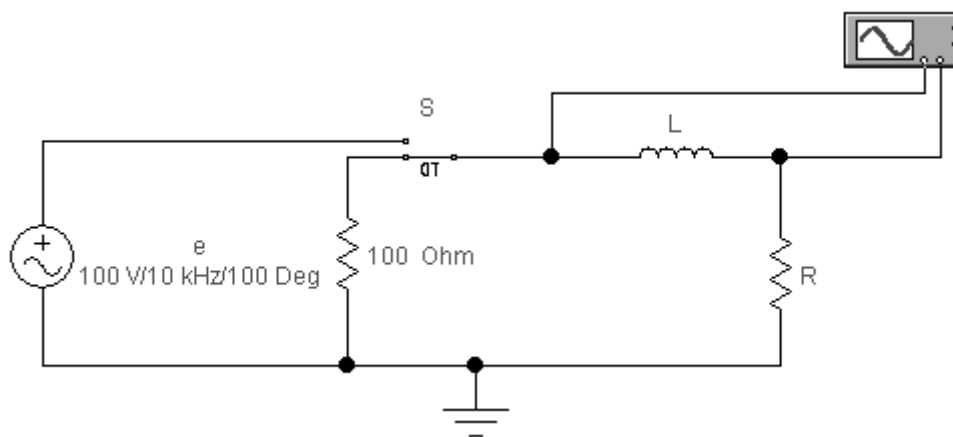


Рисунок 4.7

4.4.6 Провести исследование переходных процессов в цепи при начальной фазе напряжения источника ЭДС, равной: $\psi_u = \varphi$; $\psi_u = \varphi + \pi/4$; $\psi_u = \varphi + \pi/2$.

Примечания

1 Значение начальной фазы устанавливать в градусах, при этом использовать в качестве φ величину аргумента комплексного сопротивления электрической цепи, вычисленного при подготовке к работе (п. 4.2.3).

2 Для установки начальной фазы колебания войти в настройки параметров источника e и на закладке «Value» задать численное значение параметра «Phase».

Перенести в отчет изображения экрана осциллографа при каждом значении начальной фазы входного колебания.

Сформулировать выводы о зависимости интенсивности переходного процесса от соотношения начальной фазы колебания источника ЭДС и аргумента комплексного сопротивления цепи.

4.5 Контрольные вопросы

4.5.1 Что называется установившимся режимом электрической цепи?

4.5.2 Что называется переходным процессом?

4.5.3 При наличии каких элементов в электрической цепи может иметь место переходной процесс?

4.5.4 Пояснить причины возникновения переходных процессов в электрических цепях.

4.5.5 Как определяется постоянная времени в RC -цепи, в RL -цепи?

4.5.6 Какая взаимосвязь между постоянной времени цепи и длительностью переходного процесса в этой цепи.

4.5.7 Записать формулу, позволяющую определить напряжение на конденсаторе (резисторе) в RC -цепи во время переходного процесса.

4.5.8 При каком условии в цепи переменного тока интенсивность переходного процесса наибольшая?

4.6 Варианты исходных данных

Таблица 4.2

Вариант	RC -цепь		RL -цепь		Вариант	RC -цепь		RL -цепь	
	R , кОм	C , мкФ	R , Ом	L , мГн		R , кОм	C , мкФ	R , Ом	L , мГн
А	10,5	0,8	10	1,5	П	9,0	0,8	15	0,9
Б	10,6	0,9	12	1,6	Р	9,1	0,9	16	0,95
В	10,7	1,0	14	1,7	С	9,2	1,0	18	0,92
Г	10,8	1,1	11	1,8	Т	9,3	1,1	17	0,93
Д	10,9	1,2	9	1,9	У	9,4	1,2	19	0,94
Е	11,0	0,8	20	1,1	Ф	9,5	0,8	8	0,91
Ж	8,5	0,9	13	0,85	Х	9,6	0,9	10	0,96
З	8,6	1,0	15	0,86	Ц	9,7	1,0	10	0,97
И	8,7	1,1	16	0,87	Ч	9,8	1,1	12	0,98
К	8,8	1,2	18	0,88	Ш	9,9	1,2	14	0,99
Л	8,9	0,8	17	0,89	Щ	10,0	0,8	11	1,05
М	11,1	0,9	19	1,15	Э	10,1	0,9	9	1,0
Н	11,2	1,0	8	1,2	Ю	10,2	1,0	20	1,25
О	11,3	1,1	10	1,3	Я	10,3	1,1	13	1,35

5 Лабораторная работа № 3. Исследование спектров периодических и аperiodических сигналов

Выполнение лабораторной работы № 3 преследует цель получить представление о спектральном составе периодических и непериодических сигналов, а также исследовать зависимость между временными и частотными параметрами сигналов.

5.1 Краткие сведения из теории

Все сигналы, представляющие собой электрические колебания различной формы, можно разделить на *периодические* и *непериодические*. *Периодическим* называется сигнал, значения которого повторяются через определенные равные промежутки времени, называемые *периодом повторения сигнала* (T), или просто *периодом сигнала*. Для непериодического сигнала это условие не выполняется.

Простейшим периодическим сигналом является **гармоническое** колебание (рисунок 5.1, *а*). Аналитическое представление такого колебания имеет вид

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

где U_m , ω – соответственно, амплитуда и угловая частота колебания, равная

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

T – период колебания.

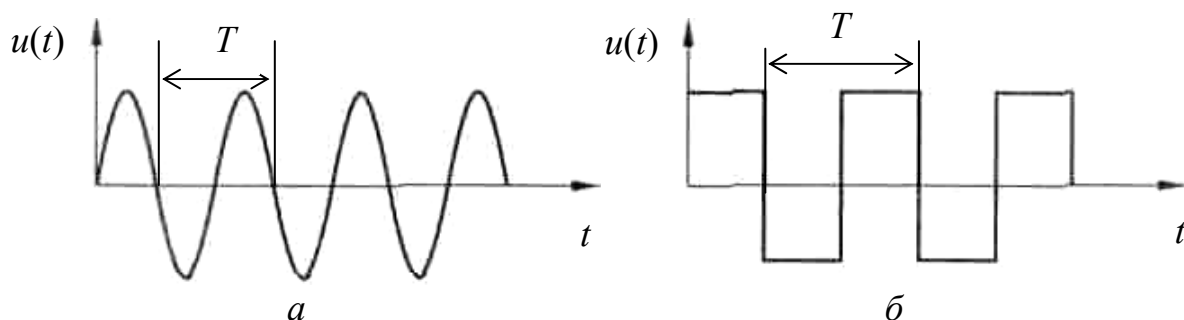


Рисунок 5.1 – Простейшие периодические сигналы

Другим примером периодического сигнала является последовательность прямоугольных импульсов (рисунок 5.1, *б*). Можно показать, что такая последовательность импульсов является результатом сложения бесконечного числа гармонических колебаний с разными амплитудами, частотами и начальными фазами. Математически такое сложное колебание можно представить следующим образом

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{m1}}{(2k-1)} \sin[2\pi(2k-1)f_1 t], \quad (5.2)$$

где U_{m1} – амплитуда гармонического колебания с частотой f_1 ($f_1 = \frac{1}{T}$);

T – период последовательности прямоугольных импульсов.

Как видно из выражения (5.2), амплитуда каждого последующего гармонического колебания, начиная со второго, меньше амплитуды предыдущего, а частота – больше частоты предыдущего и кратна частоте f_1 .

На рисунке 5.2 показан процесс синтеза последовательности прямоугольных импульсов с использованием гармонических колебаний. В качестве исходной выбрана синусоида, у которой период колебаний совпадает с периодом T прямоугольных импульсов. Из рисунка видно, что чем больше гармонических колебаний просуммировано, тем ближе форма результирующего колебания к последовательности прямоугольных импульсов (рисунок 5.1, б).

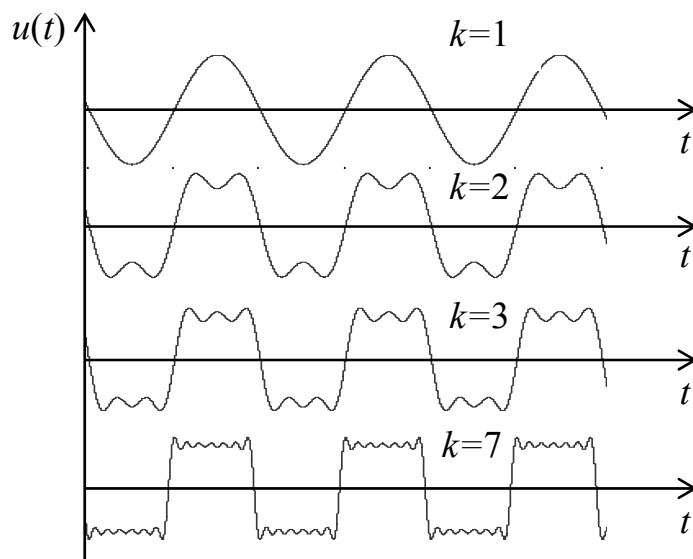


Рисунок 5.2

Французский математик Ж. Фурье доказал, что периодический сигнал произвольной формы можно представить в виде суммы обыкновенных синусоид. Такой набор синусоид получил название *спектр сигнала*.

Каждый сигнал имеет свой сугубо индивидуальный спектр. Гармонические колебания, составляющие спектр сигнала, называются *гармоническими составляющими сигнала* или просто *гармониками*. Гармоника с частотой $f_1 = \frac{1}{T}$ называется *первой гармоникой*, а гармоники, частоты которых кратны частоте первой гармоники – *высшими гармониками*.

Спектр сигнала можно представить графически. На рисунке 5.3 показано графическое изображение первых пяти гармоник (A_k) рассмотренной ранее

последовательности прямоугольных импульсов.

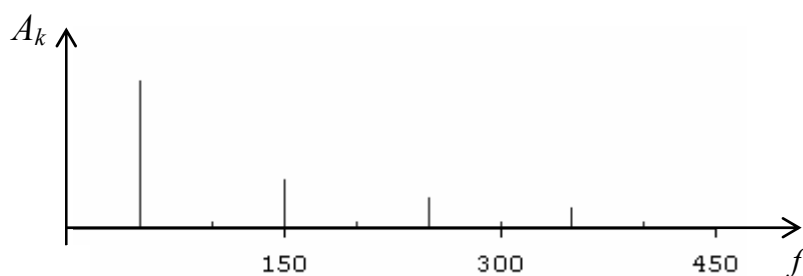


Рисунок 5.3

Высота вертикальных линий на графике (рисунок 5.3) соответствует амплитудам гармоник, отложенным с учетом выбранного масштаба. Такие линии называют *спектральными линиями*. Распределение амплитуд гармоник по частоте называется *спектром амплитуд сигнала*.

Так как спектр периодического сигнала состоит из отдельных спектральных линий, его называют *дискретным* (или *линейчатым*). При изображении спектра сигнала по горизонтальной оси можно откладывать либо циклическую (f), либо угловую ($\omega = 2\pi f$) частоту.

Частота первой гармоники сигнала определяется, как показано выше, периодом сигнала ($\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$). Если период сигнала оставить неизменным, а изменять только длительность импульсов τ_u (рисунок 5.4, *а* и *в*), то частота первой и высших гармоник также останутся неизменными. При этом изменится скорость убывания амплитуд гармоник в спектре сигнала (рисунок 5.4, *б* и *г*). Чем короче импульс, тем медленнее убывают амплитуды гармоник и тем большим числом гармоник следует представлять прямоугольные импульсы, чтобы сохранить достаточную степень их «прямоугольности».

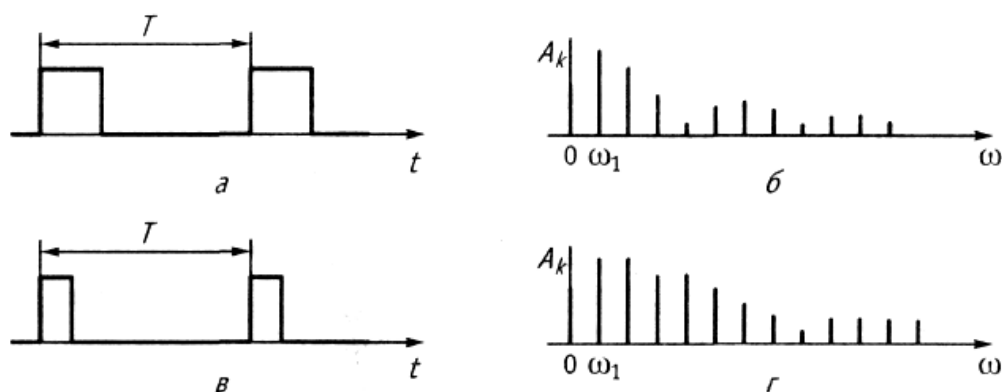


Рисунок 5.4

Существует очень важное понятие – *практическая ширина спектра* сигнала. При проектировании устройств (каналов) передачи информации ширину полосы пропускания их амплитудно-частотной характеристики выбирают согласованной с шириной спектра сигнала. Учитывая, что число

гармоник в спектре сигнала бесконечно, нужно правильно оценить ширину спектра, чтобы при передаче сигнала не потерять важную информацию. Существует несколько критериев для определения практической ширины спектра сигнала. Например, можно отбрасывать все гармоники с амплитудами меньшими 1 % максимальной амплитуды в спектре, тогда частоты оставшихся гармоник и определяют ширину спектра сигнала. Можно отбрасывать те гармоники, суммарная энергия которых меньше 10 % общей энергии сигнала. В этом случае ширину спектра также определяют оставшиеся в сигнале гармоники.

На практике при использовании последовательности прямоугольных импульсов в качестве ширины спектра сигнала чаще всего принимается диапазон частот от $\omega = 0$ до $\omega = \frac{2\pi}{\tau_u}$, где τ_u – длительность одного импульса.

Все, что сказано выше, относится к периодическим сигналам (в частности, к бесконечной последовательности прямоугольных импульсов). Рассмотрим, что представляет собой спектр непериодического сигнала (например, **одиночного импульса прямоугольной формы**).

Непериодический сигнал легко получить из периодического, увеличивая период вплоть до $T \rightarrow \infty$. При увеличении периода сигнала частота первой гармоники $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ понижается. Спектральные линии становятся гуще. Амплитуды гармоник уменьшаются. Последнее становится понятным, если учесть, что энергия сигнала, оставаясь неизменной, перераспределяется теперь между возросшим числом гармоник. Естественно, доля каждой гармоники в сигнале падает.

Следовательно, при переходе к непериодическому сигналу мы получаем в спектре такого сигнала вместо отдельных гармоник бесконечно большое число синусоидальных колебаний с бесконечно близкими частотами, заполняющими всю шкалу частот. Причем амплитуда каждого такого колебания становится очень незначительной, потому что на его долю приходится бесконечно малая часть энергии сигнала.

Понятие **спектра амплитуд** в случае одиночного импульса (непериодического сигнала) лишено смысла и заменяется понятием *спектральной плотности амплитуд* (рисунок 5.5), которая указывает, по сути, на удельный вес бесконечно малой амплитуды синусоидального колебания в любой бесконечно узкой полосе частот.

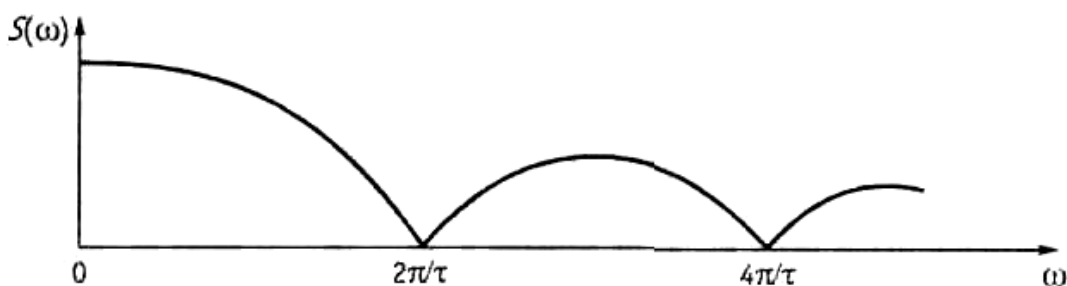


Рисунок 5.5

Таким образом, *спектр неперiodического сигнала является в общем случае не дискретным, а непрерывным.*

Спектр аперiodического сигнала математически можно описать выражением

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt = S(\omega)e^{j\Phi(\omega)}, \quad (5.3)$$

где $S(\omega) = |S(j\omega)|$ – амплитудный спектр (амплитудная спектральная характеристика) сигнала;

$\Phi(\omega) = \arg [S(j\omega)]$ – фазовый спектр (фазовая спектральная характеристика) сигнала.

