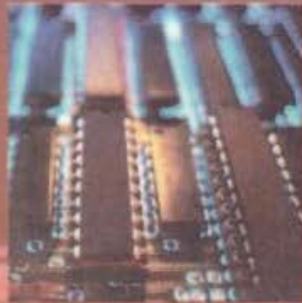


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Гоков А.М., Жидко Е.А.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.



УЧЕБНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Гоков А.М.
Жидко Е.А.**

**Практикум по курсу:
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Учебное пособие
Часть 1**

Харьков, Изд. ХНЭУ, 2006

ББК 31.2я7
Г59
УДК 621.3(075)

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор кафедры экспериментальной физики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина *Пойда В. П.*; докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры полупроводниковой и вакуумной электроники Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина *Аркуша Ю. В.*; канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики Харьковского национального университета радиоэлектроники *Лазоренко О. В.*

Рекомендовано к изданию решением ученого совета Харьковского национального экономического университета.

Протокол №3 от 28.11.2005 г.

Гоков А. М.

Г59 Практикум по учебной дисциплине "Основы электротехники и электроники. Элементы общей теории электротехники". Учебно-практическое пособие. Ч. 1 / А. М. Гоков, Е. А. Жидко. — Харьков: Изд. ХНЭУ, 2006. — 196 с. (Русск. яз.)

ISBN 966-676-146-7

Учебное пособие представляет собой практическую часть курса "Элементы общей теории электротехники". В нем в краткой форме приведены основные сведения из общей теории электротехники, фундаментальные идеи, термины и определения. Подробно описаны материалы, средства, способы и порядок выполнения практических занятий и лабораторных работ. На практических примерах широко и подробно изучаются входящие в электрическую цепь объекты. На основе применения общей теории рассматривается широкий круг характерных практических задач.

Рекомендовано для студентов, обучающихся по профилю компьютеризованных технологий и систем издательско-полиграфических производств, а также для изучающих одноименную дисциплину по другим профилям подготовки.

Навчальний посібник становить першу частину курсу "Елементи загальної теорії електротехніки". В ній коротко наведені основні відомості із загальної теорії електротехніки, фундаментальні ідеї, терміни і визначення. Докладно описані матеріали, засоби, способи і порядок виконання практичних занять та лабораторних робіт. На практичних прикладах широко і докладно вивчаються об'єкти, що входять в електричний ланцюг. На основі застосування загальної теорії розглядається широке коло характерних практичних задач.

Рекомендовано для студентів, які навчаються за профілем комп'ютеризованих технологій і систем видавничо-поліграфічних виробництв, а також для тих, хто вивчає дану дисципліну за іншими профілями підготовки.

ББК 31.2я7

ISBN 966-676-146-7

© Харьковский национальный
экономический университет, 2006

© Гоков А. М.
Жидко Е. А.
2006

Введение

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Основы электротехники и электроники», читаемого студентами, обучающимся по специальности 7.092704 «Комп'ютеризовані технології та системи видавничо-поліграфічних виробництв». Курс состоит из двух частей: «Элементы общей теории электротехники и электроники» и «Реализация изделий электротехники и электроники».

Учебное пособие представляет собой практическую часть курса «Элементы общей теории электротехники» и является продолжением и составной частью теоретического курса по этой теме, изложенного авторами в отдельном издании. В нем в краткой форме приведен основной теоретический материал по первой части курса “Элементы общей теории электротехники”. Подробно описаны темы, материалы, средства, способы и порядок выполнения практических занятий и лабораторных работ. На практических примерах широко и подробно изучаются входящие в электрическую цепь объекты. На основе применения общей теории спектральных представлений различных сигналов и вейвлет-преобразований сигналов рассматривается широкий круг характерных практических примеров. Особое внимание обращается на умение применять на практике вопросы теории.

Авторы при написании учебного пособия широко использовали современные компьютерные методы представления и анализа электрических сигналов и цепей: системы моделирования аппаратуры Matlab, Electronics Workbench и вейвлет-анализ.

С целью развития у студентов навыков самостоятельной работы и проверки теоретических знаний в конце описания каждого практического занятия и лабораторной работы приведены контрольные вопросы.

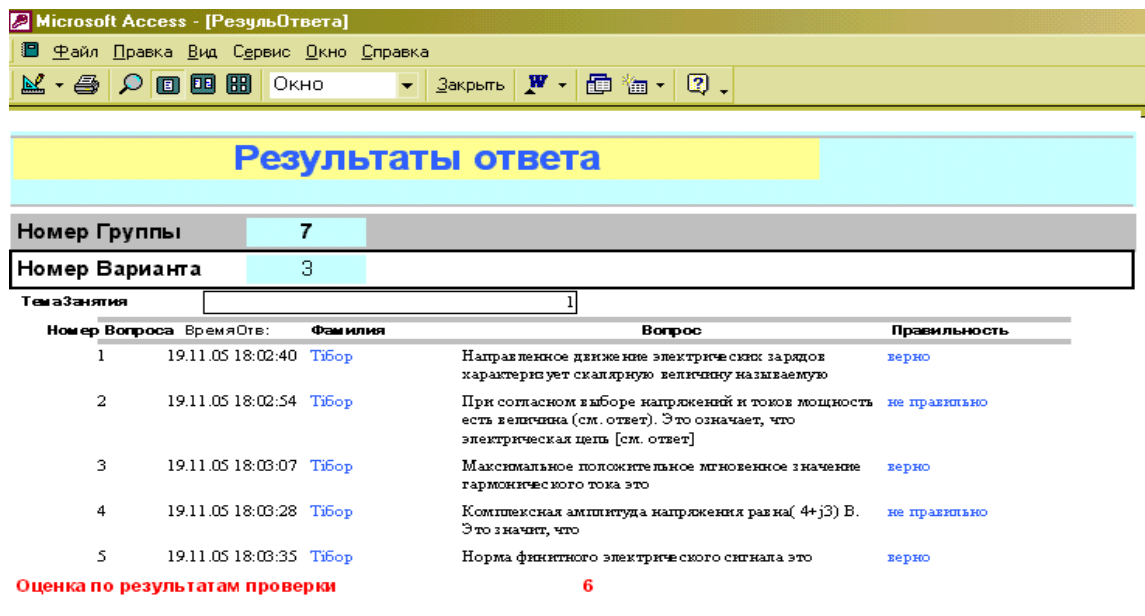
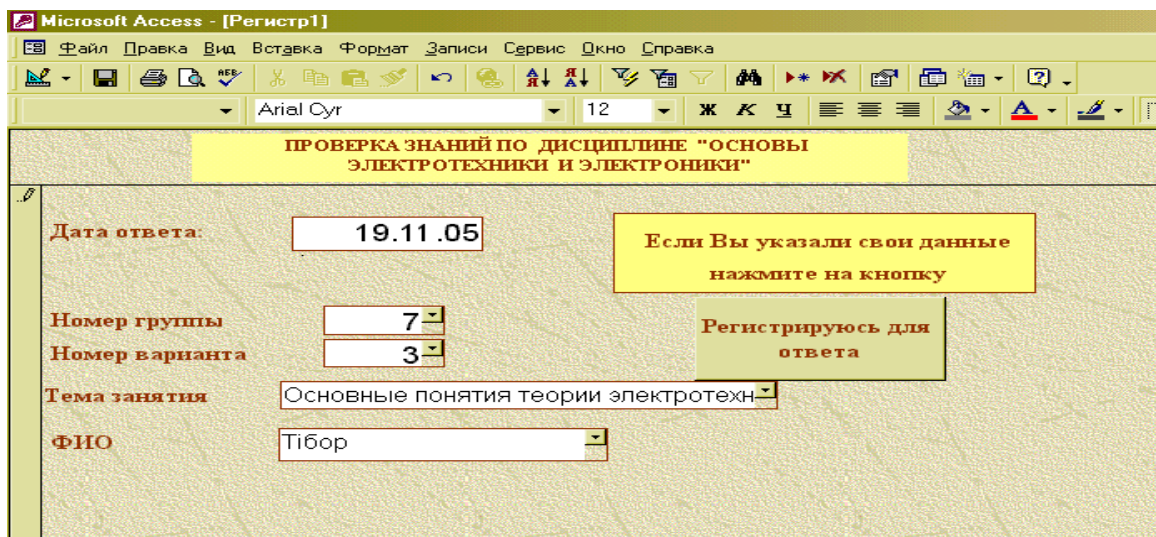
Особое внимание авторы уделили выполнению индивидуальных заданий по теме, которые приведены в каждом разделе.

Как и в теоретической части материал учебного пособия скомпонован таким образом, что каждый последующий раздел является логическим продолжением предыдущих. Материал курса изложен в соответствии с современными стандартами высшего образования в Украине.

В результате изучения данного курса студенты на практических примерах усвоят основные понятия, принципы функционирования, вы-

бора и практической реализации электрических устройств различного назначения, а также современные методы их анализа и расчета по заданным статистическим и динамическим параметрам.

Для оценки подготовки студента к выполнению лабораторной работы авторы для каждой лабораторной работы разработали на базе программы Microsoft Access программу проверки знаний. Примеры Microsoft Access-окон показаны на рисунках ниже:



Эта книга может быть полезна студентам, обучающимся по другим направлениям и специальностям и изучающим одноименную дисциплину по другим профилям подготовки.

Авторы благодарны сотрудникам кафедры физики и электроники Харьковского национального экономического университета (зав. кафедрой – кандидат технических наук, доцент О.И. Медведь) за оказанную помощь в улучшении содержания учебного пособия.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам – доктору технических наук, профессору кафедры экспериментальной физики Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина В.П. Пойде; доктору физико-математических наук, профессору кафедры полупроводниковой и вакуумной электроники Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина Ю.В. Аркуше; кандидату физико-математических наук, доценту кафедры физики Харьковского национального университета радиоэлектроники О.В. Лазоренко за внимательное прочтение рукописи и высказанные полезные замечания.

Тема 1. Основные понятия и определения электротехники

1.1. Практическое занятие № 1

Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов параметров электрических сигналов и визуализации полученных результатов

1.1.1. Общие сведения

Система MATLAB (MATrix LABoratory – матричная лаборатория), имеющая по сравнению с другими аналогичными математическими системами ряд достоинств, широко используется для решения многих задач электротехники и электроники. MATLAB может запускаться из главного меню операционной системы Windows с хорошо известным видом рабочего стола. Для ее запуска, необходимо дважды щелкнуть по специфической иконке с надписью. После запуска системы MATLAB на экране появится основное окно пользовательского интерфейса, показанное на рис. 1.1 в открытом виде. Оно содержит:

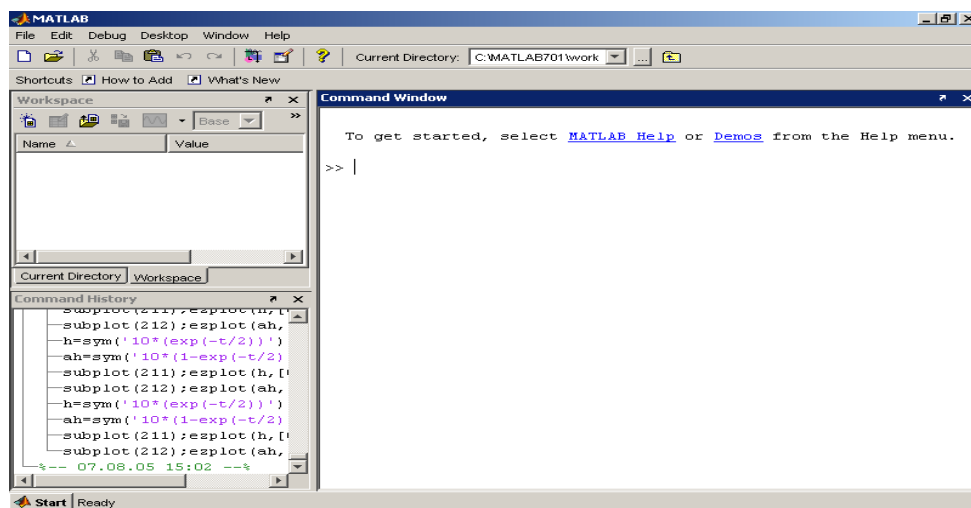


Рис. 1.1. Пример изображения «окна» MATLAB после загрузки

– в верхней части пользовательского интерфейса – панель инструментов с кнопками и раскрывающимися списками;

– в левой верхней части пользовательского интерфейса – окно с вкладками (Current Directory – Браузер файловой системы и Workspace – Браузер рабочей области). Последний служит для просмотра ресурсов рабочей области. Он показывает названия используемых переменных, их размерность и т.д. Для вызова списка используемых переменных необходимо в командном окне набрать who или, если требуется более подробная информация, – whos;

– в левой нижней части пользовательского интерфейса – окно с вкладками COMAND HISTORI и CURENT DIRECTORY. Окно COMAND HISTORI используется для вызова ранее введенных команд;

– в правой части пользовательского интерфейса располагается так называемое командное окно, в котором проводятся все вычисления. Если в командном окне появился значок >>, то система готова к проведению вычислений.

1.1.2. Ввод исходных данных при проведение прямых вычислений

Система MATLAB может функционировать в различных режимах. Один из них – проведение прямых вычислений с использованием командного окна.