Мы рассмотрели два крайних случая представления импульсных сигналов – одиночный импульс и бесконечную последовательность импульсов. На практике же приходится всегда иметь дело с конечным числом N импульсов. Спектральную плотность амплитуд ограниченной последовательности равноотстоящих импульсов можно представить как сумму спектральных плотностей амплитуд N одиночных импульсов, сдвинутых один относительно другого на время $T = \frac{2\pi}{\omega_1}$, равное периоду повторения импульсов:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \sum_{k=0}^{N-1} e^{-jk\omega T}, \quad (5.4)$$

где $S_1(\omega)$ – спектральная плотность амплитуд одного импульса;

N – число импульсов.

В качестве примера на рисунке 5.6, *a* и *б* представлены спектральные плотности амплитуд двух импульсных последовательностей из трех и четырех импульсов.

Как видно из рисунка, на частотах, отвечающих условию $\omega = \frac{2k\pi}{T}$, где k – целое число, спектральная плотность амплитуд последовательности импульсов в N раз больше спектральной плотности амплитуд одиночного импульса. Это объясняется тем, что спектральные составляющие различных импульсов с указанными частотами складываются со сдвигами фаз, кратными 2π . Ширина основного лепестка спектральной плотности амплитуд определяется длительностью одного импульса и равна $\frac{2 \cdot 2\pi}{\tau_u}$. Спектр носит гребенчатый характер с шириной гребенки, равной $\frac{2 \cdot 2\pi}{NT}$, и количеством гребенок $\frac{2T}{\tau_u - 1}$.

Штриховыми линиями на рисунке 5.6 показана спектральная плотность амплитуд одиночного импульса. С увеличением числа импульсов в последовательности спектральная плотность все больше расщепляется и в пределе при $N \rightarrow \infty$ принимает линейчатую структуру спектра периодической

функции.

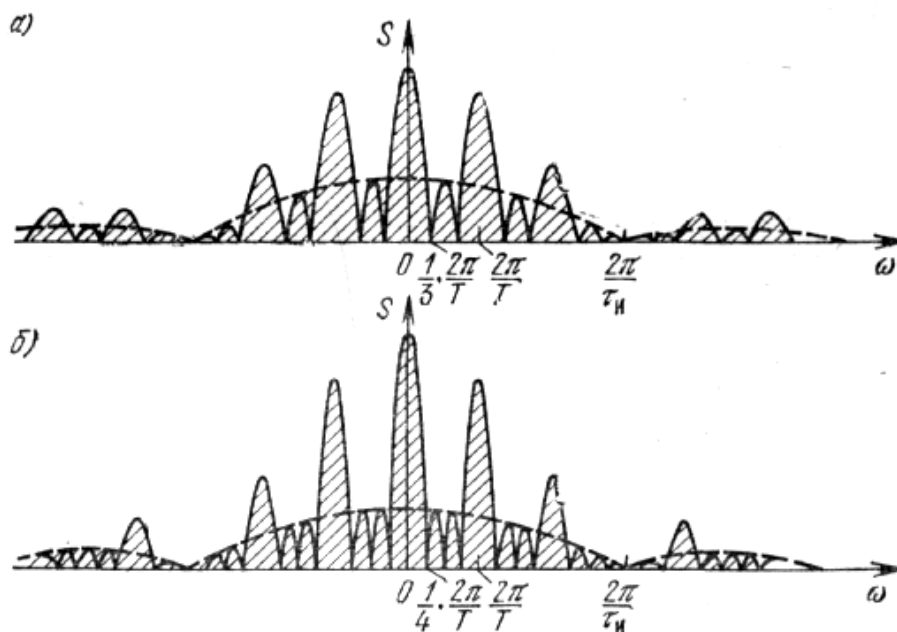


Рисунок 5.6

5.1.1 Краткие сведения об использовании программы Mathcad

Анализ частотных спектров различных сигналов может быть выполнен в среде математического пакета Mathcad. Кратко рассмотрим особенности использования данной программы.

Для получения линейчатого спектра бесконечной последовательности прямоугольных импульсов (рисунок 5.7) в Mathcad можно воспользоваться условным оператором и оператором цикла. Фрагмент программы показан на рисунке 5.8.

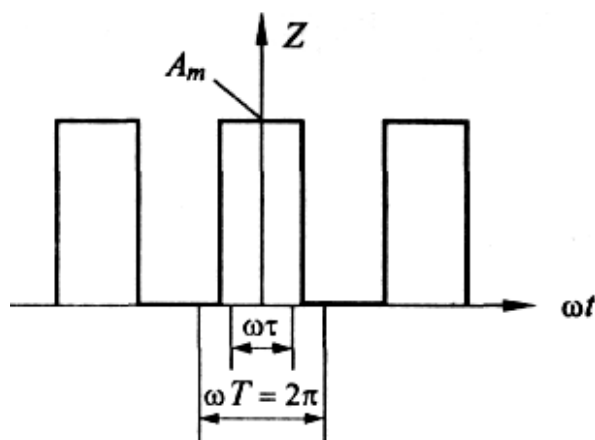


Рисунок 5.7

$$\alpha := \frac{\tau}{T}$$

$$Z(x) := \begin{cases} AM & \text{if } |x| \leq \alpha \cdot \pi \\ 0 & \text{if } \alpha \cdot \pi < |x| \leq \pi \end{cases}$$

$$k := 0..N \quad A_k := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} Z(x) \cdot \cos(k \cdot x) dx$$

Рисунок 5.8

С помощью условного оператора формируется прямоугольный импульс $Z(x)$ длительностью τ с амплитудой AM , симметричный относительно $\omega t = 0$.

Спектральная плотность амплитуд одиночного прямоугольного импульса длительностью τ_1 также может быть получена в Mathcad. Фрагмент программы показан на рисунке 5.9.

$$fh := -100 \quad \tau_1 := .05 \quad DF := 1 \quad N := 200$$

$$u(t) := \begin{cases} AM & \text{if } 0 \leq t \leq \tau_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad +$$

$$n := 0..N \quad f_n := fh + n \cdot DF$$

$$A_n := \int_0^{\tau_1} u(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t) dt$$

$$B_n := \int_0^{\tau_1} u(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t) dt \quad S_n := \sqrt{(A_n)^2 + (B_n)^2}$$

Рисунок 5.9

5.2 Подготовка к работе

5.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя рекомендованную литературу и подраздел 5.1 методических указаний.

5.2.2 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

5.3 Задание на проведение исследований

5.3.1 Исследовать возможность формирования периодического колебания сложной формы на основе сложения нескольких гармонических колебаний.

5.3.2 Провести гармонический анализ простейшего периодического колебания.

5.3.3 Провести гармонический анализ аperiodического сигнала.

5.4 Порядок проведения исследований

5.4.1 Используя математическое выражение (5.2), исследовать в программе Mathcad зависимость формы и параметров периодического сигнала от числа гармонических составляющих. Суммирование выполнять в диапазоне от $k = 1$ до $k = n$, где $n = 1, 2, \dots, 20$. Значение частоты f_1 и амплитуды U_{m1} первой гармоники взять из таблицы 5.1 в соответствии с вариантом исходных данных.

В отчет перенести графики функции $u(t)$ при $n = 3, 10, 20$.

Найти соотношение между амплитудой первой гармоники U_{m1} и амплитудой суммарного сигнала при $n = 20$ (измерять в средней части импульса). Определить период полученного колебания, сравнить его с периодом первой гармоники.

Сформулировать выводы.

5.4.2 Для одиночного прямоугольного импульса с единичной амплитудой ($AM = 1$) и заданной длительностью τ_1 в программе Mathcad (см. пример программы на рисунке 5.9) получить спектральную плотность амплитуд. Вывести график импульса во временной области и график спектральной плотности амплитуд. Графики перенести в отчет.

Проанализировать, как изменяется ширина основного лепестка спектральной плотности амплитуд при изменении длительности импульса (при $\tau_u = 0,5\tau_1$ и $\tau_u = 2\tau_1$).

Для каждого из трех значений длительности импульса τ_u определить ширину основного лепестка спектральной плотности амплитуд. Установить зависимость ширины основного лепестка спектральной плотности амплитуд от длительности импульса.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

5.4.3 В программе Electronics Workbench собрать схему, приведенную на рисунке 5.10. Установить параметры источника сигнала U_c в соответствии с исходными данными (таблица 5.1): частоту колебаний ($f = \frac{1}{T}$); длительность импульсов τ (задавать в виде отношения $\frac{\tau}{T}$ в процентах – параметр источника «Duty cycle»); амплитуду U .

Запустить моделирование и перенести в отчет осциллограмму сигнала, формируемого генератором.

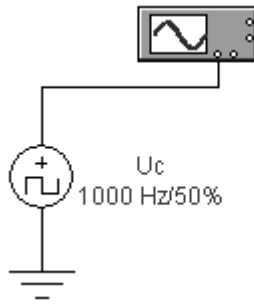


Рисунок 5.10

Для бесконечной последовательности прямоугольных импульсов с заданными параметрами T и τ получить амплитудный спектр. С этой целью открыть окно «Fourier analysis» (<Analysis>→<Fourier>) и установить в нем частоту («Fundamental frequency»), равной $\frac{1}{T}$ Гц, число гармоник («Number of harmonics») – 20, после чего нажать кнопку «Simulate». В окне «Analysis Graphs», нажав кнопку «Toggle Cursors», с помощью появившегося визира определить частоты гармоник и их амплитуды.

Определить ширину основного лепестка линейчатого спектра и расстояние между отдельными гармониками в спектре. Сопоставить полученные значения с длительностью импульсов и периодом их повторения. Сравнить амплитуду постоянной составляющей с амплитудой прямоугольных импульсов, формируемых генератором.

Вид спектра сигнала занести в отчет.

Проанализировать, как изменится спектр при изменении параметров импульсной последовательности (два случая – при $[2T, \tau]$ и $[T, 2\tau]$). Как изменяются амплитуды одноименных гармоник?

Виды спектров перенести в отчет.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

5.5 Контрольные вопросы

5.5.1 Что называется спектром сигнала?

5.5.2 Что называется гармониками?

5.5.3 Чему равна частота первой гармоники в спектре сигнала?

5.5.4 Какие гармоники называются высшими?

5.5.5 Что называется спектром амплитуд?

5.5.6 Какой спектр называется линейчатым?

5.5.7 Что называется спектральной плотностью амплитуд?

5.5.8 Записать тригонометрическую форму ряда Фурье.

5.5.9 Записать формулы для определения коэффициентов ряда Фурье.

5.5.10 Записать выражение ряда Фурье в комплексной форме.

5.5.11 Записать выражение интеграла Фурье.

5.5.12 Как получить выражения амплитудного и фазового спектров?

5.6 Варианты исходных данных

Таблица 5.1

Вариант	f_1 , Гц	U_{m1} , В	τ_1 , с	T , с	τ/T , %	U , В
А	100	1	0.06	0.005	20	1
Б	95	1.5	0.065	0.004	12	1.5
В	90	2	0.05	0.003	10	2
Г	80	2.5	0.055	0.002	14	2.5
Д	85	1.2	0.04	0.001	16	1.2
Е	70	2.1	0.045	0.006	18	2.1
Ж	105	1.8	0.03	0.005	25	1.8
З	110	3	0.07	0.007	30	3
И	115	2.6	0.075	0.008	28	2.6
К	120	1.6	0.08	0.004	26	1.6
Л	75	2.3	0.085	0.009	24	2.3
М	60	3.2	0.035	0.006	22	3.2
Н	65	1.4	0.02	0.002	32	1.4
О	125	2.4	0.025	0.008	24	2.4
П	130	1.3	0.09	0.007	34	1.3
Р	110	1	0.095	0.003	36	1
С	115	1.5	0.1	0.002	38	1.5
Т	120	2	0.15	0.001	40	2
У	75	2.5	0.05	0.006	10	2.5
Ф	60	1.2	0.055	0.005	12	1.2
Х	65	2.1	0.04	0.007	14	2.1
Ц	125	1.8	0.045	0.008	16	1.8
Ч	130	3	0.03	0.004	18	3
Ш	100	2.6	0.07	0.009	20	2.6
Щ	95	1.6	0.075	0.006	22	1.6
Э	90	2.3	0.08	0.002	24	2.3
Ю	80	3.2	0.085	0.008	26	3.2
Я	85	1.4	0.035	0.007	28	1.4

6 Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик полупроводниковых приборов

Лабораторная работа № 4 имеет целью закрепление теоретических сведений о физических свойствах полупроводниковых материалов, а также исследование основных характеристик и параметров полупроводниковых диодов и биполярных транзисторов.

6.1 Краткие сведения из теории

6.1.1 Полупроводниковые диоды

Как известно из курса электротехники, вольтамперная характеристика (ВАХ) элемента электрической цепи представляет собой зависимость тока, протекающего через элемент от напряжения на выводах этого элемента (или наоборот, зависимость напряжения от тока). ВАХ диода имеет две ветви: *прямую* (снимается, когда диод смещен в прямом направлении) и *обратную* (снятую при обратном смещении диода). На рисунке 6.1, а показано условное графическое обозначение (УГО) выпрямительного диода. Если полярность приложенного напряжения соответствует указанной на рисунке, то диод смещен в прямом направлении и через него течет прямой ток $I_{пр}$. Примерный вид ВАХ диода при прямом и обратном смещении показан на рисунке 6.1, б.

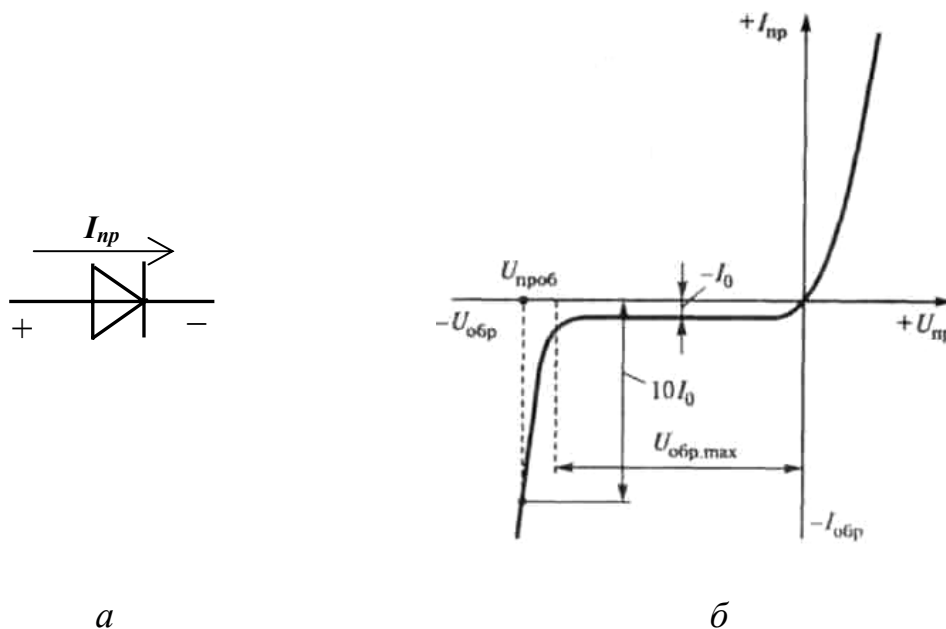


Рисунок 6.1

Чтобы снять прямую ветвь ВАХ диода, можно воспользоваться схемой измерения, приведенной на рисунке 6.2. Для снятия обратной ветви ВАХ необходимо поменять полярность источника напряжения U .

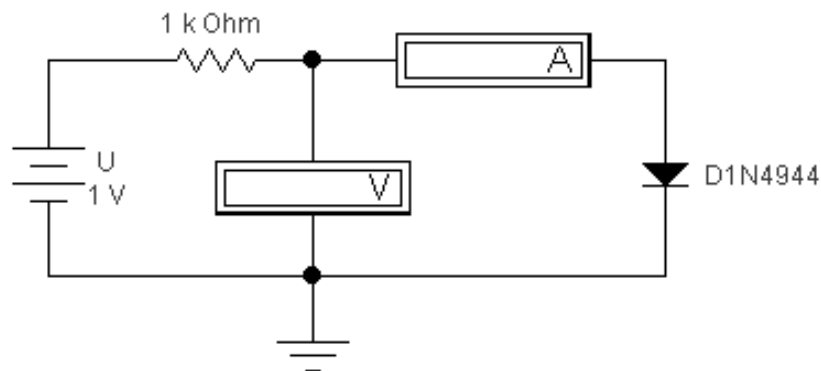


Рисунок 6.2

Диод представляет собой нелинейный элемент, поэтому его нельзя характеризовать величиной сопротивления, как линейный резистор. В связи с этим различают *статическое* сопротивление диода и *динамическое* (*дифференциальное*) сопротивление диода. *Статическое сопротивление* в заданной точке ВАХ можно определить по формуле

$$r_{\delta \text{ ст}} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}}. \quad (6.1)$$

Для определения *дифференциального сопротивления* диода используют формулу

$$r_{\delta \text{ диф}} = \frac{dU_{\delta}}{dI_{\delta}} \approx \frac{\Delta U_{\delta}}{\Delta I_{\delta}}, \quad (6.2)$$

где ΔU_{δ} и ΔI_{δ} – соответственно приращения напряжения и тока диода, определяемые по графику ВАХ.

Из рисунка 6.1, б видно, что как статическое, так и динамическое сопротивления диода существенно зависят от тока, протекающего через диод.

Основным отличием стабилитронов от выпрямительных диодов является то, что их используют в режиме электрического пробоя, который наблюдается при обратном смещении диода. Материалы, используемые в стабилитронах, имеют высокую концентрацию примесей. Это приводит к тому, что напряженность электрического поля в их *p-n*-переходах значительно выше, чем у остальных типов диодов. За счет этого при относительно небольших обратных напряжениях в *p-n*-переходе возникает электрический пробой. Механизм пробоя может быть **туннельным**, **лавинным** или **смешанным**. Обычно у низковольтных стабилитронов более вероятен туннельный пробой, а у высоковольтных – лавинный. В обоих случаях сильного нагрева *p-n*-перехода не происходит, поэтому теплового пробоя не наступает.

Обратная ветвь ВАХ стабилитрона и его УГО представлены на рисунке 6.3. Такая ВАХ может быть обеспечена только при *лавинном* или *туннельном* пробоях. Лавинный пробой имеет место у диодов, изготовленных из

полупроводника с большой шириной запрещенной зоны. Поэтому основным материалом для изготовления стабилитронов является кремний.

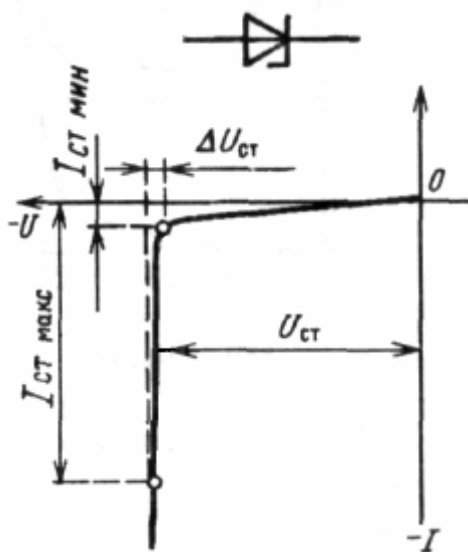


Рисунок 6.3

К основным параметрам стабилитрона относят:

- напряжение стабилизации ($U_{ст}$);
- минимально допустимый ток стабилизации ($I_{ст. мин}$);
- максимально допустимый ток стабилизации ($I_{ст. макс}$);
- дифференциальное сопротивление стабилитрона ($r_{ст диф}$) на участке пробоя;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации ($\alpha_{U_{ст}}$).

Напряжение стабилизации – это напряжение на стабилитроне при прохождении через него заданного тока стабилизации. На практике в исходной рабочей точке ток стабилизации задают равным

$$I_{ст} = \frac{I_{ст мин} + I_{ст макс}}{2}. \quad (6.3)$$

Следовательно, напряжение стабилизации $U_{ст}$ соответствует обратному напряжению на стабилитроне, при котором по нему течет ток $I_{ст}$.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{ст диф}$ определяют так же, как и у выпрямительного диода. Качество стабилитрона (то есть его способность стабилизировать напряжение при изменении проходящего по нему тока) тем выше, чем ниже его дифференциальное сопротивление.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{ст}}$ – это величина, определяемая отношением относительного изменения напряжения стабилизации к изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации.

Пусть при температуре t_1 напряжение стабилизации было равно u_{cm1} , а при температуре t_2 – соответственно u_{cm2} . Тогда температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{U_{cm}}$ может быть найден из формулы

$$\alpha_{U_{cm}} = \frac{u_{cm2} - u_{cm1}}{u_{cm1}(t_2 - t_1)}. \quad (6.4)$$

6.1.2 Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор является активным элементом, управляемым током в цепи управляющего вывода – *базы*. Для него могут быть построены две разновидности ВАХ – *входная*, представляющая собой зависимость тока в цепи базы транзистора от напряжения, приложенного между базой и эмиттером **при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером** и *семейство выходных ВАХ*, полученное как зависимость тока коллектора транзистора от напряжения между коллектором и эмиттером **при фиксированных значениях тока в цепи базы**.

На рисунке 6.4, в частности, приведены ВАХ маломощного транзистора КТ 315Б (аналог транзистора Q2N2712): слева – входные, справа – семейство выходных.

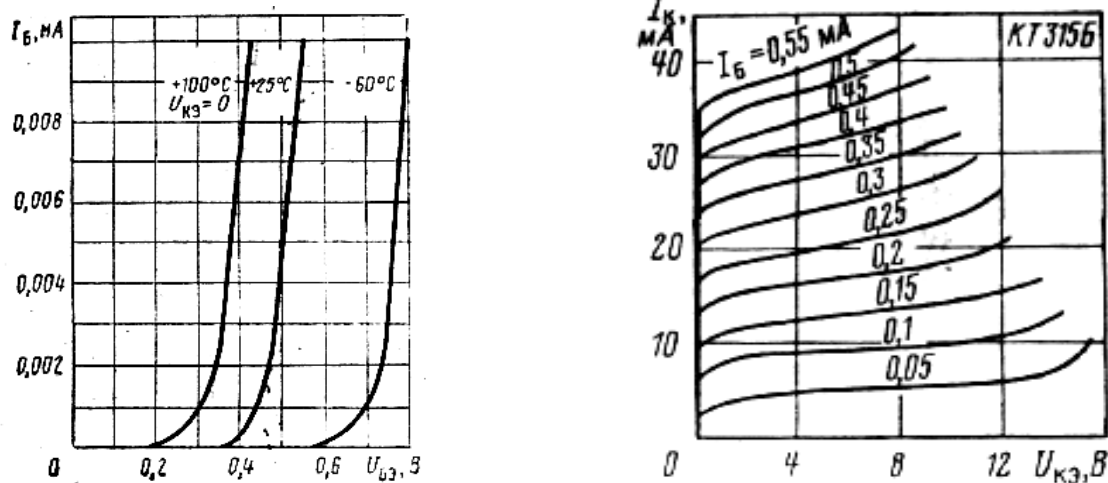


Рисунок 6.4

Токи I_B , I_K и I_E биполярного транзистора тесно взаимосвязаны. В частности, самый большой ток протекает в эмиттерной области транзистора. Для тока эмиттера можно записать

$$I_E = I_B + I_K. \quad (6.5)$$

Ток коллектора можно определить из равенства

$$I_K = \alpha_{cm} I_{\mathcal{E}} + I_{K0}, \quad (6.6)$$

где α_{cm} – статический коэффициент передачи тока эмиттера;

I_{K0} – обратный (тепловой) ток коллектора.

На практике $\alpha_{cm} = 0,95 \dots 0,998$.

Ток коллектора можно представить через ток базы:

$$I_K = \beta_{cm} I_B + (\beta_{cm} + 1) I_{K0}, \quad (6.7)$$

где $\beta_{cm} = \frac{\alpha_{cm}}{1 - \alpha_{cm}}$ – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером (в справочной литературе используется обозначение $h_{21\mathcal{E}}$; обычно принимает значение 10 ... 500 в зависимости от типа и мощности транзистора).

Статический коэффициент передачи тока базы, с учетом (6.7), может быть определен из выражения

$$\beta_{cm} = \frac{I_K - I_{K0}}{I_B + I_{K0}} \approx \frac{I_K}{I_B}, \quad (6.8)$$

а статический коэффициент передачи тока эмиттера, соответственно, из выражения

$$\alpha_{cm} = \frac{\beta_{cm}}{1 + \beta_{cm}}. \quad (6.9)$$

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы (в режиме усиления сигнала) определяются из выражения

$$\beta = \left. \frac{di_K}{di_B} \right|_{u_{K\mathcal{E}} = const} \approx \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B}, \quad (6.10)$$

где Δi_K и Δi_B – взаимозависимые приращения соответственно тока коллектора и тока базы при фиксированном значении напряжения $u_{K\mathcal{E}}$ (полученные из семейства выходных ВАХ транзистора).

Дифференциальное входное сопротивление $r_{вх\ диф}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при **фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер**. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению тока базы (по входной ВАХ транзистора):

$$r_{ex \text{ диф}} = \left. \frac{du_{БЭ}}{di_B} \right|_{u_{КЭ} = const} \approx \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_B}. \quad (6.11)$$

С учетом наклона выходных ВАХ транзистора, выражение (6.7) примет вид

$$i_K = \beta_{cm} i_B + (\beta_{cm} + 1) I_{K0} + \frac{u_{КЭ}}{r_K}, \quad (6.12)$$

где r_K – дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора:

$$r_K = \left. \frac{du_{КЭ}}{di_K} \right|_{i_B = const} \approx \frac{\Delta u_{КЭ}}{\Delta i_K}. \quad (6.13)$$

6.2 Подготовка к работе

6.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя рекомендованную литературу и подраздел 6.1 методических указаний.

6.2.2 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

6.3 Задание на проведение исследований

6.3.1 Используя экспериментальные данные, построить прямую и обратную ветви ВАХ выпрямительного диода.

6.3.2 Определить статическое и дифференциальное сопротивления выпрямительного диода на заданных участках ВАХ.

6.3.3 Используя экспериментальные данные, построить прямую и обратную ветви ВАХ стабилитрона.

6.3.4 Определить дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке электрического пробоя.

6.3.5 Построить нагрузочную характеристику параметрического стабилизатора.

6.3.6 Используя экспериментальные данные, построить входную ВАХ биполярного транзистора при различных температурах его корпуса.

6.3.7 Используя экспериментальные данные, построить одну ветвь выходных ВАХ транзистора.

6.3.8 Используя ВАХ транзистора и результаты измерений, определить его основные параметры: I_{K0} , β_{cm} , β , α_{cm} , $r_{ex \text{ диф}}$, r_K .

Таблица 6.3

$U,$ В	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	5	6	8
$U_{\Delta np},$ В												
$I_{\Delta np},$ мА												

6.4.6 Изменить полярность источника U на противоположную. Последовательно изменяя значения ЭДС источника U , записать в таблицу 6.4 значения напряжения $U_{\Delta обр}$ и тока $I_{\Delta обр}$ стабилитрона при обратном смещении.

Таблица 6.4

$U,$ В	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	-12	-15
$U_{\Delta обр},$ В												
$I_{\Delta обр},$ мА												

6.4.7 По полученным экспериментальным данным построить графики ВАХ стабилитрона $I_{\Delta np} = f(U_{\Delta np})$ и $I_{\Delta обр} = f(U_{\Delta обр})$ (в одной системе координат).

6.4.8 Используя график обратной ветви ВАХ стабилитрона, определить, чему равно значение напряжения стабилизации и вычислить дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке стабилизации. Полученные результаты записать в отчет.

6.4.9 Установить напряжение источника равным $U = -10$ В. Изменяя сопротивление нагрузки (R_H) в заданном диапазоне (таблица 6.5), снимать показания измерительных приборов и результаты заносить в таблицу. По полученным данным построить график зависимости напряжения на стабилитроне от тока нагрузки (сопротивления нагрузки) $U_{\Delta обр} = f(I_H)$.

Таблица 6.5

$R_H,$ Ом	10	50	100	500	1000	5000
$I_{обц},$ мА						
$I_H,$ мА						
$I_{\Delta обр},$ мА						
$U_{\Delta обр},$ В						

Проанализировать результаты исследований по п.п. 6.4.1 ... 6.4.9. Сформулировать выводы.

6.4.10 Собрать схему для исследования входных ВАХ транзистора (рисунок 6.6). Установить температуру транзистора равной $+20^{\circ}\text{C}$. Изменяя напряжение источника в цепи базы в диапазоне $0 \dots 2,5 \text{ В}$, снимать показания приборов в базовой цепи транзистора. Результаты измерений заносить в таблицу 6.6.

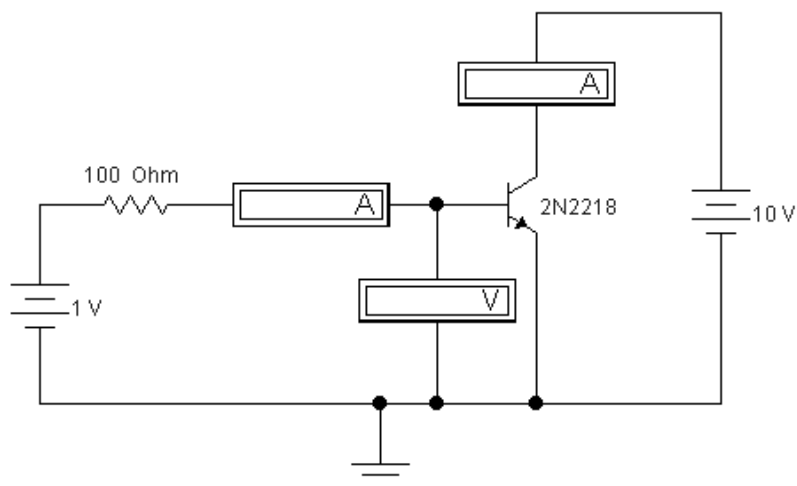


Рисунок 6.6

Таблица 6.6

$U_{ист},$ В	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5
$U_{БЭ},$ В												
$I_B,$ мА												

По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора $I_B = f(U_{БЭ})$. По входной ВАХ в окрестности напряжения $U_{БЭ} = 0,8 \text{ В}$ найти сопротивление $r_{ex \text{ диф}}$.

6.4.11 Установить температуру транзистора в соответствии с вариантом индивидуального задания. Повторить измерения по п. 6.4.10. Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 6.6. По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора, совместив ее с ВАХ, построенной в п. 6.4.10.

6.4.12 Установить напряжение источника в цепи базы равным 0 В . Включить схему. Записать измеренное значение обратного тока коллектора I_{K0} .

6.4.13 Собрать схему для исследования выходной ВАХ транзистора (рисунок 6.7). Установить ток базы в соответствии с вариантом задания.

Проанализировать изменение токов коллектора и эмиттера транзистора при изменении напряжения источника $U_{КЭ}$. Показания приборов занести в таблицу 6.7.

6.4.14 По данным таблицы построить выходную вольт-амперную характеристику транзистора $I_K = f(U_{КЭ})$.