Режим прямых вычислений характеризуется тем, что в нем не требуется предварительно готовить специальные программы на каком – нибудь языке программирования. Работа в этом случае носит диалоговый характер и происходит по принципу «задал вопрос, получил ответ». Этот режим превращает систему MATLAB в некий необычайно мощный калькулятор.

Для указания того, что вы приглашаетесь для ввода исходной информации в режиме прямых вычислений, служит символ >> в командном окне.

При работе необходимо иметь в виду следующее.

Данные вводятся путем набора на клавиатуре определенных символов. При этом обязательно используются малые строчные буквы (английские символы нижнего регистра). Ввод выражений для вычислений осуществляется в самом обычном текстовом формате. В этом же формате выдаются результаты вычислений, за исключением графических.

После ввода необходимой информации для получения ответа нажимается клавиша ENTER. Ответ появляется после символа «ans=».

Если после введенного выражения или функции поставить символ «;» (точку с запятой), то ответ на экран выводиться не будет.

Если вводятся команды, располагающиеся в нескольких строках, то для перехода к очередной строке надо (до ввода последней строки) одновременно нажать клавиши ENTER+SHIFT.

Команды (многострочную группу выражений) можно копировать либо из командного окна, либо из окна COMAND HISTORI. Для этого требуемые операторы помечают (выделяют), затем, обычным образом копируют и вставляют в нужную позицию командного окна. Выделение многострочной группы выражений в окне COMAND HISTORI следует сопровождать удержанием клавиши CTRL.

Важной особенностью системы MATLAB является то, что она требует представления данных либо в виде чисел, либо в виде массивов: вектор-строк; вектор-столбцов; матриц.

Числа, которые вводятся, могут быть действительными или комплексными. При этом могут использоваться различные форматы их представления. Ниже приводятся примеры представления действительных чисел. Следует помнить, что целая часть числа отделяется от дробной точкой. Для отделения порядка числа от мантииссы используется символ e. Знак «минус» проставляется перед числом. Пробелы между символами в числах не допускаются. В качестве чисел могут использоваться встроенные константы, например, число π –pi. Например:

```
>> 0          >> -3          >> 0.000001      >> pi
ans =         ans =         ans =         ans =
    0          -3          1.0000e-006    3.1416
>> 2          >> 2.2456       >> 123.456e-6
ans =         ans =         ans =
    2          2.2456       1.2346e-004
```

Комплексные числа, имеющие в своем составе действительную и мнимую часть, указываются двумя числами (значениями действительной и мнимой части) и множителем i, j , означающим квадратный корень из минус единицы.

```
>> 3i
ans =
```

```
0 + 3.0000i
```

```
>> 2+3i
```

```
ans =
```

```
2.0000 + 3.0000i
```

Ввод вектор-строки осуществляется в квадратных скобках следующим образом

```
>> s1=[1 2 3 4 5 6]
```

```
s1 =
```

```
1 2 3 4 5 6
```

Ввод вектор-столбца также осуществляется в квадратных скобках, но с разделением элементов точкой с запятой

```
>> s2=[1;2;3;4]
```

```
s2 =
```

```
1
```

```
2
```

```
3
```

```
4
```

Переход от вектор-столбца к вектор-строке осуществляется операцией *транспонирования*. Для этого после квадратной скобки ставится символ «'»

```
>> s3=[1;2;3;4]'
```

```
s3 =
```

```
1 2 3 4
```

```
>> s4=s2'
```

```
s4 =
```

```
1 2 3 4
```

Матрицу представляют вектор – столбцом из элементов, каждый из которых является вектор – строкой. Строки при наборе отделяются точкой с запятой. Ниже приведены матрицы размерностью два на четыре и квадратной матрицы три на три.

```
>> m=[1 2 3 4;5 6 7 8]
```

```
m =
```

```
1 2 3 4
```

```
5 6 7 8
```

```
>> m1=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
```

```
m1 =
```

1	2	3
4	5	6
7	8	9

1.1.3. Решение простейших задач с напряжениями и токами, неизменными во времени

Задача 1. На элементе электрической цепи с помощью вольтметра и амперметра были измерены напряжение и ток. Рассчитать величину сопротивления элемента, если $U = 20$ В, $I = 5$ А.

Решение:

$$u1=20;$$

$$i1=5;$$

$$r1=u1/i1$$

$$r1 =$$

4

Задача 2. В течение 6 дней фиксировались напряжение и ток на элементе. Определить, оставалось ли неизменным электрическое сопротивление элемента, если в эти дни значения напряжений в вольтах – 8; 8,3; 5; 6; 8; 5,3, а тока в амперах – 4; 4,1; 2,451; 3; 2,04; 2,465.

Решение:

присвоим значения исходных данных переменным U1, I1 в виде вектор-строк и рассчитаем величину сопротивления элемента.

$$u2=[8 \ 8.3 \ 5 \ 6 \ 8 \ 5.3];$$

$$i2=[4 \ 4.1 \ 2.451 \ 3 \ 2.04 \ 2.456];$$

$$r2=u2./i2$$

$$r2 =$$

2.0000 2.0244 2.0400 2.0000 3.9216 2.1580

Очевидно, что сопротивление элемента в эти дни изменялось.

Следует обратить внимание на точку поставленную перед знаком “/” деления. Если она отсутствует, то почленное деление элементов векторов выполняться не будет.

1.1.4. Решение задач с напряжениями и токами, изменяющимися во времени по гармоническому закону

При использовании символического метода комплексных амплитуд токи и напряжения представляются в виде комплексных чисел. Из курса математики известно, что любое комплексное число A можно представить:

а) в *алгебраической форме*, т.е. состоящим из действительной и мнимой части

$$\vec{A} = \dot{A} = \operatorname{Re}(\vec{A}) + j \operatorname{Im}(\vec{A}).$$

б) в *тригонометрической форме*

$$\vec{A} = \dot{A} = A(\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

в) в *показательной форме*, т. е. состоящим из модуля и оператора поворота

$$\vec{A} = \dot{A} = R_{\text{mod}} e^{j\varphi}.$$

Угол φ называют аргументом комплексного числа. Умножение любого комплексного числа на множитель $e^{j\beta}$ приводит к изменению аргумента на угол β и повороту вектора, соответствующего этому числу, на тот же угол.

Для описания гармонических сигналов используют представления в виде косинусоидальных функций. Например, косинусоидальное напряжение можно записать в виде

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_U).$$

При этом важно помнить следующее.

Выражение в скобках $\theta = (\omega t + \psi_U)$ – *текущая фаза* – представляет собой угол поворота вектора и может измеряться как в радианах, так и градусах.

При теоретическом анализе всегда предполагается, что текущая фаза измеряется в радианах (рад). При этом единицей измерения угловой частоты является рад/сек.

Однако текущую фазу, а особенно начальную, измеряют и в градусах и в долях π . Поэтому напомним формулы перехода от градусов к радианам и обратно

$$\beta_{\text{РАД}} = \frac{\pi}{180} \beta_{\text{ГРАД}}, \quad (1.1)$$

$$\beta_{\text{ГРАД}} = \frac{180}{\pi} \beta_{\text{РАД}}. \quad (1.2)$$

Иногда удобно выражать начальную фазу в радианах как долю π , т.е. в виде произведения коэффициента k и π . В этом случае

$$k = \frac{\beta_{РАД}}{\pi}. \quad (1.3)$$

Для графического изображения комплексного числа используется векторная диаграмма, на которой число представляется в виде вектора в прямоугольной системе координат, одна из осей которой называется осью вещественных, а другая – осью мнимых.

В электротехнике приходится оперировать токами и напряжениями, заданными различными формами представления. При сложении более удобна алгебраическая форма, при умножении – показательная. Получить представление о временной зависимости лучше всего, когда токи и напряжения представлены графиками зависимости мгновенных значений от времени. По этой причине большая группа задач электротехники связана с переходом от одной формы представления комплексного числа к другой и с визуализацией полученных данных.

Для работы с комплексными числами в MATLAB предусмотрены *встроенные функции*.

Функция REAL(Z) определяет в комплексном числе Z действительную часть (говорят – возвращает действительную часть комплексного числа Z). Функция IMAG(Z) – возвращает мнимую часть Z. Функция ANGLE(Z) возвращает аргумент комплексного числа Z, а ABS(Z) – модуль Z.

Графическую визуализацию комплексного числа, т.е. представление его на комплексной плоскости в виде стрелки, исходящей из начала координат, имеющей длину и угол наклона, позволяет проводить функция COMPASS (Z).

Рассмотрим примеры типичных задач.

Задача 3. (Переход от временной зависимости к алгебраической форме представления комплексного числа).

Ток в цепи изменяется по косинусоидальному закону $i_1(t) = 10 \cos(\omega t + \pi/3)$. Найти комплексную амплитуду, представленную в алгебраической форме. Изобразить ее в виде вектора на векторной диаграмме

Решение:

вводим в командное окно информацию об амплитуде i_{m1} и начальной фазе тока ϕ :

```
phi=pi/3;  
im1=10;
```

Вычисляем комплексную амплитуду тока в алгебраической форме:

```
ia1=im1*(cos(phi)+i*sin(phi))  
ia1 =  
5.0000 + 8.6603i
```

Проведем проверку, вычислив амплитуду и начальную фазу тока, представленного в алгебраическом виде

```
imp=abs(ia1)  
imp =  
10
```

Полученное значение совпадает с исходным 10 ампер.

```
>> phi_p=angle(ia1)  
phi_p =  
1.0472
```

Полученное значение совпадает с исходным $\pi/3$.

Переход от известной амплитуды и начальной фазы (от показательной формы записи) к алгебраической можно также осуществить воспользовавшись операторами:

```
phi=pi/3;  
im1=10;  
i1=im1.*exp(i*phi)  
i1 =  
5.0000 + 8.6603i
```

Строим вектор, соответствующий комплексной амплитуде тока, используя функцию `compass(ia1)`. После нажатия клавиши ENTER получаем изображение вектора, показанное на рис. 1.2 (векторную диаграмму). На графике отображена разметка, позволяющая определить длину вектора, угол его поворота относительно оси вещественных, проекции вектора на ось вещественных и мнимых.

Напомним, что за *положительное направление отсчета углов на векторной диаграмме* принято направление против часовой стрелки.

Задача 4. Условие задачи соответствует задаче 3, однако $i_2(t) = 10\sin(\omega t + 70^\circ)$.

Решение:

Здесь синусоидальная зависимость, поэтому надо вначале осуществить переход к косинусоидальному представлению тока. Известно из математики для этого к аргументу надо добавить $\pi/2$ (90°). Тогда $i(t) = 10\sin(\omega t + 70^\circ) = 10\cos(\omega t + 70^\circ + 90^\circ) = 10\cos(\omega t + 160^\circ)$.

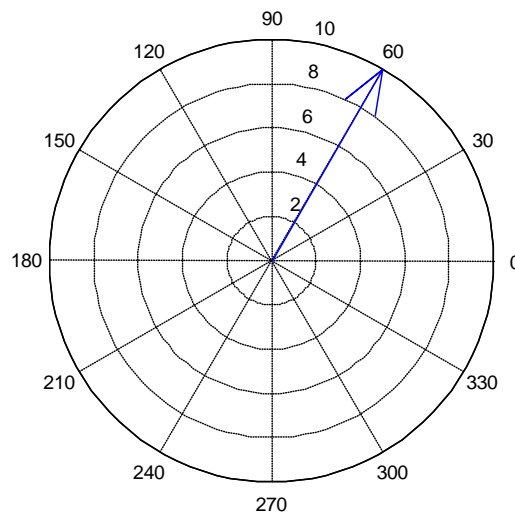


Рис. 1.2. Векторная диаграмма комплексной амплитуды тока, представленного временной зависимостью $i_1(t) = 10\cos(\omega t + \pi/3)$

Кроме того, начальная фаза тока представлена в градусах, поэтому далее необходимо осуществить переход от градусов к радианам используя выражение (1.1).

Вводим в командное окно информацию об амплитуде $im1$, начальной фазе тока $phigrad$ и осуществляем перевод последней в радианы

```
phigrad=70;
```

```
phirad=pi/180*(phigrad+90);
```

```
phi=phirad;
```

```
im1=10;
```

Вычисляем комплексную амплитуду тока в алгебраической форме $ia2=im1*(\cos(phi)+i*\sin(phi))$

Строим вектор, соответствующий комплексной амплитуде тока

```
compass(ia2)
```

```
ia2 =
```

```
-9.3969 + 3.4202i
```

После нажатия клавиши ENTER получаем изображение вектора, показанное на рис. 1.3.

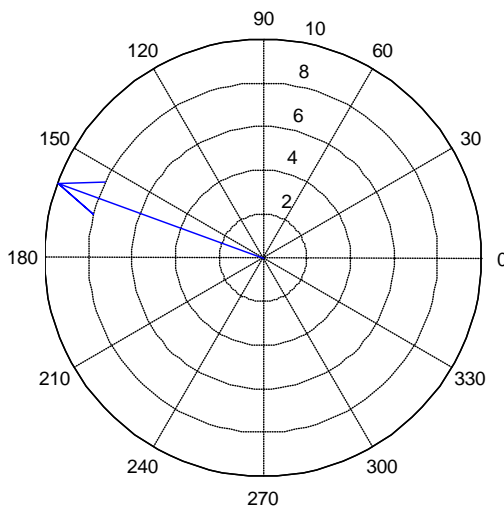


Рис. 1.3. Векторная диаграмма комплексной амплитуды тока, представленного временной зависимостью $i_2(t) = 10 \sin(\omega t + 70^\circ)$.