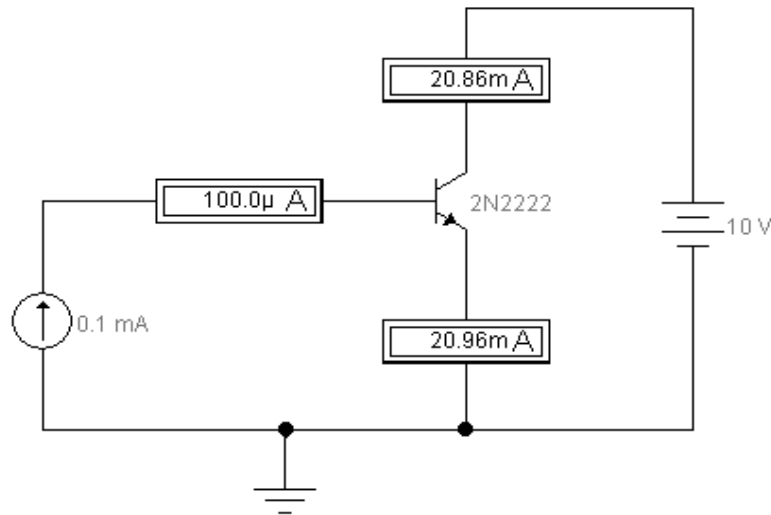


Рисунок 6.7

Таблица 6.7

$U_{КЭ}$, В	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
I_K , мА												
$I_Э$, мА												

6.4.15 Определить статические коэффициенты передачи тока базы (β_{cm}) и тока эмиттера (α_{cm}) при $U_{КЭ} = 2, 6$ и 10 В. Установить зависимость этих коэффициентов от напряжения $U_{КЭ}$. Определить дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора r_K . Проверить выполнение равенств (6.5), (6.6) и (6.7) при $U_{КЭ} = 10$ В.

Сформулировать выводы о проделанной работе.

6.5 Контрольные вопросы

6.5.1 С какой целью в полупроводниковый материал добавляют примесь?

6.5.2 В каком случае примесь называется донорной, а в каком акцепторной?

6.5.3 Что называется $p-n$ -переходом?

6.5.4 Что называется контактной разностью потенциалов? Чему равна контактная разность потенциалов в $p-n$ -переходе на основе кремния и германия?

6.5.5 В чем состоят различия между выпрямительным диодом и стабилитроном?

6.5.6 Влияет ли значение сопротивления нагрузки на степень стабилизации выходного напряжения стабилизатора?

6.5.7 От чего зависит ток коллектора транзистора?

6.5.8 Зависит ли коэффициент $\beta_{ст}$ от тока коллектора? Если да, то в какой

степени? Обосновать ответ.

6.5.9 На семействе выходных ВАХ транзистора показать область насыщения и область отсечки коллекторного тока.

6.5.10 Что оказывает большее влияние на ток коллектора – ток базы или напряжение коллектор-эмиттер?

6.5.11 Что можно сказать по входной ВАХ транзистора о сходстве или различии между базо-эмиттерным переходом транзистора и $p-n$ -переходом диода, смещенного в прямом направлении?

6.5.12 Одинаково ли значение $r_{ex\ диф}$ в любой точке входной характеристики?

6.5.13 Как подключаются источники напряжения к переходам база-эмиттер и база-коллектор?

6.5.14 Что является источником тока I_{K0} ?

6.5.15 Изобразить УГО транзисторов $p-n-p$ - и $n-p-n$ -типов.

6.5.16 Какими математическими соотношениями связаны токи транзистора?

6.5.17 В чем различия между статическим и дифференциальным входными сопротивлениями транзистора? Как их можно определить?

6.5.18 Как определить дифференциальное сопротивление коллекторной области транзистора r_K ?

6.6 Варианты исходных данных

Таблица 6.8

Вариант	Тип диода	$t^{\circ}\text{C}$	I_B , мА	Вариант	Тип диода	$t^{\circ}\text{C}$	I_B , мА
А	D1N4001	-60	0,05	П	D1N4936	45	0,25
Б	D1N4002	-55	0,1	Р	D1N4937	50	0,3
В	D1N4003	-50	0,15	С	D1N4942	55	0,35
Г	D1N4004	-45	0,2	Т	D1N4944	60	0,4
Д	D1N4005	-40	0,25	У	D1N4946	65	0,45
Е	D1N4006	-35	0,3	Ф	D1N4947	70	0,5
Ж	D1N4007	-30	0,35	Х	D1N4948	75	0,55
З	D1N4245	-25	0,4	Ц	D1N5059	80	0,05
И	D1N4246	-20	0,45	Ч	D1N5060	85	0,1
К	D1N4247	-15	0,5	Ш	D1N5061	90	0,15
Л	D1N4248	-10	0,55	Щ	D1N5062	95	0,2
М	D1N4249	10	0,05	Э	D1N5391	100	0,25
Н	D1N4933	15	0,1	Ю	D1N5393	105	0,3
О	D1N4934	35	0,15	Я	D1N5394	110	0,35

7 Лабораторная работа № 5. Исследование преобразователей аналоговых сигналов на операционных усилителях

Операционные усилители (ОУ) составляют основу современных устройств обработки (усиления, линейного и нелинейного преобразования, фильтрации) аналоговых сигналов. Целью лабораторной работы № 5 является освоение методики экспериментального определения основных показателей и характеристик линейных преобразователей аналоговых сигналов на ОУ, а также исследование зависимости показателей и характеристик схем, построенных на основе ОУ, от параметров элементов внешних цепей.

7.1 Краткие сведения из теории

Операционный усилитель – это унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, выполненный, как правило, в виде интегральной микросхемы. Он успешно применяется как при решении многих технических задач (усиление, генерирование, детектирование и преобразование сигналов, стабилизация напряжения и тока и т. п.), так и при выполнении математических операций над аналоговыми сигналами (суммирование, вычитание, дифференцирование, интегрирование и т. д.).

На ранних этапах развития вычислительной техники ОУ использовались в аналоговых вычислительных машинах для выполнения математических операций. С этим, в основном, и связано такое название интегральных усилителей данного класса, как *операционные (решающие)* усилители.

Идеальный ОУ должен обладать следующими параметрами и характеристиками:

- высокий коэффициент усиления напряжения ($K_{U0} \rightarrow \infty$);
- большое входное и малое выходное сопротивления ($R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$);
- высокая линейность передаточной характеристики;
- высокая верхняя граничная частота полосы пропускания ($f_B \rightarrow \infty$).

Следует отметить, что на практике ни одно из перечисленных выше требований к ОУ не может быть удовлетворено полностью. Достоверность допущений об идеальности свойств в каждом конкретном случае подтверждается сопоставлением реальных параметров ОУ и требований к разрабатываемым электронным устройствам. Так, если требуется разработать усилитель с коэффициентом усиления 100, то стандартный ОУ с коэффициентом усиления 250 000 можно рассматривать для этого случая как идеальный.

Условное графическое обозначение (УГО) ОУ приведено на рисунке 7.1. Треугольник в правом поле УГО операционного усилителя означает, что ОУ относится к классу усилителей.

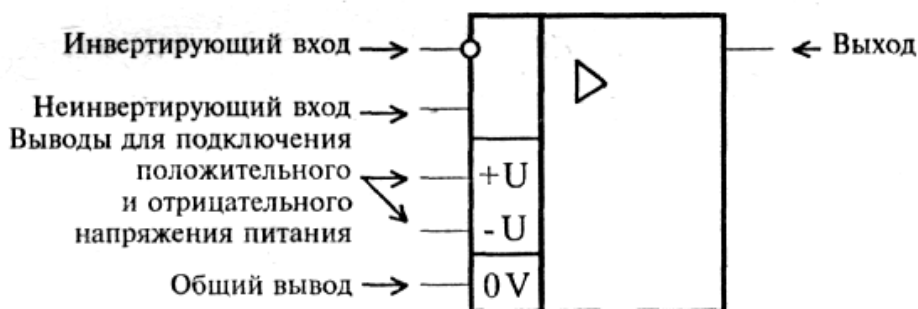


Рисунок 7.1

Как видно из рисунка, ОУ имеет два входа – *инвертирующий* и *неинвертирующий*. Поэтому при одновременной подаче сигналов на оба входа напряжение на выходе ОУ будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = K_{U0}(U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}-}). \quad (7.1)$$

Входные сигналы подают на ОУ относительно общего провода. Нагрузка подключается к усилителю между выходом и общим проводом.

Для нормального функционирования ОУ требуется подключение к нему двух разнополярных источников питания $+U$ и $-U$ (двухполярный источник питания), причем $|+U| = |-U|$. Общую точку двухполярного источника питания также подключают к общему проводу (общей шине для входных и выходного сигналов). В реальных ОУ напряжение питания лежит, в основном, в диапазоне $\pm 6 \text{ В} \dots \pm 15 \text{ В}$. Использование двухполярного источника питания обеспечивает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжений ОУ.

На рисунке 7.1 показаны только шесть основных выводов ОУ. Однако реальные операционные усилители снабжаются большим числом выводов, которые используются для подключения дополнительных элементов контроля, балансировки, коррекции частотной характеристики и других функций.

На рисунке 7.2, а приведено упрощенное УГО операционного усилителя, часто используемое при изображении схем в учебной и технической литературе. Как видно, для упрощения на нем не показаны выводы, к которым подключают источники питания. Кроме этого в литературе используют условное обозначение операционного усилителя, как функционального элемента (рисунок 7.2, б).

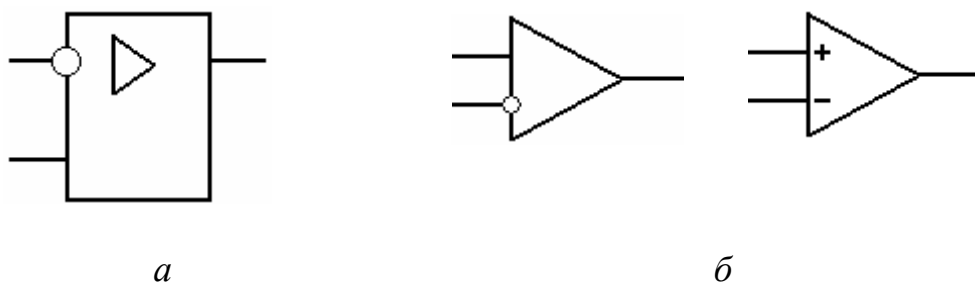


Рисунок 5.2

К основным параметрам реальных ОУ относятся:

- коэффициент усиления напряжения K_{U0} (значение которого для разных типов ОУ может находиться в диапазоне $500 \dots 10^6$);
- напряжение смещения $U_{см}$ – постоянное напряжение, которое необходимо подать на один из входов, чтобы при отсутствии входных сигналов напряжение на выходе равнялось нулю (обычно составляет $3 \dots 7$ мВ);
- верхняя граничная частота f_B (в зависимости от типа ОУ составляет десятки Гц – десятки кГц);
- частота единичного усиления f_1 – частота, на которой ОУ не усиливает входной сигнал (единицы МГц);
- скорость нарастания напряжения на выходе ОУ при подаче на его вход скачка напряжения, $V_{U_{ВЫХ}}$ (единицы В/мкс).

Основными характеристиками ОУ являются *передаточная* и *амплитудно-частотная характеристики*. Различают передаточную характеристику для неинвертирующего и инвертирующего входов. Применение двух источников питания в ОУ при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двухполярное напряжение. Следовательно, передаточная характеристика усилителя расположена в двух квадрантах. На рисунке 7.3, *а* и *б* приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинвертирующего и инвертирующего входов. Из этих характеристик следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ($U_{вых.max}$) всегда меньше напряжения источников питания.

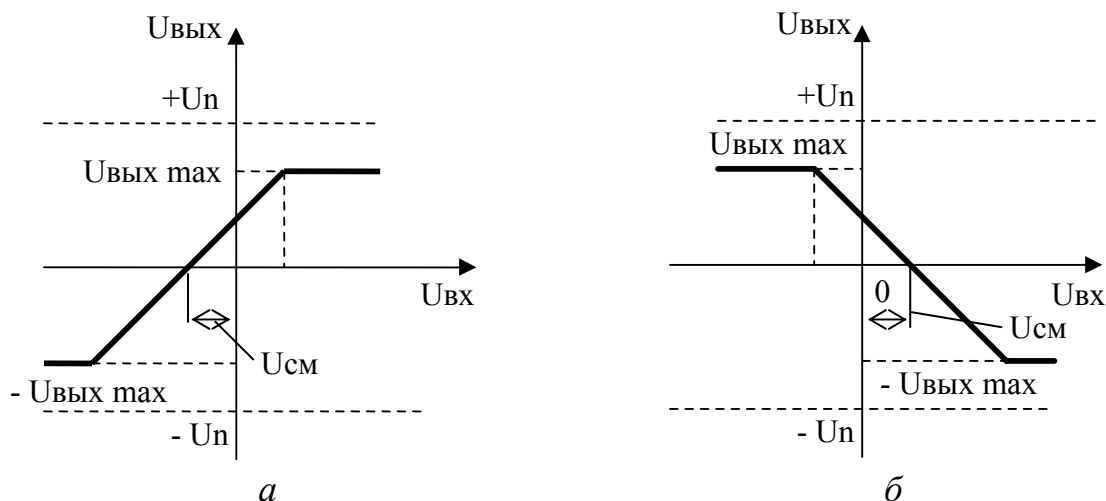


Рисунок 7.3

Логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) операционного усилителя примерно имеет вид, представленный на рисунке 7.4. Спад ЛАЧХ в области высоких частот составляет около -20 дБ/дек.

С учетом того, что ширина полосы пропускания ОУ существенно ограничена (f_B составляет десятки Гц – десятки кГц), основное достоинство ОУ – большой коэффициент усиления, может быть использовано, в основном, при усилении постоянных напряжений (токов). При использовании ОУ в качестве усилителя переменного тока, с целью расширения его полосы пропускания

вводят отрицательную обратную связь (ООС). В зависимости от способа подключения к ОУ элементов цепи ООС, на его основе может быть получен *неинвертирующий* (рисунок 7.5) или *инвертирующий* (рисунок 7.6) усилитель.

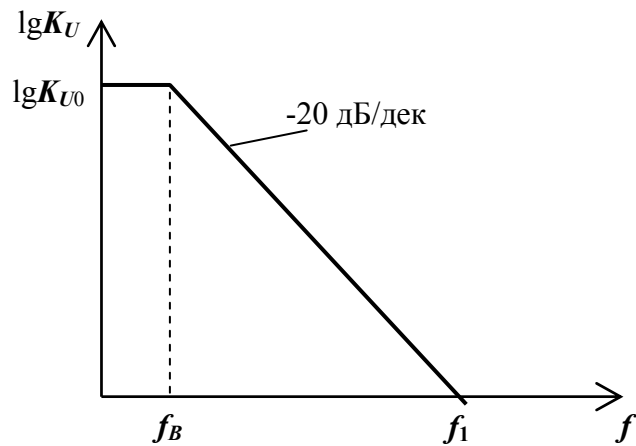


Рисунок 7.4

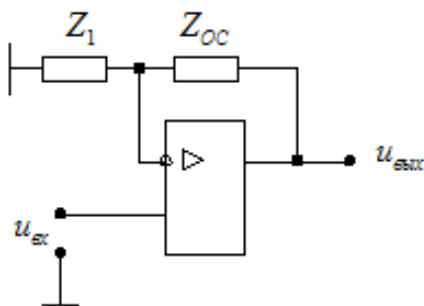


Рисунок 7.5

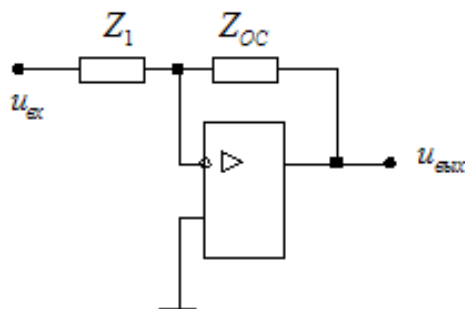


Рисунок 7.6

Коэффициент усиления напряжения неинвертирующего усилителя вычисляется по формуле

$$K_{UООС} \approx \frac{Z_1 + Z_{OC}}{Z_1} = 1 + \frac{Z_{OC}}{Z_1}, \quad (7.2)$$

а инвертирующего – по формуле

$$K_{UООС} \approx -\frac{Z_{ООС}}{Z_1}. \quad (7.3)$$

Знак минус в выражении (7.3) указывает на то, что фаза (полярность) напряжения на выходе инвертирующего усилителя противоположна фазе (полярности) входного напряжения. Из выражений (7.2) и (7.3) видно, что численное значение коэффициента усиления напряжения усилителей на основе ОУ, охваченных ООС, определяется только параметрами элементов цепи ООС и не зависит от величины собственного коэффициента усиления напряжения ОУ K_{U0} . Кроме этого инвертирующий усилитель может иметь сколь угодно малое значение коэффициента усиления напряжения, а минимальное значение $K_{UООС}$ неинвертирующего усилителя равно единице.

Цепь ООС, охватывающая ОУ, может быть как *частотонезависимой*, так и *частотозависимой*. Кроме этого элементы цепи ООС могут быть как *линейными*, так и *нелинейными*. Это позволяет получать на основе ОУ схемы различных электронных устройств, реализующих операции линейного и нелинейного преобразования аналоговых сигналов: суммирования, вычитания, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования, возведения в степень и др.

Рассмотрим примеры некоторых устройств линейного преобразования аналоговых сигналов, реализованных на основе ОУ. В частности, к линейным относятся такие математические операции, как интегрирование и дифференцирование.

Интегратором (интегрирующим усилителем) называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала. Интеграторы широко применяются для формирования линейно нарастающего или линейно убывающего напряжений (в электронных реле времени, в некоторых типах аналого-цифровых преобразователей, в генераторах развертки луча осциллографов и др.).

Простейшую схему интегратора можно получить, если включить в цепь ООС конденсатор, как это показано на рисунке 7.7.

Выходное напряжение идеального интегратора связано с его входным напряжением соотношением

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt, \quad (7.4)$$

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

Если на вход схемы, приведенной на рисунке 7.7, подать скачок напряжения с постоянным значением $u_{\text{вх}} = E_0$, то выходное напряжение будет изменяться во времени по линейному закону

$$u_{\text{вых}}(t) = -E_0 \frac{t}{\tau}. \quad (7.5)$$

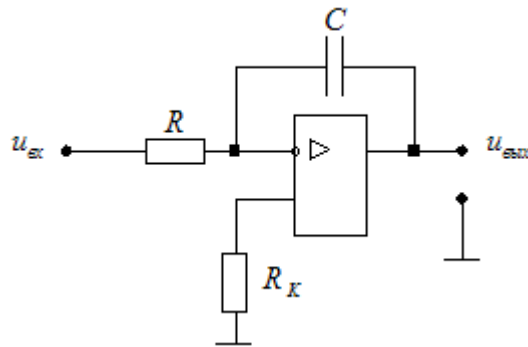


Рисунок 7.7

Как видно из соотношения (7.5), выходное напряжение не зависит от коэффициента усиления ОУ и определяется только величиной входного напряжения и постоянной времени RC -цепи.

Чтобы обеспечить высокую точность интегрирования (малую погрешность интегрирования), постоянная времени $\tau = RC$ должна быть выбрана достаточно большой. Например, если требуется обеспечить погрешность интегрирования прямоугольного импульса, не превышающую 1%, то постоянная времени RC -цепи должна быть больше длительности импульса в 50 раз.

Недостатком схемы, приведенной на рисунке 7.7, является дрейф выходного напряжения, обусловленный напряжением смещения и входными токами ОУ.

Это нежелательное явление можно ослабить, если к конденсатору C подключить резистор $R1$ с большим сопротивлением (рисунок 7.8), обеспечивающий стабилизацию рабочей точки за счет отрицательной обратной связи по постоянному току.

Абсолютная погрешность интегрирования прямоугольного импульса в интеграторе может быть определена из выражения

$$\Delta_{\text{инт}} = U_{\text{вых лин}} - U_{\text{вых изм}}, \quad (7.6)$$

где $U_{\text{вых лин}} = \frac{U_{\text{вх}} t}{RC}$ – напряжение на выходе идеального интегратора;

t – интервал времени, в течение которого продолжалось интегрирование;

$U_{\text{вых изм}}$ – измеренное значение напряжения на выходе реального интегратора (собранного, например, по схеме, приведенной на рисунке 7.7 или 7.8).

Относительная погрешность интегрирования определяется выражением

$$\delta_{инт} = \frac{\Delta_{инт}}{U_{вых\ лин}} 100\%. \quad (7.7)$$

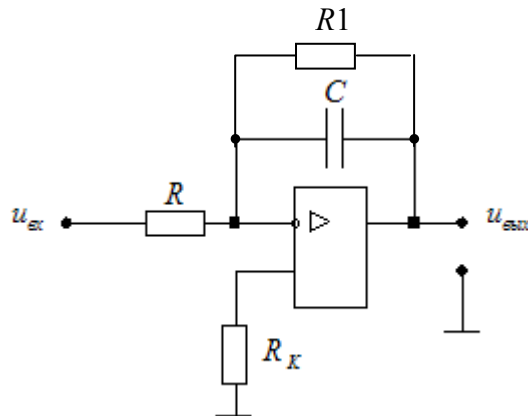


Рисунок 7.8

Интегратор может быть использован в качестве простейшего фильтра низших частот (ФНЧ) с частотой среза ω_B , определяемой (для схемы на рисунке 7.7) из соотношения

$$\omega_B \approx \frac{1}{K_{U0}RC}, \quad (7.8)$$

где K_{U0} – собственный коэффициент усиления ОУ, а для схемы, приведенной на рисунке 7.8 – из соотношения

$$\omega_B \approx \frac{1}{K_U RC} = \frac{1}{R_1 C}, \quad (7.9)$$

где $K_U = \frac{R_1}{R}$ – коэффициент усиления инвертирующего усилителя с ООС.

Частота, на которой коэффициент усиления интегратора равен единице, для схемы на рисунке 7.7 определяется из выражения

$$\omega_1 = \frac{1}{RC}, \quad (7.10)$$

а для схемы на рисунке 7.8 – соответственно выражением

$$\omega_1 = \frac{1}{RC} = \frac{K_U}{R_1 C}. \quad (7.11)$$

Вид АЧХ интегрирующего усилителя (рисунок 7.8) представлен на рисунке 7.9.

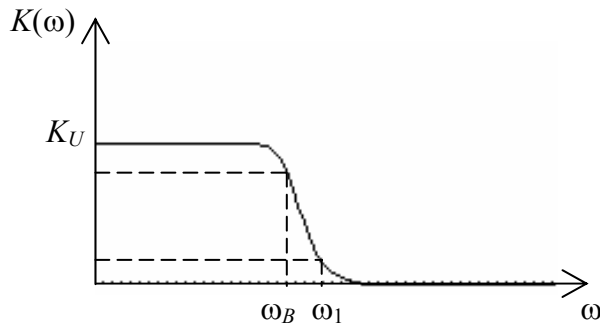


Рисунок 7.9

Дифференциатор (дифференцирующий усилитель) – это устройство, выходное напряжение которого пропорционально скорости изменения входного напряжения. Дифференциаторы применяются для получения коротких импульсов, выделения фронтов импульсов и т. д. Схема простейшего дифференциатора приведена на рисунке 7.10.

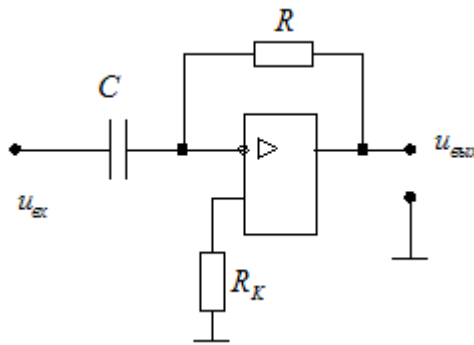


Рисунок 7.10

Напряжение на выходе дифференциатора определяется выражением

$$u_{\text{вых}}(t) = -RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}, \quad (7.12)$$

или

$$U_{\text{вых}} \approx -RC \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta t}. \quad (7.13)$$

Из-за ограниченной полосы пропускания и конечного значения коэффициента усиления реальных ОУ достаточно точно реализовать полученную зависимость не представляется возможным. Кроме того, анализ показывает, что в простейшей схеме дифференцирующего усилителя на ОУ могут возникать самовозбуждения из-за спада коэффициента усиления реального ОУ на высоких частотах и дополнительных фазовых сдвигов, вносимых цепью ООС. Поэтому на практике применяют различные модифицированные схемы дифференциаторов, в которых частично или

полностью устранены отмеченные недостатки. Пример одной из таких схем представлен на рисунке 7.11.

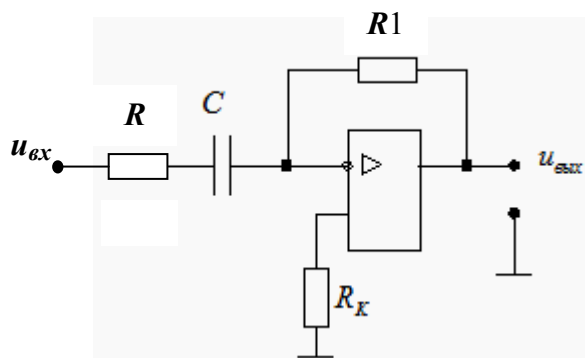


Рисунок 7.11

Дифференциатор может быть использован в качестве простейшего фильтра высших частот (ФВЧ) с частотой среза ω_H , определяемой (для схемы на рисунке 7.11) из соотношения

$$\omega_H \approx \frac{1}{RC} = \frac{K_U}{R_1 C}. \quad (7.14)$$

Частота единичного усиления ФНЧ определяется из выражения

$$\omega_1 \approx \frac{1}{R_1 C} = \frac{1}{K_U RC}, \quad (7.15)$$

где $K_U = \frac{R_1}{R}$ – коэффициент усиления инвертирующего усилителя с ООС.

Вид АЧХ дифференцирующего усилителя (рисунок 7.11) представлен на рисунке 7.12.

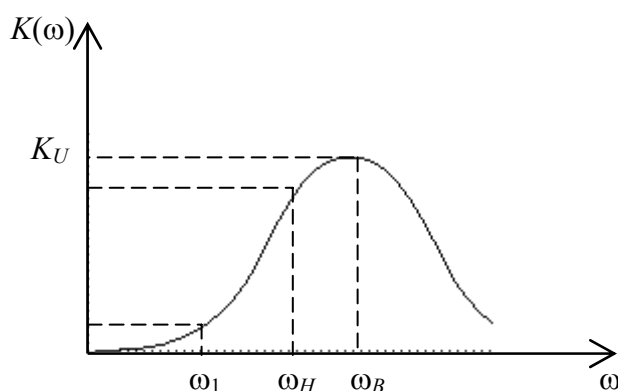


Рисунок 7.12

Как видно из представленной АЧХ, схема дифференцирующего усилителя может в полной мере выполнять свои функции

(дифференцирование входного сигнала) только в диапазоне частот от 0 до ω_B . На более высоких частотах наблюдается спад АЧХ, обусловленный спадом собственной АЧХ операционного усилителя. Именно по этой причине реальный дифференцирующий усилитель по своим характеристикам ближе к полосовым фильтрам.

7.2 Подготовка к работе

7.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя рекомендованную литературу и подраздел 7.1 методических указаний.

7.2.2 Используя исходные данные, приведенные в таблице 7.1 (для своего варианта), выполнить расчет:

- коэффициента усиления напряжения инвертирующего усилителя ($K_{U\text{ООС}}$) при $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_1 = 1,5R_2 \text{ кОм}$;
- коэффициента усиления напряжения неинвертирующего усилителя ($K_{U\text{ООС}}$) при $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_1 = 1,5R_2 \text{ кОм}$;
- для схемы интегрирующего усилителя – верхнюю граничную частоту ω_B и частоту единичного усиления ω_1 при $C = 0,05 \text{ мкФ}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$;
- для схемы дифференцирующего усилителя – нижнюю граничную частоту ω_H и частоту единичного усиления ω_1 при $C = 0,05 \text{ мкФ}$.

7.2.3 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

7.3 Задание на проведение исследований

7.3.1 Исследовать работу ОУ в неинвертирующем и инвертирующем включении.

7.3.2 Исследовать схему интегратора на ОУ:

- снять экспериментально переходные и частотные характеристики;
- установить зависимость погрешности интегрирования от параметров RC -цепи.

7.3.3 Исследовать схему дифференциатора на ОУ:

- снять экспериментально переходные и частотные характеристики;
- установить зависимость между параметрами выходного и входного напряжений схемы дифференциатора.

7.4 Порядок проведения исследований

7.4.1 Собрать схему инвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 7.13), задать параметры резистора R_2 в соответствии с вариантом (таблица 7.1).

Подать на вход схемы от источника сигнала гармоническое колебание с частотой $f_{\text{ex}} = 1 \text{ кГц}$ и амплитудой $U_{\text{ex}} = 10 \text{ мВ}$. Включить схему. Измерить амплитуды сигналов на входе и выходе ОУ.

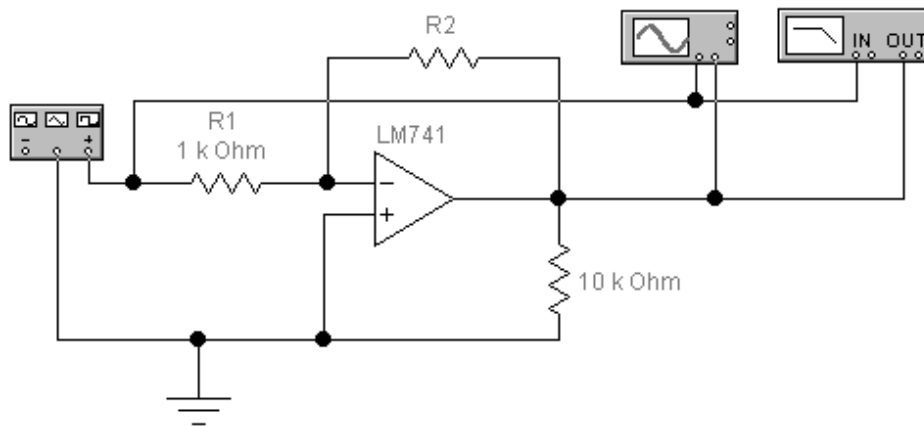


Рисунок 7.13

Примечание – При измерении амплитуды сигнала во всех экспериментах вход осциллографа должен быть включен в режим измерения переменного напряжения (режим «АС»).

Используя измеренные значения амплитуд сигналов, определить коэффициент усиления напряжения усилителя $K_{U\text{ оос}}$. Сравнить полученный результат с результатом, полученным аналитически при подготовке к лабораторной работе.

Сравнить фазы колебаний на входе и выходе усилителя.

Вид экрана осциллографа занести в отчет.

Снять АЧХ усилителя и определить по ней ширину полосы пропускания. Вид АЧХ занести в отчет.

Установить сопротивление резистора $R1$ равным $R1 = 1,5R2$. Повторить все предыдущие операции по п. 7.4.1.

По результатам проведенных исследований сформулировать выводы.

7.4.2. Собрать схему неинвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 7.14), задать параметры резистора $R2$ в соответствии с вариантом (таблица 7.1).

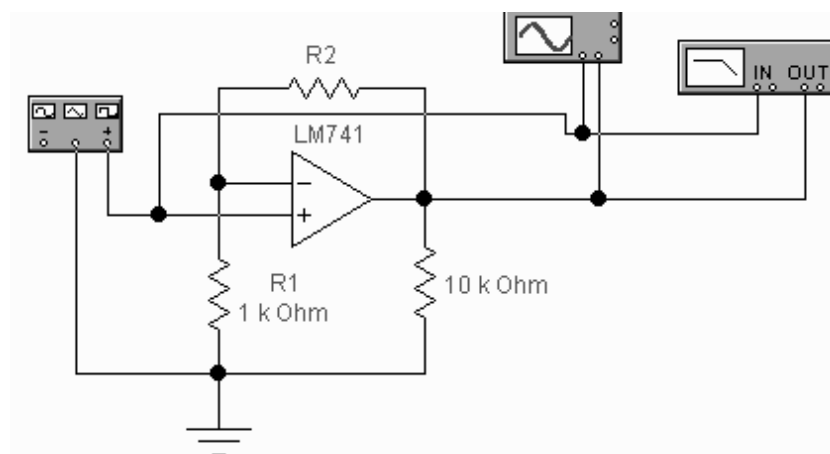


Рисунок 7.14

Подать на вход схемы от источника сигнала *гармоническое* колебание с частотой $f_{вх} = 1$ кГц и амплитудой $U_{вх} = 10$ мВ. Включить схему. Измерить амплитуды сигналов на входе и выходе ОУ.

Используя измеренные значения амплитуд сигналов, определить коэффициент усиления напряжения усилителя $K_{U\text{ оос}}$. Сравнить полученный результат с результатом, полученным аналитически при подготовке к лабораторной работе.

Сравнить фазы колебаний на входе и выходе усилителя.

Вид экрана осциллографа занести в отчет.