Задача 5. (Переход от алгебраической формы записи к амплитуде и начальной фазе – к показательной форме).

Известно напряжение на элементе $\dot{U} = -10 + j15$. Определить амплитуду и начальную фазу напряжения

Решение:

вводим в командное окно информацию о напряжении, строим вектор комплексной амплитуды напряжения и определяем искомые параметры. Так как начальная фаза напряжения при вычислениях будет получена в радианах, то для удобства восприятия следует осуществить переход от угла в радианах к углу в градусах. Для этой цели используют формулу (1.2)

```
u1=-10+i*15;
```

```
um1=abs(u1)
```

```
psiurad=angle(u1)
```


psiugrad=(180/pi)*psiurad

compass(u1)

Результаты вычислений:

um1 =

18.0278

psiurad =

2.1588

psiugrad =

123.6901

Вектор комплексной амплитуды напряжения показан на рис. 1.4.

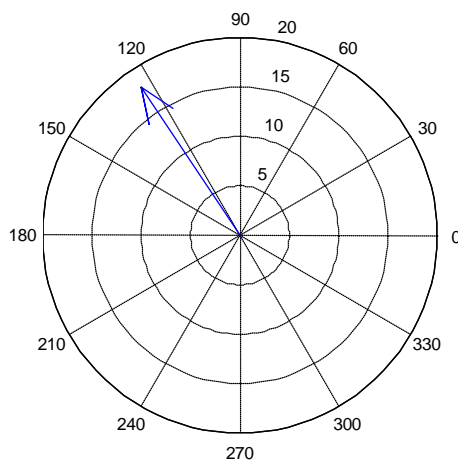


Рис. 1.4. Векторная диаграмма комплексной амплитуды напряжения, представленной в алгебраической форме

Задача 6. Определить амплитуду и начальную фазу тока на элементе, имеющем сопротивление $Z_1 = 0.6 + j0.8$, если известно, что напряжение на нем равно $\dot{U} = 5e^{j36^\circ}$.

Решение:

Предварительно преобразовав начальную фазу напряжения в радианы, вводим информацию о напряжении

psigrad2=36;

psirad2=pi/180*(psigrad2);

psiu2=psirad2;

u2=5.*exp(i*psiu2)

Для контроля правильности вводимых данных определяем модуль и начальную фазу напряжения на элементе

```
u2m=abs(u2)
```

```
psiurad2=angle(u2);
```

```
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2
```

Вводим значения сопротивления элемента

```
z2=0.6+i*0.8;
```

Определяем комплексную амплитуду тока на элементе, ее модуль и аргумент в градусах

```
iz2=u2./z2
```

```
iz2m=abs(iz2)
```

```
psiirad2=angle(iz2)
```

```
psiigrad2=(180/pi)*psiirad2
```

Для построения двух векторов на одной векторной диаграмме сформируем один комплексный вектор-строку.

```
zvis=[u2,iz2]
```

После этого строим векторную диаграмму, на которой одновременно представлены вектора комплексных амплитуд тока и напряжения

```
compass(zvis)
```

После нажатия клавиши ENTER получаем информацию о параметрах напряжения и тока, а также изображение комплексных амплитуд тока и напряжения в виде комплексных векторов, показанное на рис.1.5.

```
u2 =
```

```
4.0451 + 2.9389i
```

```
u2m =
```

```
5
```

```
psiugrad2 =
```

```
36
```

```
iz2 =
```

```
4.7782 - 1.4727i
```

```
iz2m =
```

```
5
```

```
psiigrad2 =
```

```
-17.1301
```

```
zvis =
```

```
4.0451 + 2.9389i 4.7782 - 1.4727i
```

Задача 7. Условие задачи соответствует задаче 6, однако требуется еще определить сдвиг фаз между напряжением и током на элементе.

Решение:

для решения задачи копируем предыдущие операторы и дополняем их выражением, вычисляющим сдвиг фаз

$$\text{phi2grad}=\text{psiugrad2}-\text{psiigrad2}$$

Общая последовательность операторов, вводимых в командное окно, будет иметь вид

```
psigrad2=36;
psirad2=pi/180*(psigrad2);
psiu2=psirad2;
u2=5.*exp(i*psiu2)
u2m=abs(u2)
psiurad2=angle(u2);
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2
z2=0.6+i*0.8;
iz2=u2./z2
iz2m=abs(iz2)
psiirad2=angle(iz2);
psiigrad2=(180/pi)*psiirad2
zvis=[u2,iz2]
compass(zvis)
phi2grad=psiugrad2-psiigrad2
```

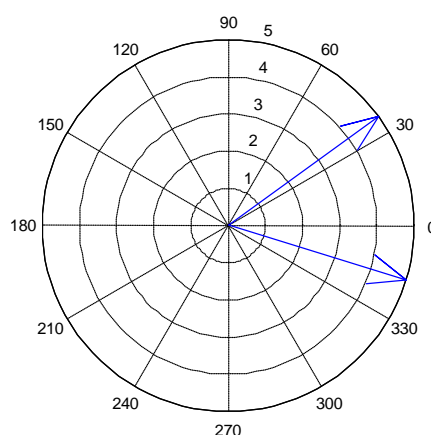


Рис. 1.5. Векторная диаграмма комплексных амплитуд тока и напряжения $\dot{U} = 5e^{j36^\circ}$ на элементе с сопротивлением $Z_1 = 0.6 + j0.8$

После нажатия клавиши ENTER в дополнение к имеющейся информации получаем

phi2grad =
53.1301

Как видно из векторной диаграммы и как следует из расчета (угол сдвига фаз напряжения относительно тока есть величина положительная), напряжение опережает ток на угол примерно 53 градуса.

1.1.5. Построение временных диаграмм токов, напряжений, ЭДС, изменяющихся во времени по гармоническому закону

В электротехнике и электронике очень часто гармонические сигналы изображают в прямоугольной системе координат в виде зависимости мгновенных значений напряжения (тока, ЭДС) от аргумента (в виде временной диаграммы).

Как показано в п.1.1.4, в какой бы форме записи не был представлен гармонический сигнал для него всегда можно получить амплитуду и начальную фазу. А, следовательно, для него всегда можно записать выражение для мгновенных значений. Например, для напряжения, изменяющегося по косинусоидальному закону можно записать $u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_U)$. При этом, как уже отмечалось, запись начальной фазы может быть произведена в трех формах: в радианах; в градусах; в долях π .

То есть решение задачи построения временных диаграмм токов, напряжений, ЭДС, изменяющихся во времени по гармоническому закону, в конце концов сводится к построению графика функции вида $u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_U)$.

В зависимости оттого, что взято в качестве аргумента, временные диаграммы можно строить в двух системах координат:

1. «Напряжение - время» $u = F(t)$ (т.е. когда по оси абсцисс откладывается время).

2. «Напряжение – угол» $u = F(\omega t)$ (т.е. когда по оси абсцисс откладывается угол в радианах, характеризующий поворот радиус-вектора).

В первом случае $u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_U) = U_m \cos(t + \psi_U/\omega)$ начальная фаза ψ_U/ω выражается в секундах. Во втором – в радианах.

Для первой системы координат необходимо располагать информацией либо об угловой частоте ω , либо о периоде сигнала T , либо о частоте сигнала f .

Поскольку MATLAB опирается на векторную систему представления сигналов, то следующим обязательным шагом на пути построения графика является создание вектор-строки, определяющей ось абсцисс.

Для создания массива равноотстоящих точек служит функция `Linspace(a,b,n)`. Эта функция генерирует n точек, равномерно распределенных на интервале от a до b .

В первой системе координат для получения оси абсцисс используют соотношения

$$\omega = 2\pi f, \omega = \frac{2\pi}{T}, a = -\frac{1}{\omega}(|\psi_{URAD}| + \frac{\pi}{2}), b = \frac{1}{\omega}(|\psi_{URAD}| + 1.5\pi). \quad (1.4)$$

Во второй системе координат для получения оси абсцисс используют соотношения

$$a = -(|\psi_{URAD}| + \frac{\pi}{2}), b = (|\psi_{URAD}| + 1.5\pi). \quad (1.5)$$

Для построения графика зависимости мгновенных значений напряжения от времени используется функция `PLOT(X,Y,S)`.

Значения X , являющиеся аргументом функции, берутся из вектора-строки элементов, представляющих ось абсцисс. В первой системе координат это будут значения времени.

Значения Y , являющиеся мгновенными значениями функции, берутся из вектора-строки элементов, представляющих ординаты.

С помощью константы S можно задавать (конкретизировать) тип линии графика.

Функция `GRID ON` позволяет добавлять сетку к текущему графику.

Для того, чтобы построить в одном окне несколько координатных осей с различными графиками без наложения их друг на друга используется функция `SUBPLOT(m,n,p)`. С помощью этой функции графиче-

ское окно разбивается на $m \times n$ подокон, при этом m – число подокон по горизонтали, n – число подокон по вертикали, p – номер подокна, в которое будет выводиться текущий график.

Задача 8. Комплексная амплитуда напряжения $\dot{U} = 10e^{-j\frac{\pi}{3}}$. Записать выражение для косинусоидального напряжения, изменяющегося с частотой $f = 50$ Гц и построить график зависимости мгновенных значений от времени.

Решение:

угловая частота напряжения $\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314 \text{ рад/сек}$. Выражение для косинусоидального напряжения тогда будет иметь вид

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_U) = 10 \cos(314t - \frac{\pi}{3}). \quad (1.6)$$

Вводим информацию о напряжении в командное окно:

```
f1=50;
w1=2*pi*f1;
psirad1=-pi/3;
a1=-1*(abs(psirad1)+pi/2)/w1;
b1=(abs(psirad1)+1.5*pi)/w1;
n=300;
t1=linspace(a1,b1,n);
umt1=10;
ut1=umt1*cos(w1*t1+psirad1);
plot(t1,ut1);grid on
xlabel('t, сек');
ylabel('u(t), В');
```

После нажатия клавиши ENTER получаем график зависимости мгновенных значений напряжения от времени, показанный на рис. 1.6.

Задача 9. Построить графики зависимости мгновенных значений напряжения $\dot{U} = 10e^{-j35^\circ}$ и тока от времени на элементе, имеющем сопротивление $Z_1 = 0.4 + j0.3$, если известно, что косинусоидальное напряжение, изменяется с частотой $f = 50$ Гц.

Решение:

Вводим информацию о напряжении в командное окно и проводим контроль введенных данных

```
psigrad2=-35;  
psirad2=pi/180*(psigrad2);  
psiu2=psirad2;  
u2=10.*exp(i*psiu2);  
u2m=abs(u2)  
psiurad2=angle(u2);  
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2
```

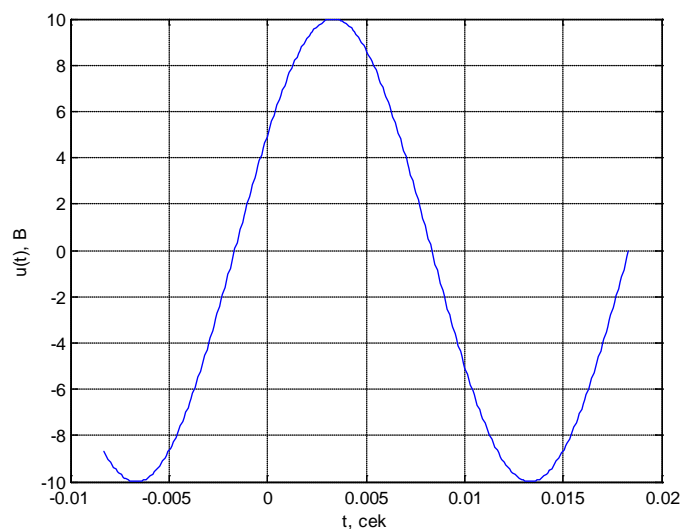


Рис. 1.6. График зависимости мгновенных значений напряжения от времени (временная диаграмма напряжения)

Вводим информацию о сопротивлении элемента в командное окно

```
z2=0.2+i*0.3;
```

Рассчитываем комплексную амплитуду тока и определяем ее модуль и аргумент

```
iz2=u2./z2;  
iz2m=abs(iz2)  
psiirad2=angle(iz2);  
psiigrad2=(180/pi)*psiirad2
```

Формируем массивы данных для построения графика напряжения

```
f1=50;  
w1=2*pi*f1;  
psirad1=-pi/3;
```

```

a1=-1*(abs(psiрад1)+pi/2)/w1;
b1=(abs(psiрад1)+1.5*pi)/w1;
n=300;
t1=linspace(a1,b1,n);
umt1=10;
ut1=umt1*cos(w1*t1+psirad1);