Снять АЧХ усилителя и определить по ней ширину полосы пропускания. Вид АЧХ занести в отчет.

Установить сопротивление резистора $R1$ равным $R1 = 1,5R2$. Повторить все предыдущие операции по п. 7.4.2.

По результатам проведенных исследований сформулировать выводы.

7.4.3. Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 7.15. Подать на вход интегратора *прямоугольные* импульсы амплитудой 5 В. Частоту повторения импульсов $f_{вх}$ и сопротивление резистора $R1$ задать в соответствии с вариантом индивидуального задания (таблица 7.1).

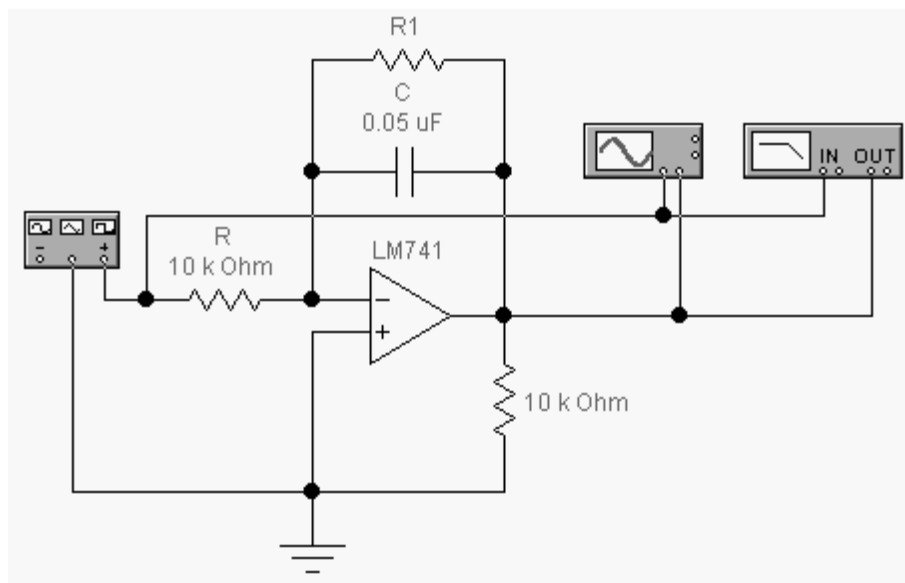


Рисунок 7.15

Включить моделирование. Получить на экране осциллографа изображение входного и выходного сигналов. Перенести полученные изображения в отчет.

По экрану осциллографа измерить интервал времени, в течение которого происходит убывание выходного напряжения интегратора за время действия импульса положительной полярности на входе, а также размах входного ($U_{вх}$) и выходного ($U_{вых\text{ изм}} = U_{вых\text{ макс}} - U_{вых\text{ мин}}$) напряжения.

Вычислить абсолютную (7.6) и относительную (7.7) погрешности интегрирования.

Результаты расчетов занести в отчет.

По результатам проведенных исследований сформулировать выводы.

7.4.4 Снять амплитудно-частотную характеристику интегратора. Перенести вид АЧХ в отчет. По АЧХ определить частоту среза (ω_B) и частоту единичного усиления (ω_1). Полученные результаты занести в отчет.

Сравнить значения ω_B и ω_1 с аналогичными параметрами, полученными аналитически при подготовке к лабораторной работе. Сформулировать выводы.

7.4.5 Задать емкость конденсатора C , равной 0,1 мкФ. Повторить все операции, изложенные в п. п. 7.4.3 и 7.4.4.

Сформулировать выводы о зависимости основных параметров и характеристик интегратора от параметров элементов цепи ООС.

7.4.6 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 7.16. Подать на вход дифференциатора импульсы *треугольной* формы амплитудой 5 В. Частоту повторения импульсов установить равной $f_{ex} = 1$ кГц, сопротивление резистора $R1$ задать в соответствии с вариантом (таблица 7.1).

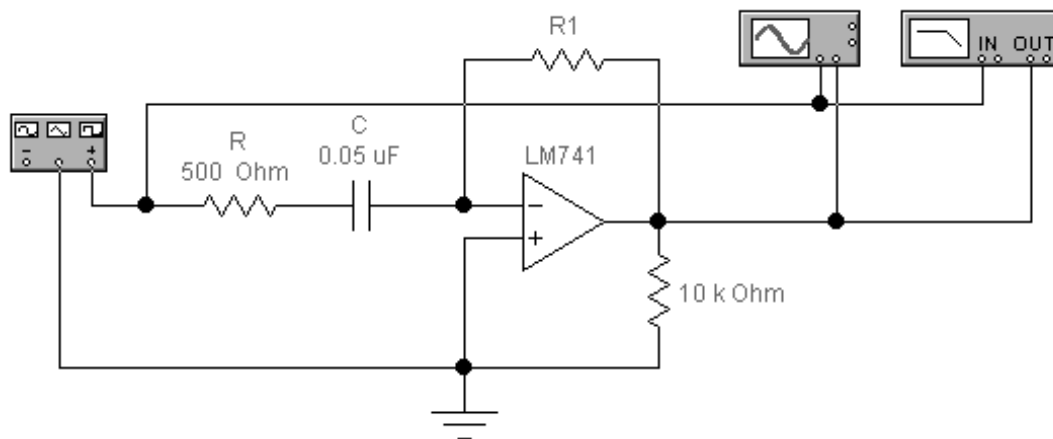


Рисунок 7.16

Включить моделирование. Получить на экране осциллографа изображение входного и выходного сигналов. Перенести полученные изображения в отчет.

По экрану осциллографа измерить интервал времени Δt , в течение которого входное напряжение изменяется от минимального до максимального уровня, а также величину приращения входного напряжения ΔU_{ex} ($\Delta U_{ex} = U_{ex \text{ макс}} - U_{ex \text{ мин}}$). Измерить максимальный уровень выходного напряжения $U_{вых \text{ изм}}$, соответствующий указанному приращению входного напряжения.

Вычислить напряжение $U_{вых}$ по формуле (7.13). Сравнить полученный результат с измеренным значением.

Результаты измерений и расчетов занести в отчет.

Сформулировать выводы.

7.4.7 Частоту повторения импульсов установить равной $f_{ex} = 2$ кГц. Повторить исследование по п. 7.4.6. Сравнить результаты, полученные в п. п. 7.4.6 и 7.4.7. Сформулировать выводы.

7.4.8. Снять амплитудно-частотную характеристику дифференцирующего усилителя. Перенести вид АЧХ в отчет. По АЧХ определить наибольшее значение коэффициента усиления $K_{U\text{ООС}}$, а также нижнюю граничную частоту (ω_H) и частоту единичного усиления (ω_1). Полученные результаты занести в отчет.

Сравнить значения ω_H и ω_1 с аналогичными параметрами, полученными аналитически при подготовке к лабораторной работе. Сформулировать выводы.

Сформулировать выводы о зависимости выходного напряжения дифференциатора от скорости нарастания входного напряжения, а также о зависимости нижней частоты среза АЧХ от параметров элементов цепи ООС.

7.5 Контрольные вопросы

7.5.1 Что называется операционным усилителем?

7.5.2 Привести примерные значения основных параметров типового операционного усилителя.

7.5.3 Записать выражение, связывающее выходное напряжение ОУ с его входными напряжениями. Что усиливает операционный усилитель?

7.5.4 Что называется напряжением смещения операционного усилителя.

7.5.5 Изобразить передаточную характеристику для инвертирующего (неинвертирующего) входа ОУ.

7.5.6 Изобразить типовую АЧХ операционного усилителя. Как определяется частота среза и частота единичного усиления по АЧХ?

7.5.7 Как определяется коэффициент усиления напряжения при неинвертирующем включении ОУ?

7.5.8 Как определяется коэффициент усиления напряжения при инвертирующем включении ОУ?

7.5.9 Как влияет величина коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью на ширину его полосы пропускания?

7.5.10 Из каких функциональных узлов состоит схема ОУ?

7.5.11 Что называется интегратором?

7.5.12 Что называется дифференциатором?

7.5.13 Как связано выходное напряжение интегратора со входным напряжением?

7.5.14 Как связано выходное напряжение дифференциатора со входным напряжением?

7.5.15 Как определить граничную частоту и частоту единичного усиления в схеме интегратора?

7.5.16 Как определить граничную частоту и частоту единичного усиления в схеме дифференциатора?

7.5.17 Как зависит точность интегрирования от параметров RC -цепи?

7.5.18 Из каких условий выбирают постоянную времени интегратора для обеспечения высокой точности интегрирования?

7.6 Варианты исходных данных

Таблица 7.1

Вариант	Усили- тель	Интегр.		Диффер.	Вариант	Усили- тель	Интегр.		Диффер.
	R2, кОм	$f_{вх}$, кГц	R1, кОм	R1, кОм		R2, кОм	$f_{вх}$, кГц	R1, кОм	R1, кОм
А	100	0,8	75	1	П	85	1,6	64	5,6
Б	120	0,5	62	1,5	Р	55	1,7	93	1,1
В	91	0,9	56	2	С	112	1,8	86	1,2
Г	68	0,95	115	2,5	Т	73	1,9	57	2,6
Д	51	1	130	3	У	84	2	65	6,4
Е	110	1,1	135	3,5	Ф	47	1,1	67	6,8
Ж	82	1,2	43	4,3	Х	96	1,2	98	2,4
З	75	1,3	58	4,5	Ц	78	1,3	85	2,8
И	62	1,4	100	5,1	Ч	64	1,4	55	3,2
К	56	1,5	120	3,3	Ш	93	1,5	112	3,9
Л	115	1,6	91	2,7	Щ	86	0,8	73	4,3
М	130	1,7	68	1,8	Э	57	0,5	84	4,7
Н	135	1,8	51	1,3	Ю	65	0,9	47	2,5
О	43	1,9	110	6,2	Я	67	0,95	96	3,1

8 Лабораторная работа № 6. Исследование последовательностных логических устройств

Целью лабораторной работы № 6 является закрепление знаний по основам цифровой электроники, изучение принципов функционирования последовательностных цифровых устройств – счетчиков и регистров, а также исследование функциональной зависимости выходных информационных сигналов от входных информационных и управляющих сигналов.

8.1 Краткие сведения из теории

Счетчиком называют последовательностное цифровое устройство (цифровой автомат), предназначенное для подсчета числа импульсов, поступающих на вход и формирования на выходе двоичного кода, эквивалентного числу подсчитанных импульсов. Счетчики находят применение в ЭВМ для формирования адресов команд, подсчета числа выполненных операций и др.

В процессе работы счетчик последовательно изменяет свое состояние (логические уровни на выходах Q_i) в определенном порядке. Количество разрешенных состояний счетчика называется *коэффициентом счета $K_{сч}$* . Одно из возможных состояний счетчика принимается за начальное. Если счетчик начал счет от начального состояния, то каждый импульс, кратный модулю счета $K_{сч}$, снова устанавливает счетчик в начальное состояние.

Для синтеза счетчиков используются *D-, T- или JK-триггеры*, соединенные определенным образом. Существует несколько способов классификации счетчиков. В частности, по направлению счета счетчики делятся на: *суммирующие, вычитающие и реверсивные*.

Если выходные коды счетчика при поступлении входных импульсов изменяются в возрастающем порядке, то счетчик называют *суммирующим*, если в убывающем порядке – *вычитающим*. Счетчики, у которых направление перебора кода может изменяться, называют *реверсивными*.

По способу синхронизации различают счетчики *синхронные* и *асинхронные*. Если для работы счетчика требуется наличие синхросигнала, то такой счетчик называют *синхронным*. Счетчики, которые работают без синхросигналов, называют *асинхронными*.

В случае динамической синхронизации в последовательностных логических устройствах синхровходы обозначаются определенными символами (рисунок 8.1). В частности, обозначение синхровхода, показанное на рисунках 8.1, *а* и *б*, указывает на то, что передача информации со входа на выход устройства будет производиться при переходе синхроимпульса от низкого уровня к высокому, а на рисунках 8.1 *в* и *г* – что передача информации будет производиться при переходе синхроимпульса от высокого уровня к низкому.

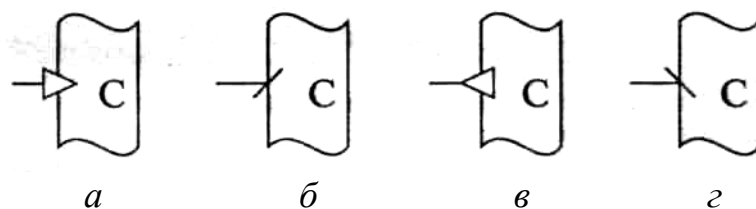


Рисунок 8.1

По модулю счета различают счетчики:

- двоично-десятичные;
- двоичные;
- с произвольным постоянным модулем счета;
- с переменным модулем счета.

Счетчик в общем случае можно представить как устройство, содержащее входную логику, управляющую работой счетчика, и выходную логику, которая используется для указания окончания счета или формирования сигнала переноса P . Для приведения счетчика в начальное состояние (как правило – логические нули на всех выходах), как и во всех последовательностных устройствах, используется сигнал сброса, поступающий на вход R .

Выходными сигналами счетчика обычно являются сигналы, снимаемые с выходов отдельных разрядов $Q_0 \dots Q_n$.

В качестве примера ниже приведены (рисунок 8.2) функциональная схема и условное графическое обозначение четырехразрядного асинхронного суммирующего счетчика К155ИЕ5. В таблице 8.1 представлено назначение выводов счетчика.

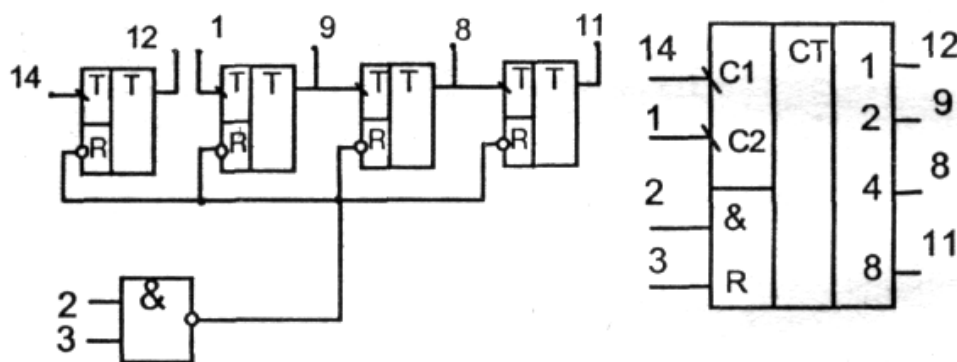


Рисунок 8.2

Обозначение выводов 1 и 14 указывает на то, что изменение состояний счетчика происходит по перепаду входных импульсов от высокого к низкому уровню. ИМС К155ИЕ5 является аналогом ИМС 7493.

Регистром называется последовательностное логическое устройство, предназначенное для хранения n -разрядного машинного слова и для выполнения над ним поразрядных логических операций. К таким операциям можно отнести:

- прием, хранение и выдача машинного слова;

- преобразование последовательного кода в параллельный и наоборот;
- сдвиг слова влево или вправо на заданное число разрядов.

Таблица 8.1 – Назначение выводов ИМС К155ИЕ5

№ вывода	Назначение	№ вывода	Назначение
1	Тактовый вход делителя на 2	8	Выход Q2
2	Вход установки 0	9	Выход Q1
3	Вход установки 0	10	Общий провод
4	Не используется	11	Выход Q3
5	+ 5 В	12	Выход Q0
6	Не используется	13	Не используется
7	Не используется	14	Тактовый вход делителя на 8

В качестве элементов памяти в регистре, как и в счетчике, используется совокупность триггеров, число которых равно числу двоичных разрядов выходного слова. Кроме этого регистр содержит комбинационную схему, позволяющую выполнять над словом перечисленные операции.

По способу ввода-вывода информации регистры делятся на:

- *параллельные;*
- *последовательные;*
- *комбинированные.*

По направлению передачи информации различают регистры *однонаправленные* и *реверсивные*.

На рисунке 8.3 приведено условное графическое обозначение *универсального четырехразрядного реверсивного сдвигающего регистра К555ИР11*, а в таблице 8.2 – назначение выводов данного регистра. ИМС К555ИР11 является аналогом ИМС 74194.

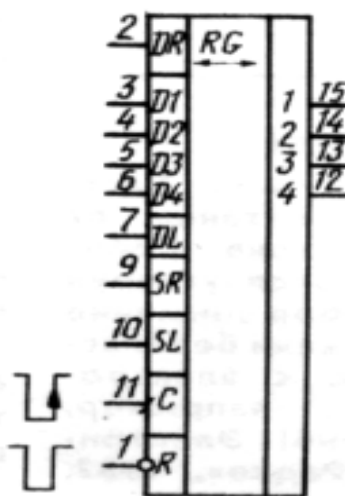


Рисунок 8.3

К555ИР11 – универсальный четырехразрядный сдвигающий регистр, в который можно записывать информацию последовательным или параллельным

кодом, а также сдвигать ее вправо или влево. Микросхема имеет входы $D1 \dots D4$ для информации параллельного кода и входы для подачи сигналов при последовательной записи и сдвиге вправо (в сторону возрастания номеров выходов) DR или влево (убывания номеров выходов) DL , управляющие входы SR и SL , входы для подачи тактовых импульсов C и сброса R .

Таблица 8.2 – Назначение выводов ИМС К555ИР11

№ вывода	Назначение	№ вывода	Назначение
1	Вход установки выходов в 0	9	Разрешение сдвига вправо
2	Вход последовательных данных при сдвиге вправо	10	Разрешение сдвига влево
3	Вход параллельных данных D0	11	Тактовый вход
4	Вход параллельных данных D1	12	Выход Q3
5	Вход параллельных данных D2	13	Выход Q2
6	Вход параллельных данных D3	14	Выход Q1
7	Вход последовательных данных при сдвиге влево	15	Выход Q0
8	Общий провод	16	+ 5 В

При поступлении уровня 0 на вход R триггеры регистра устанавливаются в нулевое состояние. При уровне 1 на входе R режим работы регистра определяется сигналами на входах SR и SL . В частности:

при $SR = 1, SL = 0$ передним фронтом положительного импульса на входе C информация, приходящая на вход DR , записывается последовательно и сдвигается вправо;

при $SR = 0, SL = 1$ передним фронтом положительного импульса на входе C информация, приходящая на вход DL , записывается последовательно и сдвигается влево;

при $SR = 1, SL = 1$ передним фронтом положительного импульса на входе C обеспечивается параллельная запись информации со входов $D1 \dots D4$ на выходы $Q1 \dots Q4$;

при $SR = 0, SL = 0$ обеспечивается хранение информации (при любых изменениях сигналов на входах триггеры регистра не переключаются).

8.2 Подготовка к работе

8.2.1 Изучить теоретические положения по теме проводимых исследований, используя рекомендованную литературу и подраздел 8.1 методических указаний.

8.2.2 Подготовить информацию для последующего ввода в регистр: в соответствии с вариантом (таблица 8.4), выполнить перевод входных данных из шестнадцатеричного в двоичный код.

8.2.3 Подготовить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 1 методических указаний.

8.3 Задание на проведение исследований

8.3.1 Исследовать функциональные возможности асинхронного двоичного счетчика К155ИЕ5 (на основе аналога ИМС 7493). Определить коэффициент счета при различных вариантах использования счетчика.

8.3.2 Исследовать функциональные возможности универсального восьмиразрядного реверсивного сдвигающего регистра, выполненного на двух четырехразрядных регистрах К555ИР11 (на основе аналога ИМС 74194).

8.4 Порядок проведения исследований

8.4.1 Собрать схему, представленную на рисунке 8.4.

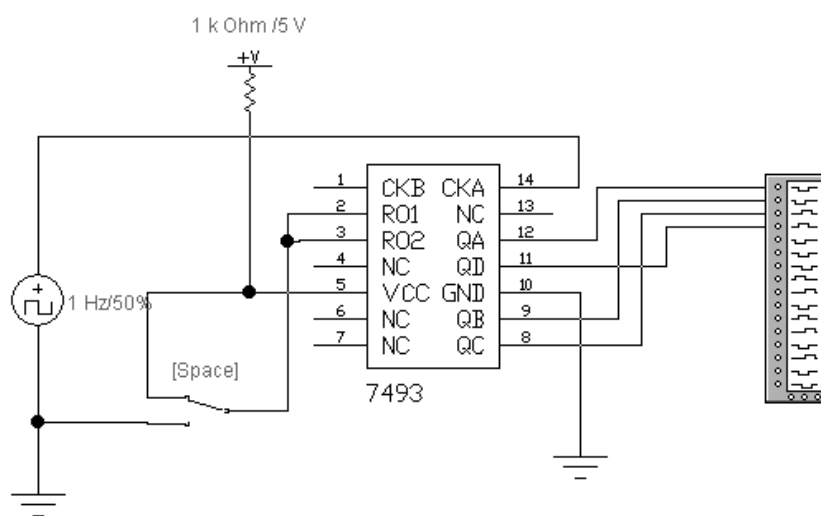


Рисунок 8.4

8.4.2 Выполнить настройки логического анализатора следующим образом:

- Clocks per division – установить равным 1;
- Clock – нажать Set... и в открывшемся окне «Clock setup» установить «Internal clock rate» равным 1 Гц. Подтвердить выбор нажатием кнопки «Accept».

Установить параметры источника сигнала:

- Frequency = 1 Гц;
- Duty Cycle = 50%;
- Voltage = 5 В.

8.4.3 Определить период входного сигнала.

Подключить входы R01, R02 к общему проводу. Запустить моделирование кнопкой «O/I», и через 5 ... 10 с остановить его. По осциллограмме на экране логического анализатора определить период последовательности импульсов на выходе QA, учитывая, что длительность одного такта равна 1 с. Сравнить полученное значение с периодом входного сигнала. Определить коэффициент счета $K_{сч}$ первой половины счетчика.

Перенести вид экрана логического анализатора в отчет.

8.4.4 Источник входного сигнала подключить к выводу 1 («СКВ») ИМС.

Запустить моделирование, и через 15 ... 20 с остановить его. Определить периоды последовательностей импульсов на выходах QB , QC , QD . Определить коэффициенты счета $K_{сч}$ относительно выходов QB , QC , QD , а также общий коэффициент счета второй половины счетчика.

Перенести вид экрана логического анализатора в отчет.

8.4.5 Источник входного сигнала подключить к выводу 14 («СКА») ИМС. Вывод 1 («СКВ») ИМС подключить к выводу 12 (QA).

Запустить моделирование, и через 18 ... 20 с остановить его. Определить период последовательности импульсов на выходе QD . Определить коэффициент счета $K_{сч}$ счетчика при такой схеме включения.

Перенести вид экрана логического анализатора в отчет.

8.4.6 Запустить моделирование. Через 5 ... 10 с подключить входы $R01$, $R02$ к источнику питания +5 В. Через 5 ... 7 с снова подключить входы $R01$, $R02$ к общему проводу. По экрану логического анализатора наблюдать за изменениями сигналов на выходах счетчика. Сформулировать вывод о назначении входов $R01$, $R02$.

Сформулировать выводы по результатам исследования счетчика.

8.4.7 Собрать схему, представленную на рисунке 8.5.

Переключатели на схеме предназначены:

– $\langle C \rangle$ – для формирования синхроимпульса (исходное положение – нижнее);

– $\langle P \rangle$ – для формирования данных при вводе двоичного слова последовательным кодом;

– $\langle 1 \rangle$, $\langle 2 \rangle$, ... $\langle 8 \rangle$ – для формирования данных при вводе двоичного слова параллельным кодом;

– $\langle L \rangle$ – управление сдвигом влево (в сторону от старших к младшим разрядам);

– $\langle R \rangle$ – управление сдвигом вправо (в сторону от младших к старшим разрядам).

8.4.8 Подготовить с помощью переключателей $\langle 1 \rangle$... $\langle 8 \rangle$ данные для записи в регистр параллельным кодом (в соответствии с номером варианта).

С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим ввода данных параллельным кодом.

Включить моделирование. Подать на ИМС импульс синхронизации (переключатель $\langle C \rangle$ перевести в верхнее положение, затем вернуть в исходное положение). Проанализировать состояние индикаторов, подключенных к выходам регистра. Данные, записанные в регистр, занести в таблицу 8.3.

Таблица 8.3 – Результаты исследований универсального регистра

№№ п/п	$QD2$	$QC2$	$QB2$	$QA2$	$QD1$	$QC1$	$QB1$	$QA1$

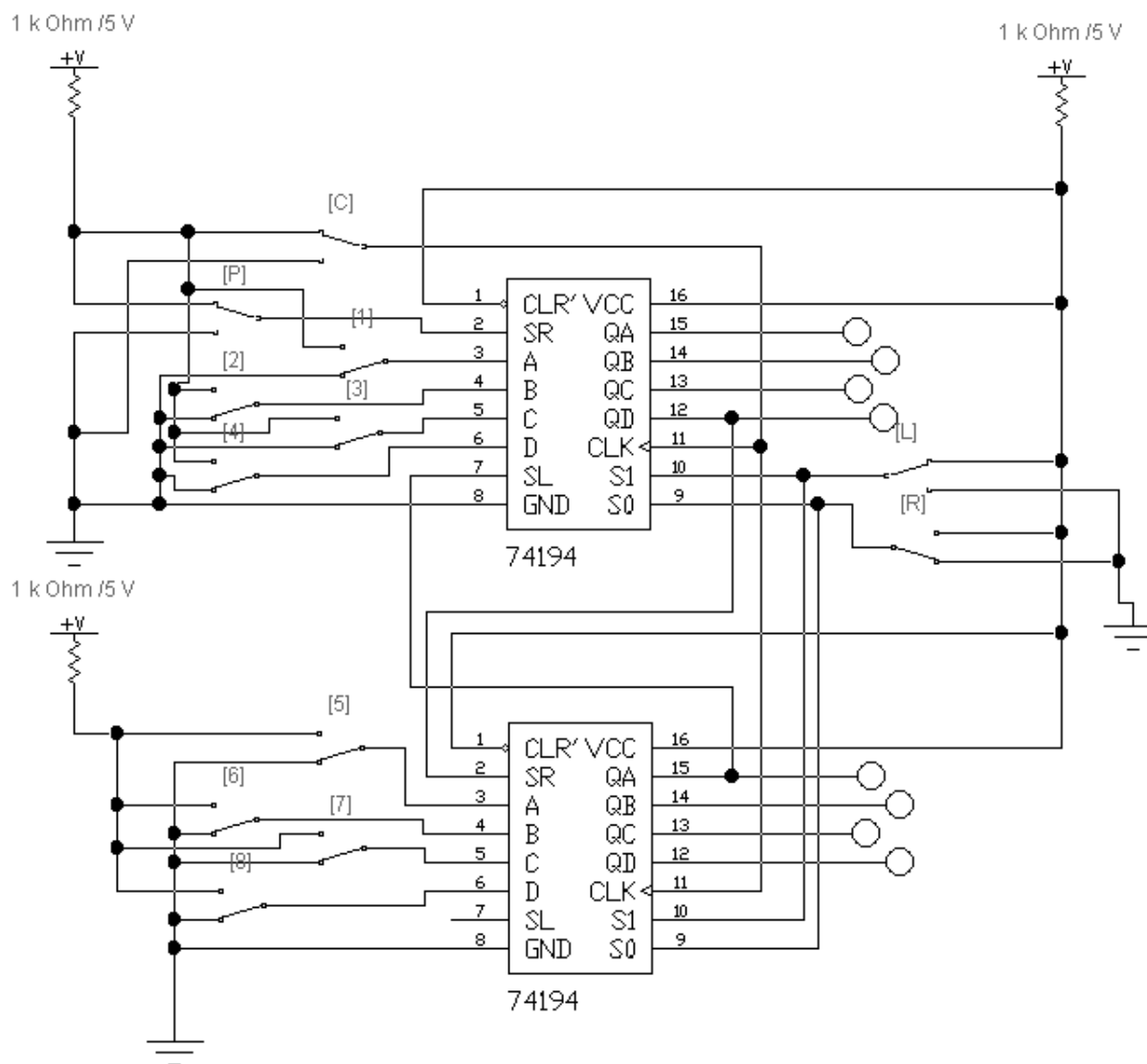


Рисунок 8.5

С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим сдвига информации в регистре вправо. Переключатель $\langle P \rangle$ установить в нижнее положение. Подать на ИМС импульс синхронизации с помощью переключателя $\langle C \rangle$ три раза, занося в таблицу состояния выходов регистра в каждом такте (после каждой подачи синхроимпульса).

С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим сдвига информации в регистре влево. Подать на ИМС импульс синхронизации с помощью переключателя $\langle C \rangle$ три раза, занося в таблицу состояния выходов регистра в каждом такте.

8.4.9 Очистить содержимое регистра (выключить и снова включить переключатель «О/Л» в правой верхней части окна программы). С помощью переключателей $\langle L \rangle$ и $\langle R \rangle$ задать режим сдвига вправо.

Используя переключатели $\langle P \rangle$ и $\langle C \rangle$, ввести в регистр данные в соответствии с вариантом последовательным кодом (начиная со старшего разряда). Состояния выходов регистра в каждом такте заносить в таблицу 8.3.

Проанализировать результаты выполнения пунктов 8.4.7 – 8.4.9.

Сформулировать выводы по результатам исследования универсального регистра.

8.5 Контрольные вопросы

8.5.1 Что называется триггером?

8.5.2 Привести таблицу переходов асинхронного *RS*-триггера.

8.5.3 Привести таблицу переходов асинхронного *JK*-триггера.

8.5.4 Привести таблицу переходов асинхронного *D*-триггера.

8.5.5 Привести таблицу переходов асинхронного *T*-триггера.

8.5.6 Что называется счетчиком?

8.5.7 Где находят применение счетчики?

8.5.8 На основе каких элементов синтезируют счетчики?

8.5.9 Как классифицируют счетчики?

8.5.10 Как создать счетчик с требуемым коэффициентом счета, используя ИМС счетчика с заданным коэффициентом счета?

8.5.11 Что называется регистром?

8.5.12 Какие логические операции можно выполнять с помощью регистра?

8.5.13 Как классифицируют регистры по способу ввода-вывода информации?

8.5.14 Как увеличить количество разрядов регистра, используя ИМС регистра с заданной разрядностью?

8.5.15 Пояснить назначение каждого из выводов исследованного регистра.

8.5.16 Как перевести регистр в режим хранения данных?

8.5.17 Как обнулить все информационные выходы регистра?

8.6 Варианты исходных данных

Таблица 8.4

Вариант	Данные	Вариант	Данные	Вариант	Данные
А	А2	Л	1В	Х	С3
Б	А3	М	2В	Ц	С4
В	4А	Н	3В	Ч	С5
Г	А5	О	4В	Ш	С6
Д	А6	П	5В	Щ	С7
Е	А7	Р	6В	Э	С8
Ж	А8	С	7В	Ю	С9
З	А9	Т	8В	Я	АВ
И	2D	У	D6		
К	D3	Ф	5D		

9 Список рекомендуемой литературы

- 1 **Атабеков, Г. И.** Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебное пособие / Г. И. Атабеков. – 6-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 592 с.
- 2 **Гусев, В. Г.** Электроника и микропроцессорная техника : учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 5-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2008. – 798 с.
- 3 **Касаткин, А. С.** Электротехника : учебник для студ. неэлектротехн. спец. вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 11-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 544 с.
- 4 **Немцов, М. В.** Электротехника и электроника : учеб. для вузов / М. В. Немцов. – М. : Высш. шк., 2007. – 560 с.
- 5 **Опадчий, Ю. Ф.** Аналоговая и цифровая электроника : полный курс: учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.
- 6 **Прянишников, В. А.** Электроника : полный курс лекций / В. А. Прянишников. – 5-е изд. – СПб. : Корона принт, 2006. – 416 с.

Приложение А (справочное)

Пример оформления отчета по лабораторной работе

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет дистанционных образовательных технологий

ОТЧЕТ

по лабораторной работе № 3
по курсу «Электротехника и электроника»

ГОУ ОГУ 140211.9309.12 О

Руководитель

_____ И. Иванов
« ___ » _____ 2009 г.

Исполнитель

студент гр. 3-08 ПОВТ

_____ В. Петров
« ___ » _____ 2009 г.

Оренбург 2009

Лабораторная работа № 3

Тема работы: «Исследование спектров периодических и аperiodических сигналов».