```

Формируем массивы данных для построения графика тока

```

psiradi2=psiirad2;
a2=-1*(abs(psiradi2)+pi/2)/w1;
b2=(abs(psiradi2)+1.5*pi)/w1;
n=300;
t2=linspace(a2,b2,n);
imt1=iz2m;
it1=imt1*cos(w1*t1+psiradi2);

```

Строим графики в едином окне

```

subplot(211);plot(t1,ut1);grid on
xlabel('t, сек');
ylabel('u(t), В');
subplot(212);plot(t2,it1);grid on
xlabel('t, сек');
ylabel('i(t), А');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики зависимостей мгновенных значений напряжения и тока от времени, показанные на рис.1.7.

Кроме того, получаем комплексные амплитуды и начальные фазы напряжения и тока

```

u2m =
    10
psiugrad2 =
   -35.0000
iz2m =
    27.7350
psiigrad2 =
   -91.3099

```

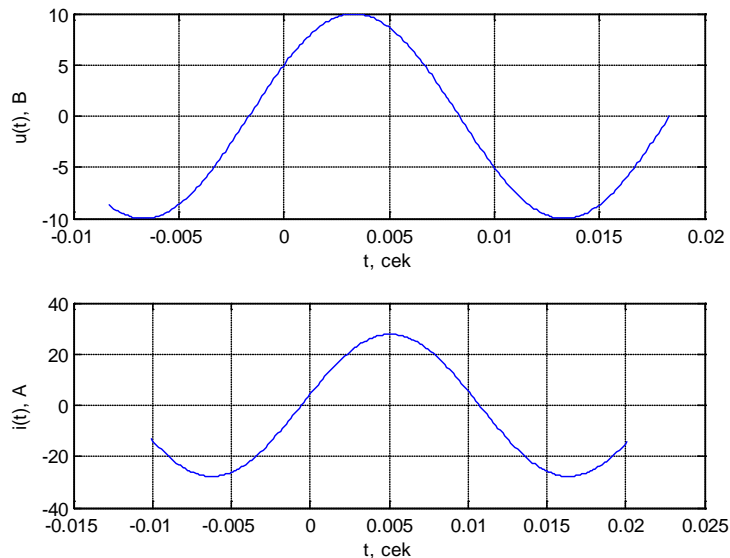



Рис. 1.7. Графики зависимостей мгновенных значений напряжения и тока от времени, построенные в едином окне

При построении графика в координатах «напряжение – угол» $u = F(\omega t)$ необходимо придерживаться следующих действий.

Первым обязательным шагом на пути построения графика является создание вектор-строки, определяющей ось абсцисс.

Для создания массива равноотстоящих точек служит функция $Linspace(a, b, n)$. Эта функция генерирует n точек, равномерно распределенных на интервале от a до b .

Для получения оси абсцисс используют соотношения

$$a = -(|\psi_{URAD}| + \frac{\pi}{2}), b = (|\psi_{URAD}| + 1.5\pi).$$

Для построения графика зависимости мгновенных значений напряжения от угла используется функция $PLOT(X, Y, S)$.

Задача 10. Комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_4 = 8\ell^{-j\frac{\pi}{3.14}}$. Построить график зависимости мгновенных значений косинусоидального напряжения от угла.

Решение:

Вводим информацию о напряжении в командное окно

```
psirad1=-pi/3.14;
```

```
a1=-1*(abs(psirad1)+pi/2);
```

```

b1=(abs(psiрад1)+1.5*pi);
n=300;
wt4=linspace(a1,b1,n);
umug4=8;
uug4=umug4*cos(wt4+psiрад1);
plot(wt4,uug4);grid on
xlabel('угол, рад');
ylabel('u(wt), В');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем график зависимости мгновенных значений напряжения от угла, показанный на рис. 1.8.

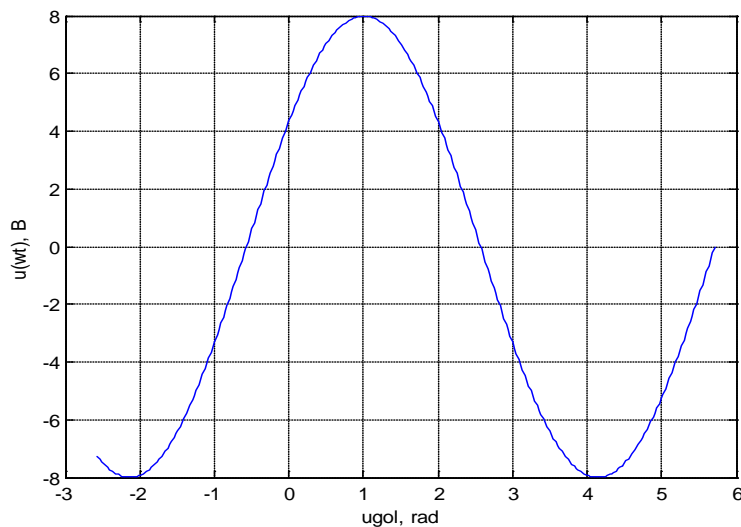


Рис. 1.8. График зависимости мгновенных значений напряжения

$$\dot{U}_4 = 8e^{-j\frac{\pi}{3.14}} \text{ от угла } \omega t.$$

1.1.6. Построение графиков импульсных сигналов

Задача 11. Построить на временном интервале от нуля до 1 сек, используя MATLAB, график трапециидального импульсного напряжения, показанного на рис. 1.9., параметры которого имеют следующие значения: амплитуда – 10 В; длительность фронта – 300 мс; длительность спада – 150 мс; длительность плоской части – 150 мс; импульс начинает формироваться по истечению 200 мс после начала отсчета.

Решение:

импульс напряжения представляет собой заданную на 5 временных интервалах функцию, составленную из отрезков прямых. Математически модель такого сигнала на временных интервалах, имеет вид

$$u(t) = \begin{cases} u_0(t) = u_4(t) = 0, & 0 \leq t < t_{NACH}, \quad t_{SP} \leq t < t_{KON} \\ u_1(t) = \frac{U_m(t - t_{NACH})}{t_F - t_{NACH}}, & t_{NACH} \leq t < t_F \\ u_2(t) = U_m, & t_F \leq t < t_B \\ u_3(t) = \frac{U_m(t - t_{SP})}{t_B - t_{SP}}, & t_B \leq t < t_{SP} \end{cases} \quad (1.7)$$

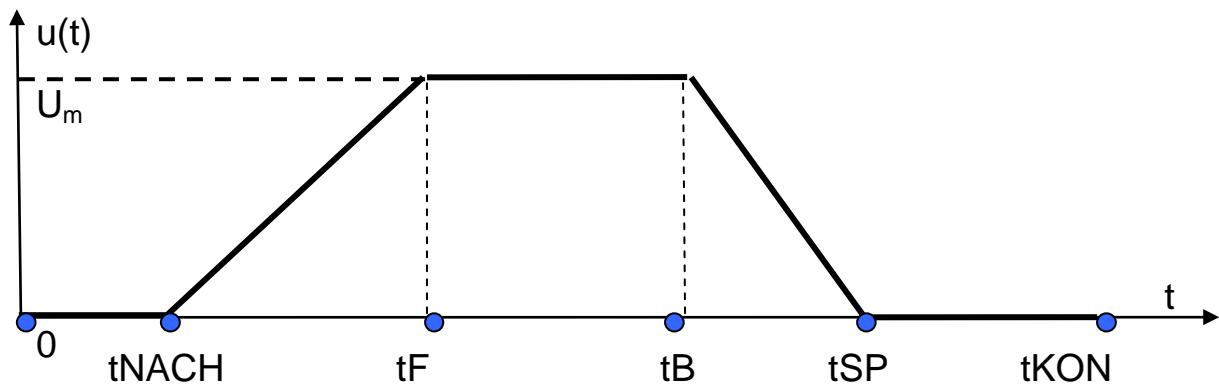


Рис. 1.9. График импульсного трапециидального сигнала

Для построения всего графика сформируем сигнал из отрезков прямых.

Поскольку MATLAB опирается на векторную систему представления сигналов, то первым обязательным шагом на пути построения графика является создание пяти вектор-строк, определяющих временные интервалы на всей оси абсцисс.

Для создания массива равноотстоящих точек служит функция `Linspace(a,b,n)`. Эта функция генерирует n точек, равномерно распределенных на интервале от a до b .

Будем считать, что вся ось абсцисс состоит из n точек. Тогда, пропорционально, каждый временной интервал должен состоять из следующего количества точек

$$n_0 = \frac{nt_{NACH}}{t_{KON}}, \quad n_1 = \frac{n(t_F - t_{NACH})}{t_{KON}}, \quad n_2 = \frac{n(t_B - t_F)}{t_{KON}}, \quad (1.8)$$

$$n_3 = \frac{n(t_{SP} - t_B)}{t_{KON}}, n_4 = \frac{n(t_{KON} - t_{SP})}{t_{KON}}. \quad (1.9)$$

Генерируем, используя функцию $Linspace(a,b,n)$, массивы (вектор-строки) $\{t_0, t_1, t_2, t_3, t_4\}$ равноотстоящих точек, представляющих абсциссы временных отрезков. Затем определяем вектор – строки ординат функции на временных отрезках $\{u_0, u_1, u_2, u_3, u_4\}$.

После этого объединяем значения абсцисс в одну вектор строку $t = [t_0 \ t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4]$, а ординат - в другую вектор строку $u = [u_0 \ u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]$ и строим график импульсного сигнала.

Вводим информацию о напряжении в командное окно

```

tnach=200e-3;
dlitfr=300e-3;
dlitsp=150e-3;
dlitWer=150e-3;
tf=tnach+dlitfr;
tb=tf+dlitWer;
tsp=tb+dlitsp;
tkon=1;
um=10;
n=1000;
n0=n*(tnach)/tkon;
n1=n*(tf-tnach)/tkon;
n2=n*(tb-tf)/tkon;
n3=n*(tsp-tb)/tkon;
n4=n*(tkon-tsp)/tkon;
t0=linspace(0, tnach,n0);
t1=linspace( tnach,tf,n1);
t2=linspace(tf, tb,n2);
t3=linspace(tb, tsp,n3);
t4=linspace(tsp, tkon,n4);
u0=0.*t0;
u1=um/(tf-tnach).*(t1-tnach);
u2=t2.*um./t2;
u3=um/(tb-tsp).*(t3-tsp);
u4=0.*t4;

```

```
t=[t0 t1 t2 t3 t4];  
u=[u0 u1 u2 u3 u4];  
plot(t,u);grid on  
xlabel('t, СЕК');  
ylabel('u(t), В');
```

После нажатия клавиши ENTER получаем график зависимости мгновенных значений напряжения от угла, показанный на рис.1.10.

Эту задачу можно решить иным способом. Другой, возможно более простой путь генерации массива значений вектор-строки импульсного напряжения, выражаемого ломанной линией, состоит в использовании команды линейной интерполяции $YOUT=interp1(X,Y,XIN)$. Функция $YOUT=interp1(X,Y,XIN)$ осуществляет интерполяцию функциональной зависимости $Y(X)$, заданной в точках аргумента X . Значения получаемой интерполированной функции $YOUT$ вычисляются в точках, заданных вектор-строкой XIN .

Вводим информацию о напряжении в командное окно

```
nn=1000;  
tnach=200e-3;  
dlitfr=300e-3;  
dlitsp=150e-3;  
dlitWer=150e-3;  
tf=tnach+dlitfr;  
tb=tf+dlitWer;  
tsp=tb+dlitsp;  
tkon=1;  
um=10;
```

Затем, задаем массив значений времени $t4$

```
t4=linspace(0, tkon,nn+1);
```

и вектор – строки, характеризующие узловые точки ломанной линии

```
ttpr1=[0 tnach tf tb tsp tkon];
```

```
upr1=[0 0 um um 0 0];
```

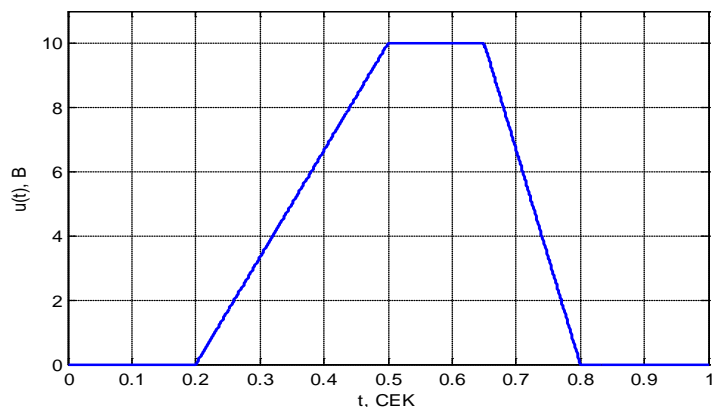


Рис. 1.10. Построенный первым способом график импульсного трапецидального напряжения.

После проведения интерполяции

```
up2=interp1(tpr1,upr1,t4);
```

удаляем лишние последние элементы обоих массивов

```
tnov=t4(1:end-1);
```

```
unov=up2(1:end-1);
```

и строим график

```
plot(tnov,unov);grid on
```

```
xlabel('t, СЕК');
```

```
ylabel('u(t), В');
```

После нажатия клавиши ENTER получаем график зависимости мгновенных значений напряжения от угла, показанный на рис. 1.11.

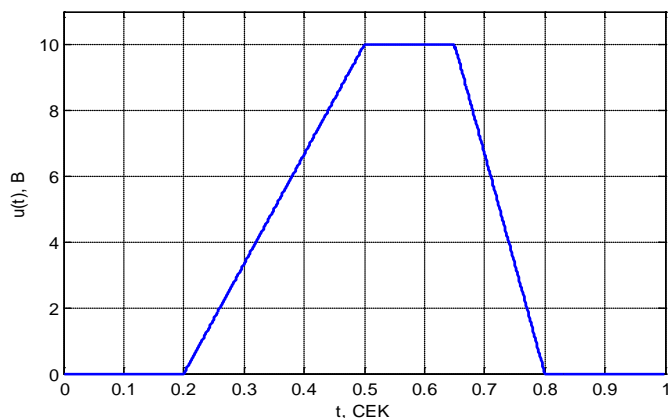


Рис. 1.11. Построенный вторым способом график импульсного трапецидального напряжения.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте режим *прямых вычислений* системы MATLAB.
2. Как осуществляются *ввод вектор-столбца* и *переход от вектор-столбца к вектор-строке*? Как представляют матрицу?
3. Приведите запись комплексного числа в алгебраической, тригонометрической и показательной формах.
4. Какие предусмотрены *встроенные функции* для работы с комплексными числами в MATLAB?
5. Какая функция позволяет выполнять *графическую визуализацию* комплексного числа, т.е. представление его на комплексной плоскости в виде стрелки, исходящей из начала координат, имеющей длину и угол наклона?
6. Что означает понятие – *векторная диаграмма*? Для чего она применяется?
7. В чем состоит решение задачи построения временных диаграмм токов, напряжений, ЭДС, изменяющихся во времени по гармоническому закону?
8. Какие системы координат используют для построения временных диаграмм?
9. Опишите последовательность действий при построении временных диаграмм в системе MATLAB. Приведите основные функции MATLAB, применяемые для выполнения этой задачи.
10. Опишите последовательность действий при построении графика в координатах «напряжение – угол». Приведите основные функции MATLAB, применяемые для выполнения этой задачи.
11. Запишите математическую модель трапециидального импульсного сигнала.
12. Для чего используется в системе MATLAB функция $Y_{OUT} = \text{interp1}(X, Y, X_{IN})$?

1.2. Лабораторная работа № 1

Измерение характеристик и параметров сигналов электрической цепи

1.2.1. Цели работы

1. Углубить и закрепить знания о понятиях, характеризующих электрическую цепь, о параметрах постоянных, а также изменяющихся во времени по гармоническому закону и импульсно, токов, напряжений.

2. Сформировать практические умения математической записи гармонических и импульсных сигналов, изображения их с помощью графиков и векторов, численной оценки и измерений с помощью контрольно-измерительной аппаратуры их параметров.

3. Выработать умения практической работы с моделирующей программой (программным эмулятором) ELECTRONICS WORKBENCH, необходимые для оценки характеристик неизменных, гармонически и импульсно изменяющихся во времени состояний электрической цепи.

1.2.2. Самостоятельная работа студентов

Перед выполнением лабораторной работы студенту необходимо:

1. Изучить теорию, которой пользуются в электротехнике для расчетов, характеристики и оценки токов, напряжений в электрических цепях, понятия, которыми характеризуют элементы и параметры электрической цепи

2. Провести самопроверку эффективности своей теоретической подготовки, ответив на вопросы, приведенные в разделе «Контрольные вопросы».

3. Изучить средства и способы проведения эксперимента, краткие описания измерительных приборов и методов измерений, используемых в работе. В результате исполнения этого пункта студент должен уметь объяснять порядок выполнения работы и то, какие результаты он ожидает получить.

4. Подготовить отчет о лабораторной работе.

В тетради изобразить принципиальные схемы экспериментов.

В тетради подготовить таблицы, в которые будут записываться данные, полученные в результате проведения экспериментов.

Подготовить оси координат графиков, необходимых для изображения исследуемых сигналов или осциллограмм.

Выполняя предыдущее надо помнить, что схемы, таблицы, результаты исследований помещаются в тетради отдельно по каждому пункту задания, желательно на отдельных страницах отчета.

5. Для заданного преподавателем варианта гармонического колебания, приведенного в виде формулы, записать его символическое изображение в виде комплексных амплитуд и комплексных действующих значений, изобразить полученную амплитуду на комплексной плоскости в виде вектора.

6. Для заданного преподавателем варианта гармонического колебания, приведенного в виде модуля и аргумента комплексной амплитуды колебания, записать закон изменения во времени самого колебания.

7. Для заданного преподавателем варианта гармонического колебания, приведенного в виде комплексного числа в показательной форме (т.е. модуля и аргумента), записать комплексную амплитуду в алгебраической форме.

8. Для заданного преподавателем варианта графика импульсного сигнала (осциллограммы) $u(t)$ и подварианта его параметров записать математическую модель сигнала, выраженную через временные отрезки (интервалы) и посредством сумм, которые составлены из произведений линейных функций и функций Хевисайда.

9. Для заданного преподавателем варианта импульсного сигнала $u(t)$, описываемого формулой, постройте график импульса (осциллограмму), определите его максимальное значение (амплитуду), а также момент достижения максимума. Построение графиков выполнить двумя способами, используя MATLAB.

1.2.3. Средства и способы проведения эксперимента

Лабораторная работа выполняется на IBM PC с использованием моделирующей элементы и устройства электрической цепи программы (программного эмулятора) ELECTRONICS WORKBENCH. Непосредственное выполнение работы, после открытия необходимого файла, осу-

ществляется с использованием выполненного в стандартной для WINDOWS манере пользовательского интерфейса в виде «окна» на экране. В нем изображаются исследуемая схема электрической цепи, контрольно-измерительные приборы, необходимые для проведения эксперимента, а также элементы управления посредством которых программе сообщаются команды на выполнение необходимых операций. Инициализация выполнения чего-нибудь полезного в моделирующей программе осуществляется с помощью клавиатуры и перемещением указателя мыши в необходимое место с последующим выбором и нажатием кнопок или пиктограмм. Контрольно-измерительные приборы по внешнему виду, органам управления и характеристикам максимально приближены к реально существующим и выпускаемым промышленным аналогам.

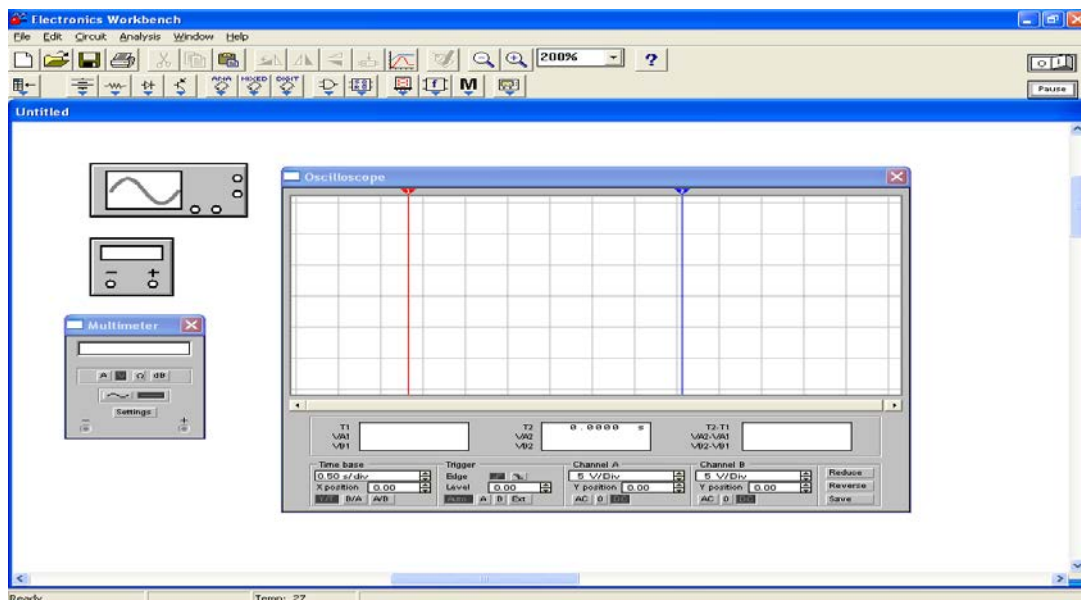


Рис. 1.12. Пример изображения «окна» Electronics Workbench с мультиметром и осциллографом

В этой лабораторной работе для проведения экспериментов используется *комбинированный измерительный прибор* или, сокращенно, *мультиметр* (Multimeter), позволяющий, в зависимости от выбранного режима работы, измерять напряжение, силу тока, сопротивление по постоянному току элемента электрической цепи и ослабление (затухание) электрического сигнала. Картинка пиктограммы прибора («иконка» прибора) и развернутое, более крупное его изображение, показаны на рис. 1.12. Для получения развернутого изображения прибора необходимо

навести указатель мыши на иконку прибора и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши.

На лицевой панели мультиметра расположено информационное табло (буквенно-цифровой дисплей), обеспечивающее визуальное отображение результатов измерений. Кнопки управления, выполненные в виде пиктограмм и расположенные посередине лицевой панели, позволяют выбрать измеряемую величину (А – ток, V – напряжение, Ω – сопротивление, db – ослабление) и вид измеряемого сигнала (постоянный, неизменный во времени или переменный, изменяющийся по гармоническому закону). После выбора режима и вида сигнала изображение соответствующих иконок становятся темнее. Мультиметр, настроенный на работу с переменными гармоническими сигналами, измеряет среднеквадратические значения тока и напряжения. Подключение прибора осуществляется при помощи двух клемм (зажимов), помеченных знаками «+» и «-».

Для визуального наблюдения электрических сигналов, определения их формы и измерения их электрических параметров используется *электронно-лучевой осциллограф* (Oscilloscope). Он преобразует зависимость $u(t)$ на его входных клеммах в пространственно распределенный по экрану световой сигнал. След луча на экране (траектория, описываемая лучом) фактически рисует график зависимости мгновенных значений напряжения (по вертикальной оси) от времени (по горизонтали). Часто используют термины: исследуемый сигнал подается на вход Y; развертка сигнала во времени осуществляется по оси X. Размер наблюдаемого на экране изображения задают выбором масштабов по осям Y и X. Картинка пиктограммы осциллографа («иконка» прибора) и развернутое, более крупное его изображение, показаны на рис. 1.12. Для получения развернутого изображения прибора необходимо навести указатель мыши на иконку прибора и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши.

Используемый в лабораторной работе осциллограф является двухканальным, т.е. он позволяет одновременно наблюдать два графика $u_A(t)$ и $u_B(t)$ у которых ось t является общей. Соответственно, осциллограф имеет два входа (для канала А и канала В). На иконке прибора клеммы для подачи сигналов в каналы (Channel A, B) относительно точки

нулевого потенциала (точки Ground, расположенной справа вверху лицевой панели осциллографа) расположены внизу панели.

Информационные дисплеи в нижней части осциллографа показывают масштабы по горизонтальной оси времени (Time Base) и вертикальной оси для каждого канала.

На экране осциллографа имеется масштабная сетка, позволяющая с помощью клеток рассчитывать величину амплитуды напряжения и длительности сигнала. В этом случае измерения параметров сводятся к геометрическим измерениям: определению размера (в клетках и их долях) и умножению результата на соответствующие масштабные коэффициенты.

Если навести указатель мыши на кнопку «Expand» и щелкнуть левой кнопкой мыши, то можно увеличить размеры экрана и развернуть в рабочее состояние лицевую панель осциллографа. В этом случае появляется возможность перемещения изображения по горизонтали с помощью изменения позиции бегунка на полосе прокрутки изображения (расположен под экраном). Для этого требуется с помощью мыши «захватить» бегунок и передвинуть его в такое положение, чтобы удобно было работать с изображением электрического сигнала. Кроме того, для облегчения процесса измерения значений параметров $u(t)$ можно, не прибегая к графическим расчетам, непосредственно отсчитывать величины напряжения и времени в точке $u_{p.m.}(t)$. Для этого у осциллографа имеются специальные визирные линейки синего и красного цвета, которые перемещаются за треугольные «ушки» в любое место экрана. Переместив указатель мыши на треугольное «ушко» и удерживая нажатой левую кнопку мыши, устанавливается требуемое мгновенное значение осциллограммы, как точка пересечения визирной линейки и графика. Расположенные под экраном цифровые дисплеи покажут значения параметров точки для каждого канала и для визирной линейки разного цвета ($VA1, VB1, VA2, VB2, T1, T2$ и т.п.).

При работе с осциллографом всегда требуется задавать режим, определяющий с сигналом какого вида предстоит работать. В режиме DC можно проводить измерения параметров сигналов как неизменных, так и меняющихся во времени. Этот режим часто называют режимом «открытого» входа. Режим AC предназначен только для наблюдения сигналов, меняющихся во времени. Сигналы постоянные, неизменные

во времени не отображаются, так как они блокируются и не поступают на вход осциллографа. Из-за этого такой режим называют «закрытого» входа.