Цель работы:

- получить представление о спектральном составе периодических и непериодических сигналов;
- исследовать зависимость между временными и частотными параметрами сигналов.

Исходные данные для проведения исследований:

Вариант	f_1 , Гц	U_{m1} , В	τ_1 , с	T , с	τ/T , %	U , В
А	60	4	0.062	0.0055	24	1,2

1 Исследование зависимости формы и параметров периодического сигнала от числа гармонических составляющих

Фрагмент программы расчетов в Mathcad изображен на рисунке 1.

$$U_m := 4 \quad f := 60 \quad n := 1$$

$$t := 0, .0001.. .08$$

$$u(t) := \sum_{k=1}^n \frac{U_m \sin[2\pi(2k-1) \cdot f \cdot t]}{(2k-1)}$$

Рисунок 1

Графики функции $u(t)$ при числе гармоник n 3, 10 и 20, приведены, соответственно, на рисунках 2, 3 и 4.

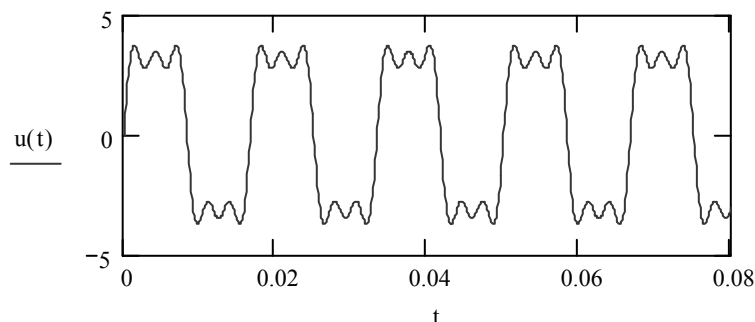


Рисунок 2

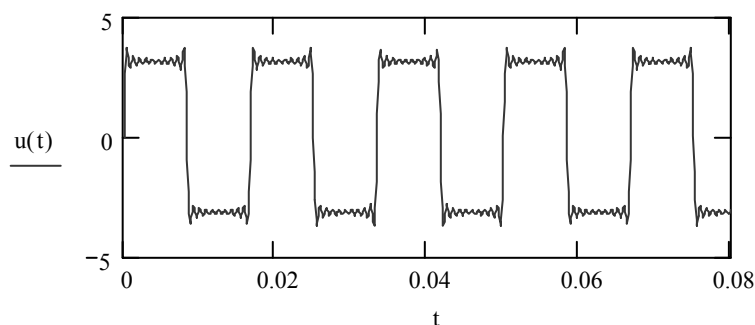


Рисунок 3

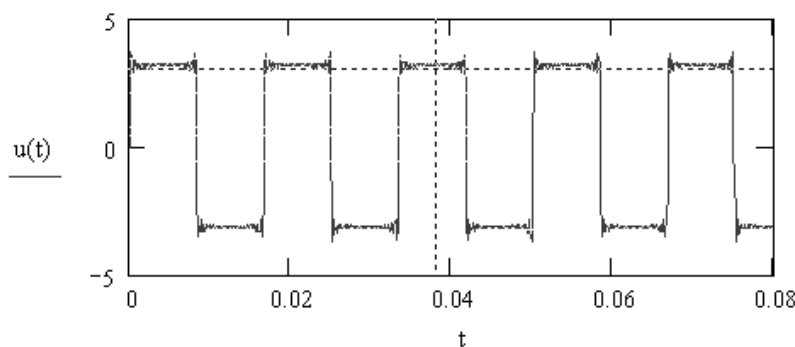
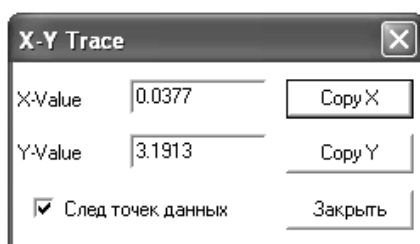


Рисунок 4

Выводы

1 Как видно из рисунков 2, 3 и 4, с увеличением числа гармоник форма периодического сигнала, образованного суммированием n гармоник, приближается к форме периодической последовательности прямоугольных импульсов.

2 Независимо от числа гармоник, период результирующего сигнала равен периоду первой гармоники, то есть $T = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{60} \approx 0,017$ с.

3 При $n = 20$ амплитуда суммарного сигнала примерно равна 3,2 В, что составляет 80% от амплитуды первой гармоники.

2 Исследование спектра одиночного прямоугольного импульса

Фрагмент программы расчетов в Mathcad изображен на рисунке 5.

Временное представление одиночного импульса показано на рисунке 6, а спектральная плотность амплитуд S при различных длительностях импульса ($\tau_u = \tau_1$, $\tau_u = 0,5\tau_1$ и $\tau_u = 2\tau_1$) показана на рисунках 7, 8 и 9.

fh := -100 τ1 := 0.062 DF := 1 N := 200

$$u(t) := \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq t \leq \tau_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$n := 0..N \quad f_n := fh + n \cdot DF$$

$$A_n := \int_0^{\tau_1} u(t) \cdot \cos(2\pi f_n t) dt \quad B_n := \int_0^{\tau_1} u(t) \cdot \sin(2\pi f_n t) dt$$

$$S_n := \sqrt{(A_n)^2 + (B_n)^2}$$

Рисунок 5

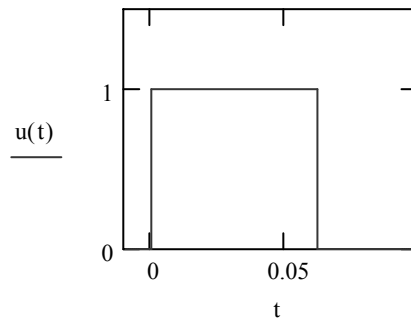


Рисунок 6

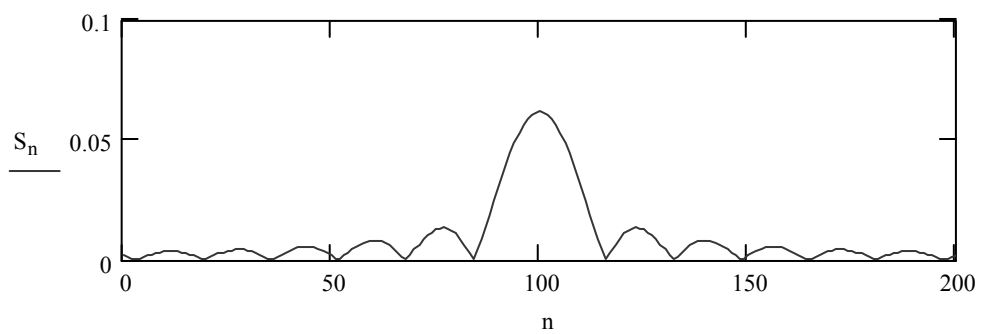


Рисунок 7

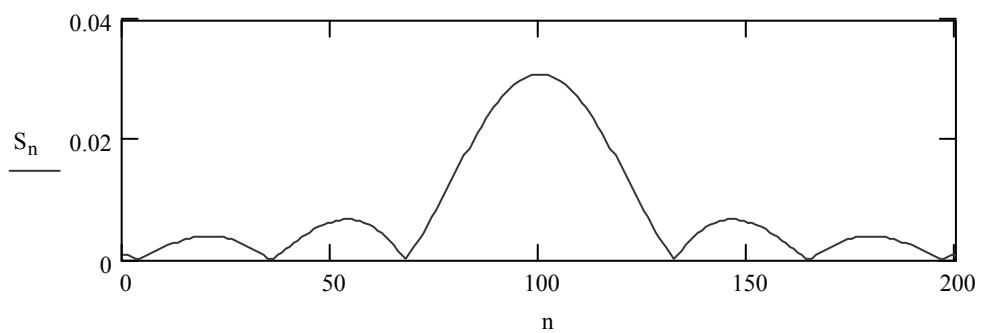


Рисунок 8

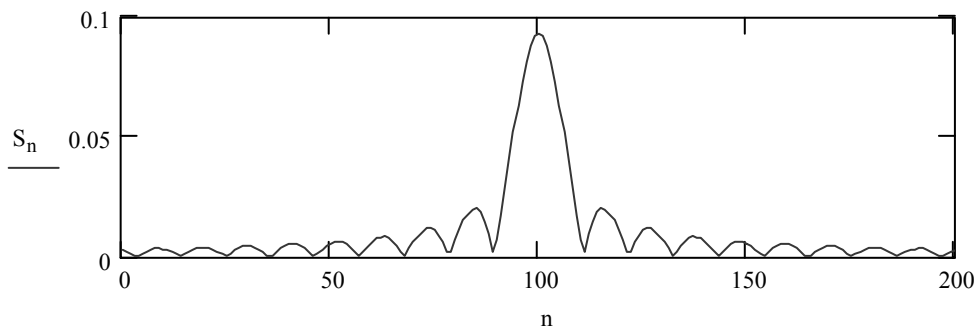


Рисунок 9

Ширина основного лепестка спектральной плотности амплитуд на уровне 0,5 составляет $\Delta f \approx \frac{1}{\tau_u}$, тогда при $\tau_u = \tau_1$

$$\Delta f \approx \frac{1}{0,062} = 16 \text{ Гц},$$

при $\tau_u = 0,5\tau_1$

$$\Delta f \approx \frac{1}{0,5 \cdot 0,062} = 32 \text{ Гц},$$

при $\tau_u = 2\tau_1$

$$\Delta f \approx \frac{1}{2 \cdot 0,062} = 8 \text{ Гц}.$$

Выводы

1 Ширина основного лепестка спектральной плотности амплитуд на уровне 0,5 обратно пропорциональна длительности импульса и уменьшается с увеличением его длительности.

2 Амплитуды одноименных гармоник в основном лепестке тем больше, чем меньше длительность импульса.

3 Исследование спектра бесконечной последовательности прямоугольных импульсов

Электрическая функциональная схема лабораторной установки для проведения эксперимента приведена на рисунке 10.

Осциллограмма исследуемого сигнала показана на рисунке 11, а спектр амплитуд сигнала при заданных параметрах импульсной последовательности – на рисунке 12.

Амплитуда постоянной составляющей в спектре сигнала равна $U_0 = 281,25$ мВ, что составляет примерно 23% от амплитуды импульса.

Частота первой гармоники $f_1 = 181,82$ Гц, частота второй гармоники – $f_2 = 363,64$ Гц.

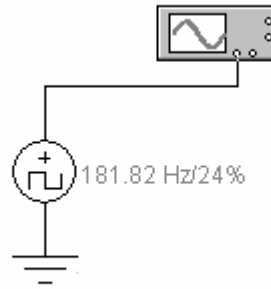


Рисунок 10

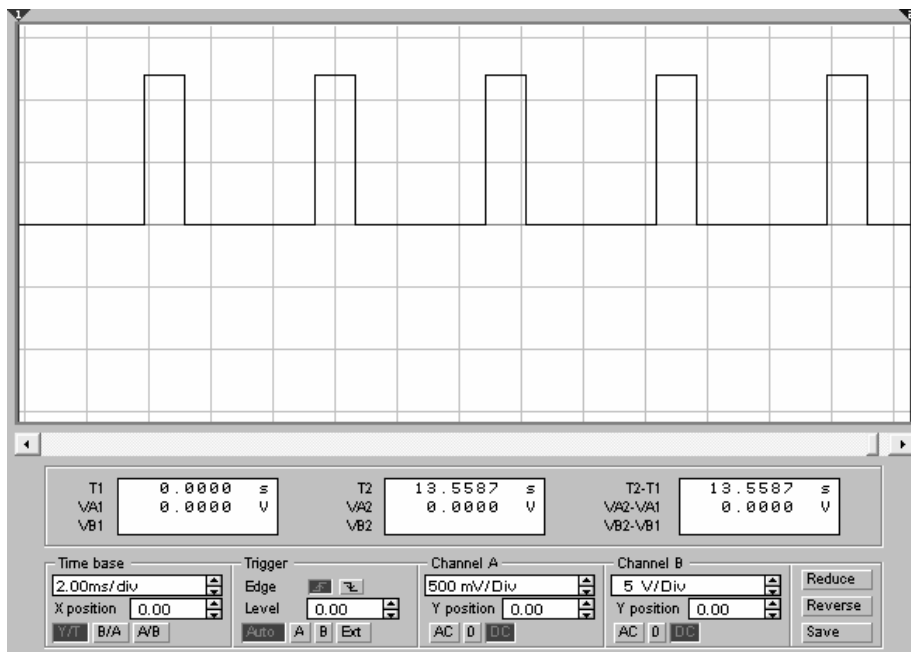


Рисунок 11

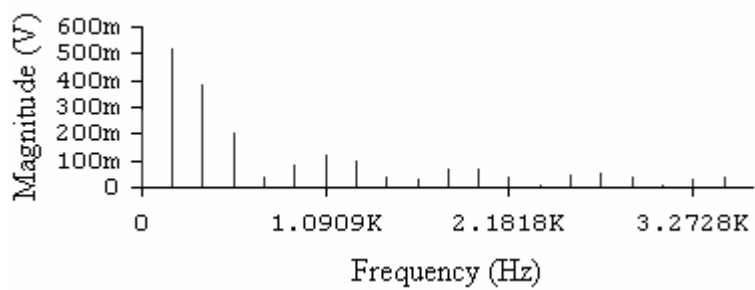


Рисунок 12

Расстояние между двумя ближайшими гармониками составляет

$$f_2 - f_1 = 363,64 - 181,82 = 181,82 \text{ Гц,}$$

то есть равно частоте первой гармоники (обратно периоду повторения импульсов).

Ширина основного лепестка спектра амплитуд примерно равна 727,28 Гц, а величина, обратная длительности импульса, соответственно равна

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{0,00132} \approx 757,6 \text{ Гц},$$

то есть ширина основного лепестка спектра амплитуд обратно пропорциональна длительности импульса.

Вид спектров сигналов при разных параметрах импульсной последовательности (при $T = 2T$, $\tau_{и} = \tau$ и $T = T$, $\tau_{и} = 2\tau$) показан на рисунках 13 и 14.

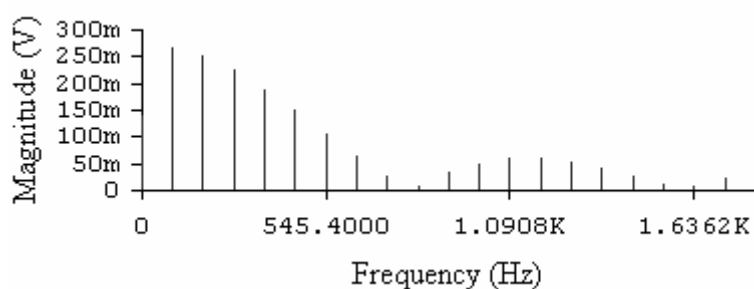


Рисунок 13

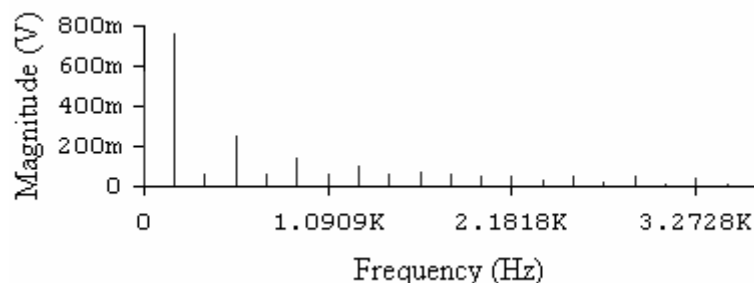


Рисунок 14

Выводы

1 Расстояние между двумя ближайшими гармониками в спектре амплитуд бесконечной последовательности прямоугольных импульсов обратно пропорционально периоду повторения импульсов, а ширина первого лепестка спектра – обратно пропорциональна длительности импульса.

2 Если длительность импульсов остается неизменной, а период их повторения увеличивается, то увеличивается число гармоник (линий) в спектре сигнала. При этом амплитуды одноименных гармоник уменьшаются. Если неизменным остается период повторения импульсов, а их длительности увеличиваются, то в спектре такого сигнала расстояние между отдельными гармониками не изменяется, а ширина основного лепестка – уменьшается. Одновременно увеличиваются амплитуды одноименных гармоник.