При исследовании импульсных сигналов применяется *функциональный генератор* (Function Generator), позволяющий создавать на выходных клеммах различные сигналы: гармонические, импульсные прямоугольной и треугольной формы.

При проведении экспериментов в лабораторной работе используются *прямые и косвенные методы измерений*.

При *прямых измерениях* искомую величину непосредственно считывают с информационных табло приборов. Так будут измеряться параметры постоянного напряжения, амплитуды и пр..

Косвенное измерение характеризуется тем, что искомое значение измеряемой величины находят по известным зависимостям между величиной, которую требуется определить, и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

В электротехнике не всегда имеется возможность измерить какую-либо величину прямым методом, поэтому косвенные измерения получили широкое распространение.

В простейшем случае косвенным методом при наличии вольтметра всегда можно определить на известном сопротивлении величину проходящего через него тока. Для этой цели используют известное соотношение Ома

$$I = U / R_0 . \quad (1.10)$$

Следующий *пример*. Практически всегда измерительные приборы конструктивно выполнены таким образом, что они имеют несимметричный вход, состоящий из двух клемм. Одна клемма входа сигнальная (потенциальная), а вторая (корпусная). При этом предполагается, что обязательным образом корпусная клемма должна быть соединена с точкой нулевого потенциала (иногда говорят «с землей», так как последняя в физике всегда имеет потенциал равный нулю). Отсюда следует требование: чтобы получить достоверные измерения и обеспечить безопасность работы необходимо эксперимент строить таким образом, чтобы корпусные клеммы всех используемых приборов были соединены вме-

сте. А из этого вытекает, что нельзя измерить путем проведения прямых измерений напряжения на элементах электрической цепи, если у них ни один вывод не соединен с точкой нулевого потенциала. В частности, нельзя непосредственно подключать вольтметр для проведения измерений на верхнем сопротивлении схемы простейшего делителя напряжения (рис. 1.13), поскольку ни верхний ни нижний конец его не соединен с точкой нулевого потенциала. В таких случаях прибегают к косвенным измерениям, добиваясь соблюдения при проведении эксперимента основного принципа составления измерительных цепей.

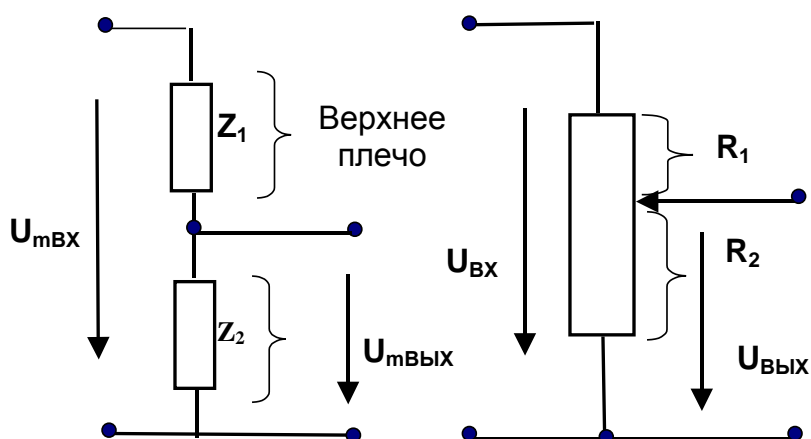


Рис.1.13. Простейший делитель напряжения и его реализация с помощью переменного резистора

Напряжение на верхнем резистора можно определить косвенным методом, если, используя прямой метод, измерить напряжение (потенциал) сначала верхнего, а затем, нижнего конца резистора. Разность этих напряжений(потенциалов) даст достоверную величину напряжения на верхнем резисторе.

Также к косвенным измерениям прибегают для определения комплексного сопротивления элемента электрической цепи.

Эквивалентная схема, поясняющая косвенный метод определения комплексного сопротивления элемента электрической цепи, показана на рис. 1.14.

Источник гармонической ЭДС нагружен на искомый элемент Z_x последовательно с которым включено известное (образцовое) сопротивление. Комплексное сопротивление нагрузки равно Z_0

$$Z_{\dot{y}} = Z_{\dot{o}} + R_0 = R_0 + \operatorname{Re}(Z_{\dot{o}}) + j \operatorname{Im}(Z_{\dot{o}}). \quad (1.11)$$

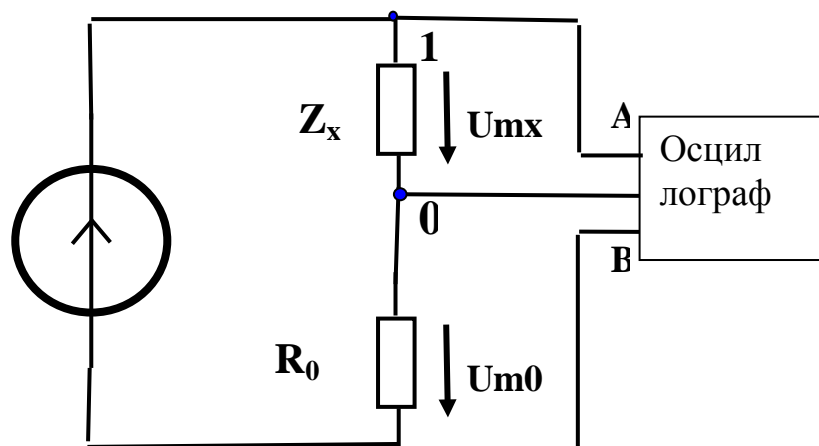


Рис. 1.14 Схема измерения комплексного сопротивления элемента Z_x

При условии, что $R_0 \ll \operatorname{Re}(Z_{\dot{o}})$, $Z_{\dot{y}} = \operatorname{Re}(Z_{\dot{o}}) + j \operatorname{Im}(Z_{\dot{o}}) = Z_{\dot{o}}$.

С другой стороны,

$$Z_{\dot{y}} = \frac{\dot{U}_{m1}}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}_{m1}}{\dot{U}_{m0}} R_0 = \frac{U_{m1}}{U_{m0}} R_0 e^{j(\psi_{U1} - \psi_{U0})}. \quad (1.12)$$

Сравнивая эти соотношения находим, что модуль искомого комплексного сопротивления определяется формулой

$$|Z_{\dot{o}}| = \tilde{z} = \frac{U_{m1}}{U_{m0}} R_0, \quad (1.13)$$

а его аргумент

$$\varphi_3 = \psi_{U1} - \psi_{U0}. \quad (1.14)$$

Таким образом, для определения комплексного сопротивления косвенным методом необходимо измерить осциллографом амплитуды напряжений (в каналах А и В) и сдвиг фаз между ними.

1.2.4. Порядок выполнения работы

Эксперимент 1. Измерение величины постоянного напряжения.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Открыть диалоговое окно программы «Electronics Workbench». При появлении сообщения «Could not open file» нажмите кнопку «ОК».

2. Откройте необходимый файл, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл Ir1-1.

3. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (Рис. 1.15). Она содержит источник, ЭДС которого остается неизменным во времени и два контрольно измерительных прибора: мультиметр, работающий в режиме вольтметра, и осциллограф.

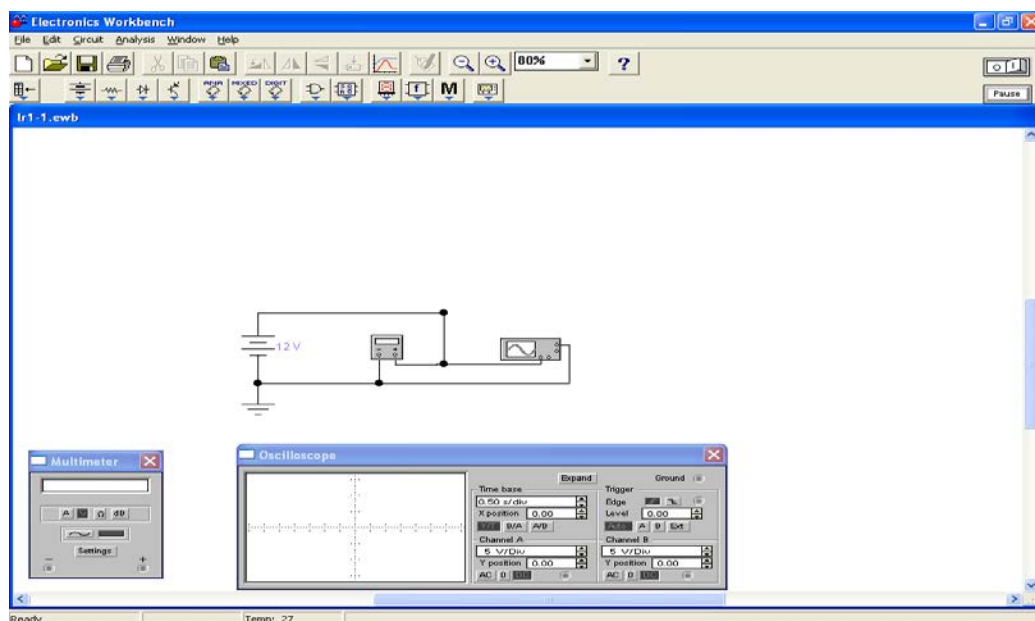


Рис. 1.15. Измерение постоянного напряжения

4. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Символы I/O проис-

ходят от английских слов Include (I) – включить и Output (O) – выход, выключить.

5. Наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу под выключателем I/O пиктограмму щелкнуть по иконке «Pause». Щелчок по этой кнопке переводит моделирующую программу в режим «Пауза».

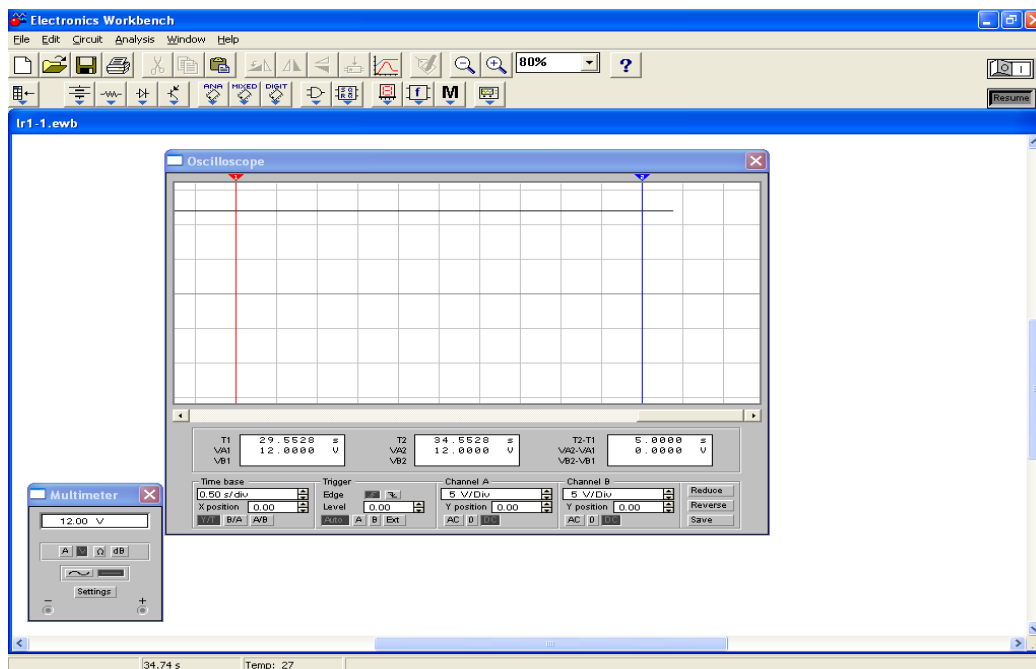


Рис. 1.16. Измерение напряжения осциллографом при помощи визуальных линеек

6. Произвести отсчет величины напряжения U_{01} , создаваемого источником ЭДС с дисплея мультиметра. Записать величину напряжения U_{01} в таблицу 1.1.

7. Измерить величину напряжения U_{02} с помощью осциллографа графическим методом. Щелкнуть по иконке «Pause» и вновь запустить моделирующую программу. Нажав кнопку «Expand» на лицевой панели осциллографа понаблюдать, как изображается (развертывается) осциллограмма постоянного напряжения. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по расположенной под выключателем I/O иконке «Pause» и получить осциллограмму примерно как на рис. 1.16. Для получения желаемой картинки щелкать по иконке «Pause» можно несколько раз.

Определив на сколько клеток (отсчет произвести с долями клетки) график напряжения отклонился вверх от оси времени, и, умножив это значение на масштаб по оси Y (Количество V/Div в канале A), определить величину напряжения U_{02} . Записать эту величину в таблицу 1.1.

8. Поместив указатель мыши на треугольные ушки визирных линеек осциллографа, произвести щелчок левой кнопкой и, удерживая нажатой левую кнопку, установить визирные линейки на края осциллограммы. Используя поля информационных дисплеев, помеченные надписями VA1, VB1, VA2, VB2, T1, T2, произвести отсчет амплитуды напряжения и времени в точках пересечения визирных линеек и осциллограмм. Результаты измерения t_1 , U_{03} , t_2 , U_{04} записать в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений

U_{01}	U_{02}	t_1	U_{03}	t_2	U_{04}

9. Сделать выводы об удобстве и точности измерения постоянного напряжения, создаваемого источником ЭДС, при использовании способов, описанных в пп. 6-8.

10. Перевести кнопку I/O в положение O.

Эксперимент 2. Измерение постоянного напряжения косвенным методом.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав необходимое в контекстном меню и нажав кнопку «ОК» открыть файл Iг1-2.

2. На экране монитора появиться схема установки для эксперимента (рис. 1.17). Она содержит источник, ЭДС которого остается неизменным во времени, простейший делитель напряжения на резисторах и два контрольно измерительных прибора: мультиметр, работающий в режиме вольтметра и идеализированный амперметр, обладающий нулевым внутренним сопротивлением. Верхний резистор делителя не соединен с точкой нулевого потенциала, поэтому измерить непосредственно на нем

напряжение вольтметром с несимметричным входом нельзя. Для определения напряжения на нем используется косвенный метод.

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Записать показания мультиметра (потенциал на верхнем конце резистора делителя относительно нулевой точки) φ_1 и амперметра в таблицу 1.2.

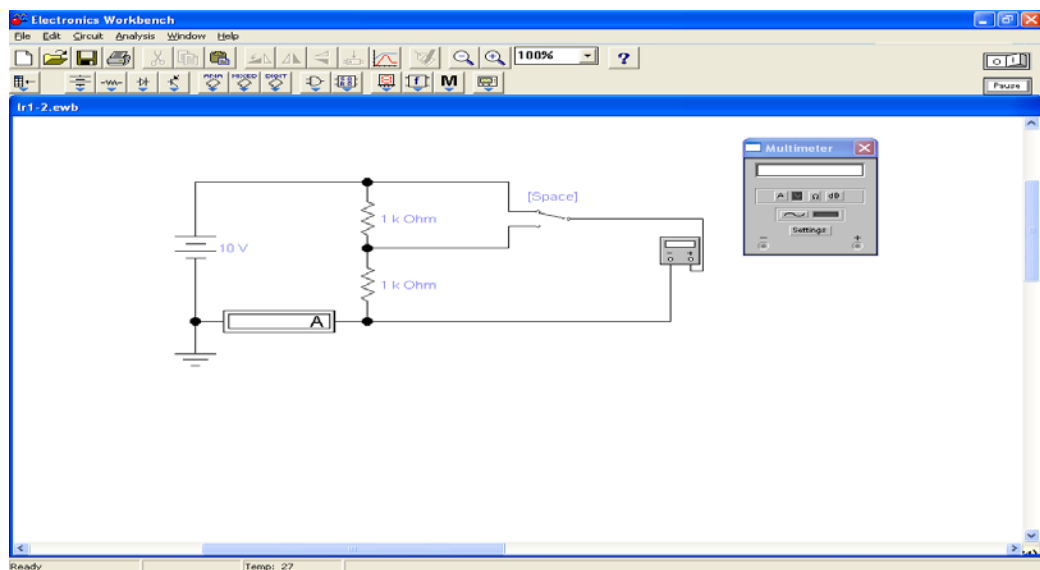


Рис. 1.17. Схема измерения напряжения на верхнем резисторе делителя напряжения косвенным методом

5. Нажав на клавиатуре клавишу «пробел» (Spase), подключить вольтметр к нижнему концу резистора. Произвести отсчет потенциала нижнего конца резистора φ_2 и записать его в таблицу 1.2. Убедиться в том, что на резисторе произошло «падение потенциала»

Таблица 1.2

Результаты измерений

φ_1	φ_2	$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$	I	I_R

6. Вычислить напряжение на верхнем резисторе делителя $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$, и ток, протекающий через него I_R , значения записать в таблицу 1.2.

7. Сделать выводы о точности измерения постоянного напряжения косвенным методом.

8. Перевести кнопку I/O в положение O.

Эксперимент 3. Измерение мощности источника косвенным методом.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл открыть», выбрав в контекстном меню, необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir1-3.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 1.18). Она содержит источник, ток которого остается неизменным во времени и мультиметр, работающий в режиме вольтметра.

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

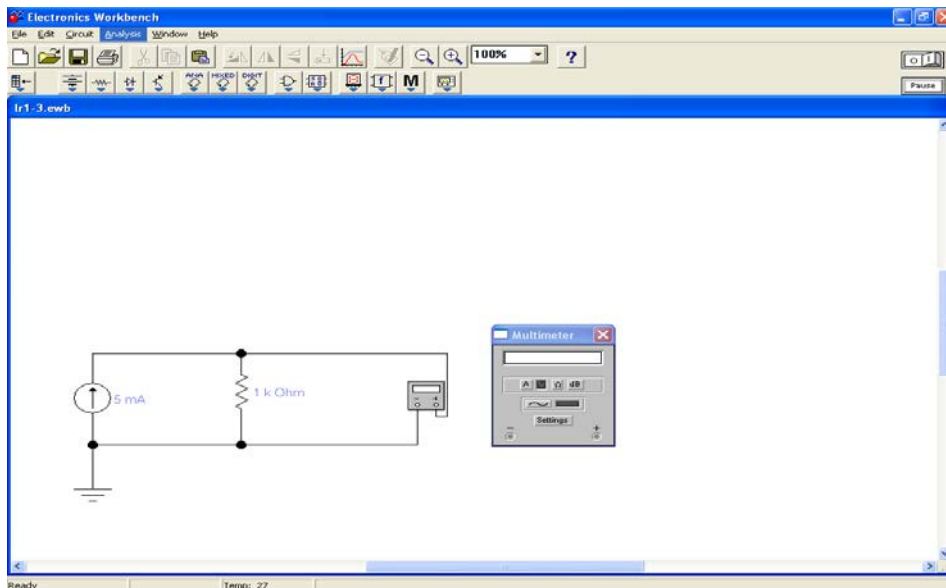


Рис. 1.18. Схема определения мощности источника

4. Записать в отчет показания мультиметра. Убедиться в том, что положительные направления тока и напряжения в источнике направлены встречно, что свидетельствует о том, что он отдает мощность в на-

грузку; в резисторе направления тока и напряжения совпадает, т.е. он потребляет энергию источника.

5. Вычислить мощность, отдаваемую источником в электрическую цепь и записать ее в отчет.

6. Сделать выводы о том, как соотносятся между собой отдаваемая и принимаемые мощности.

7. Перевести кнопку I/O в положение O.

Эксперимент 4. Измерение параметров гармонического напряжения

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir1-4.

2. На экране монитора появиться схема установки для эксперимента (рис. 1.19). Она содержит источник переменного напряжения, мультиметр, работающий в режиме вольтметра и осциллограф.

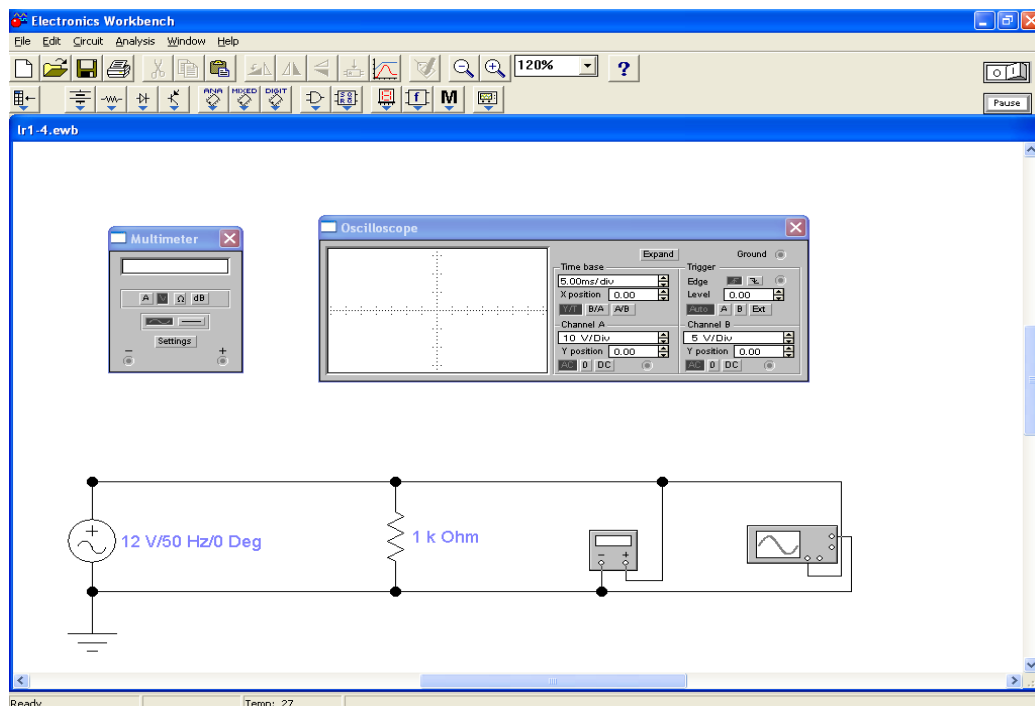


Рис. 1.19. Схема установки для определения параметров гармонического напряжения

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Нажав кнопку «Expand» понаблюдать, как изображается (развертывается) осциллограмма переменного напряжения.

4. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по расположенной под выключателем I/O иконке «Pause» и получить осциллограмму примерно как на рис. 1.20. Для получения желаемой картинки эту операцию можно проделать несколько раз.

5. Используя визирные линейки измерить с помощью осциллографа амплитуду (рис. 1.20). и период гармонического напряжения .Результаты записать в таблицу 1.3. Требуемые значения отсчитываются в полях информационных дисплеев, помеченных надписями VA1, VA2, T2-T1. Рассчитать частоту исследуемого гармонического сигнала f и результат записать в таблицу 1.3.

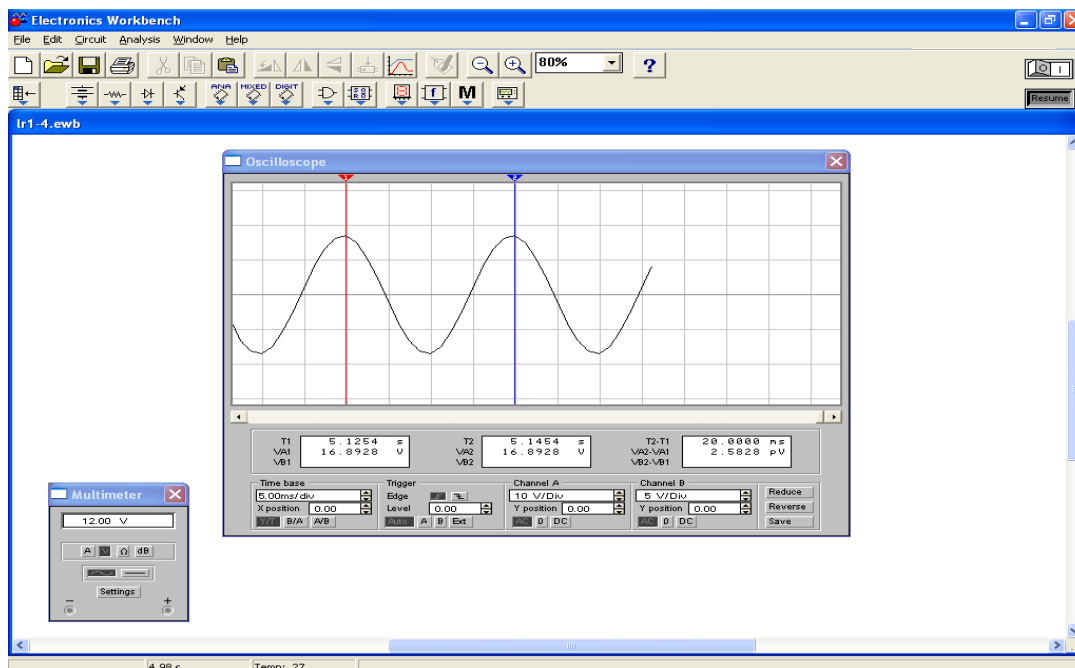


Рис. 1.20. Измерение осциллографом амплитуды и периода гармонического сигнала

Таблица 1.3

Результаты измерений

U_{mA1}	U_{mA2}	$T = T_2 - T_1$	$f = 1/T$	U_V	U_{mV}

6. Убрать изображение осциллографа, щелкнув по кнопке X в правом верхнем углу его панели. Записать в таблицу 1.3 показания мультиметра, измеряющего среднеквадратическое значение амплитуды напряжения U_V . Рассчитать какая при этом получается амплитуда U_{mV} и результат записать в таблицу 1.3.

7. Сделать выводы о точности измерения амплитуды гармонического напряжения.

8. Перевести кнопку I/O в положение O.

Эксперимент 5. Измерение сдвига фаз между гармоническим напряжением и током

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Открыть файл», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir1-5.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 1.21). Она содержит источник переменного напряжения, соединенные последовательно два элемента электрической цепи и осциллограф.

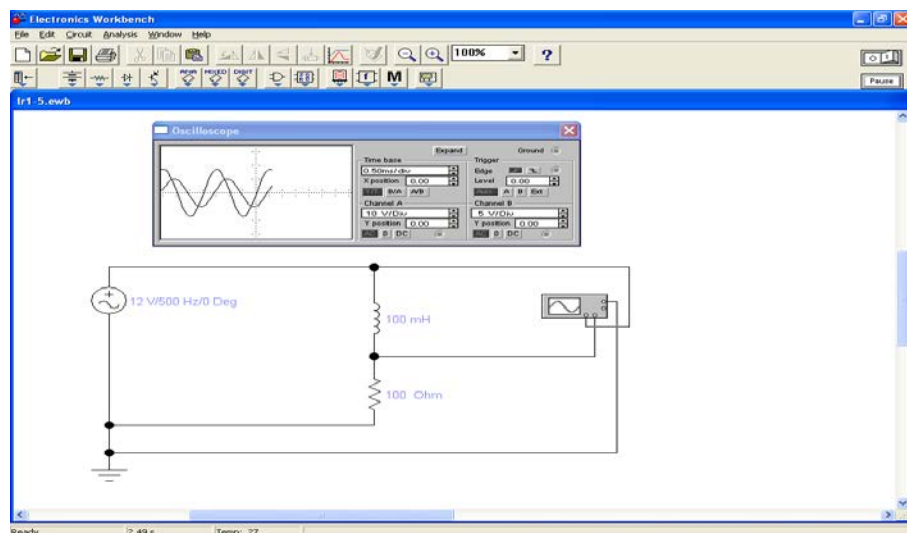


Рис. 1.21. Схема измерения сдвига фаз между напряжением и током

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Нажав кнопку «Expand» понаблюдать, как изображается (развертывается) осциллограммы переменного напряжения и тока.

4. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по расположенной под выключателем I/O иконке «Pause» и получить осциллограммы тока и напряжения примерно как на рис. 1.22. Для получения желаемой картинку эту операцию можно проделать несколько раз.

5. Используя визирные линейки с помощью осциллографа измерить амплитуды напряжений в каналах A и B, сдвиг фаз между гармоническим напряжением и током и период гармонического сигнала. Результаты записать в таблицу 1.4.

Измерения выполнить для случаев косинусоидального (рис. 1.22) и синусоидального (рис. 1.23) представления гармонического сигнала. Требуемые значения отсчитываются в соответствующих полях информационных дисплеев, помеченных надписями VA1, VA2, VB1, VB2, T2, T1, T2-T1.

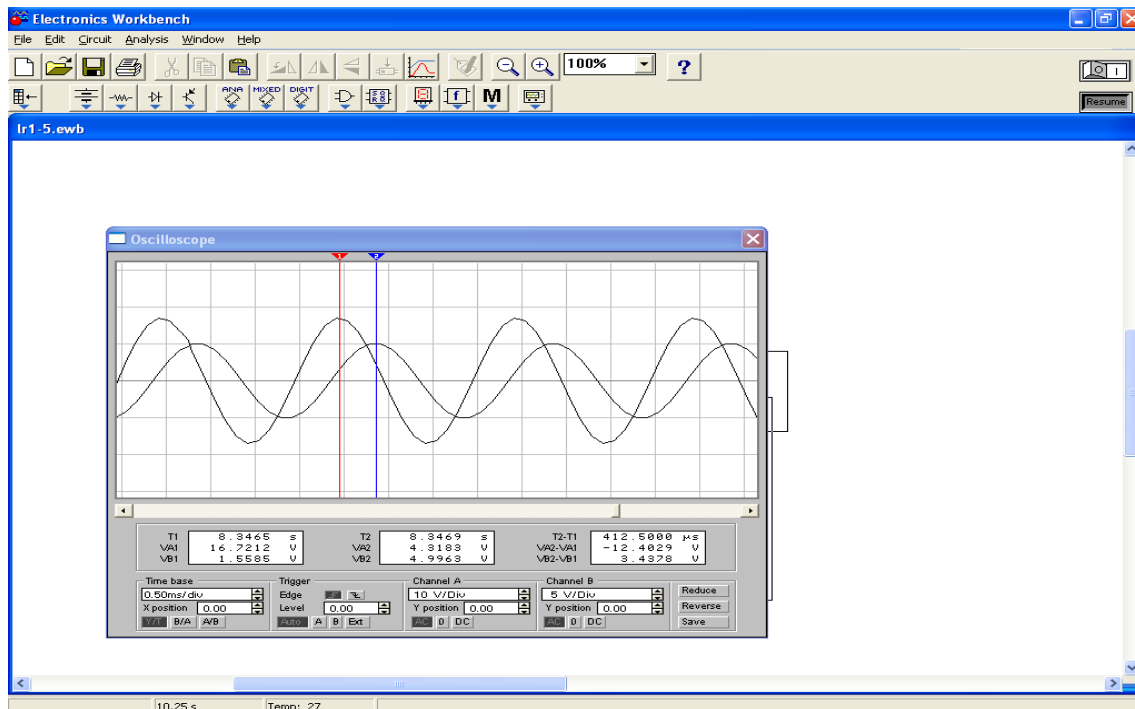


Рис. 1.22. Измерение сдвига фаз между напряжением и током для косинусоидальных сигналов (в качестве начальных точек ис-

пользуются максимумы осциллограммы) $T_{\varphi\cos} = T2_m - T1_m$ и их амплитуд U_{mA1} , U_{mB2} .

Таблица 1.4

Результаты измерений

U_{mA1}	U_{mB2}	$T_{\varphi\cos} = T2_m - T1_m$	$T_{\varphi\sin} = T2_0 - T1_0$	$T = T2_0 - T1_0$	φ_{\cos} , град	φ_{\sin} , град

Сдвиг фаз между напряжением и током определяется по формулам

$$\varphi = \frac{\Delta T \cdot 360^0}{T} = \frac{T_{\varphi\cos} \cdot 360^0}{T} = \frac{T_{\varphi\sin} \cdot 360^0}{T}. \quad (1.15)$$

Знак сдвига фаз между напряжением и током определяется в соответствии с правилами определения знаков.

6. Сделать выводы о возможности и точности измерения сдвига фаз между напряжением и током с помощью осциллографа.

7. Перевести кнопку I/O в положение O.

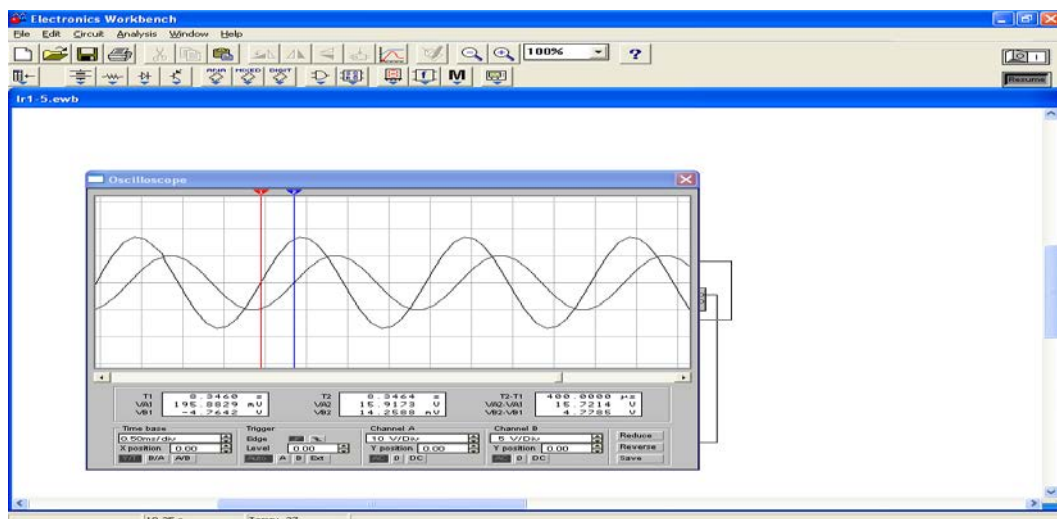


Рис. 1.23. Измерение сдвига фаз между напряжением и током для синусоидальных сигналов (в качестве начальных точек используются нули осциллограммы) $T_{\varphi\sin} = T2_0 - T1_0$

Эксперимент 6. Измерение комплексного сопротивления элемента электрической цепи.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Открыть файл», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir1-6.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 1.24). Она содержит источник переменного напряжения, соединенные последовательно два элемента электрической цепи и осциллограф.

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Нажав кнопку «Expand» понаблюдать, как изображается (развертывается) осциллограммы переменного напряжения и тока.

4. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по расположенной под выключателем I/O иконке «Pause» и получить осциллограммы тока и напряжения примерно как на рис. 1.25. Для получения желаемой картинку эту операцию можно проделать несколько раз.

5. Используя визирные линейки с помощью осциллографа измерить амплитуды напряжений в каналах А и В (рис. 1.26), сдвиг фаз между гармоническим напряжением и током (рис. 1.26) и период гармонического сигнала. Результаты записать в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Результаты измерений

U_{mA2}	U_{mB1}	$T_{\varphi \cos} = T2_m - T1_m$	φ_{\cos} , град	$ Zx = \check{z}$	φ , град

Рассчитать величину модуля комплексного сопротивления элемента 2 электрической цепи, используя формулу

$$|Zx_2| = \check{z}_2 = \frac{Um_{A2}}{Um_{B1}} R_0 \dots \quad (1.16)$$

Используя данные таблицы 1.4 рассчитать величину модуля комплексного сопротивления элемента 1 электрической цепи и результаты поместить в таблицу 1.6.

Таблица 1.5

Результаты измерений

U_{mA1}	U_{mB2}	$T_{\varphi \cos} = T2_m - T1_m$	φ_{\cos} , град	$ Z_x = \check{z}$	φ , град

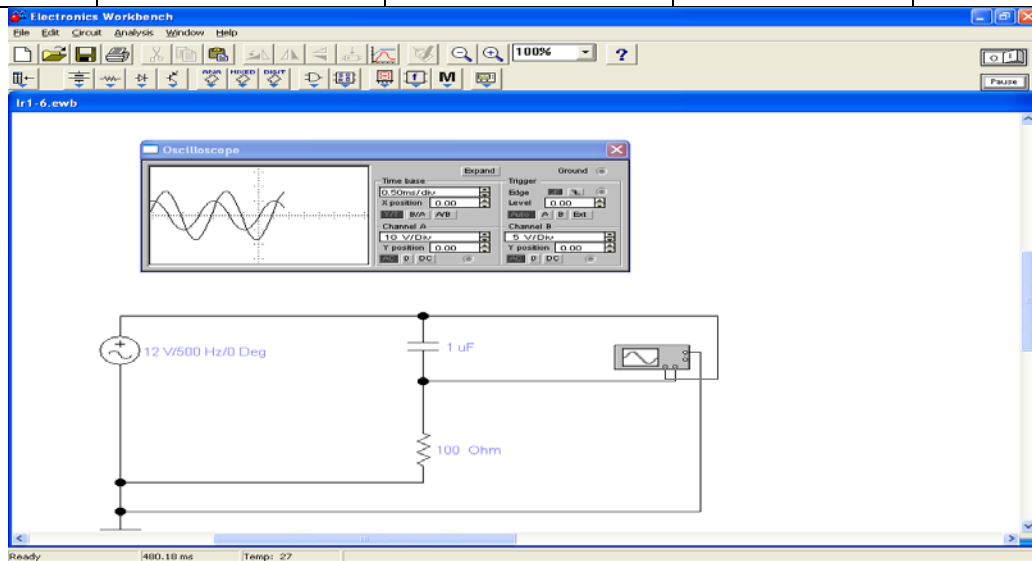


Рис. 1.24. Схема измерения комплексного сопротивления элемента электрической цепи

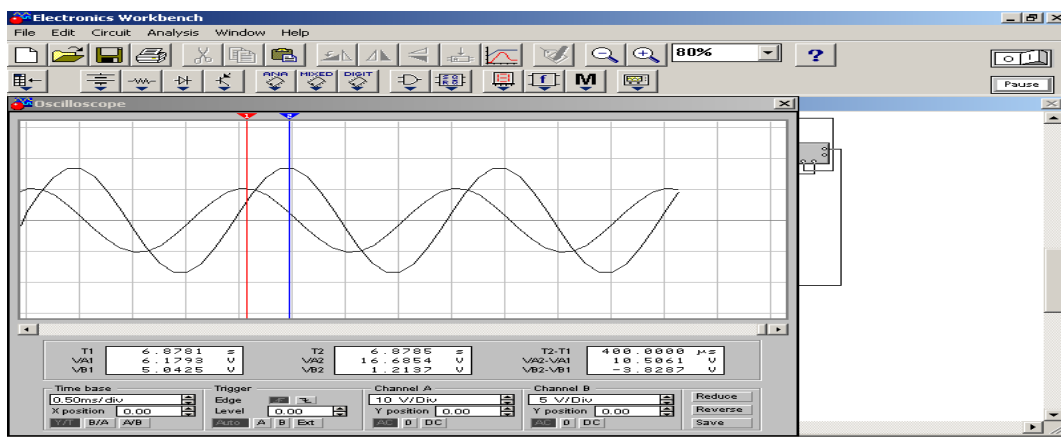


Рис. 1.25. Схема измерения амплитуд и сдвига фаз для определения комплексного сопротивления элемента электрической цепи

Рассчитать величину модуля комплексного сопротивления элемента 1 электрической цепи, используя формулу

$$|Z_{x1}| = \check{z}_1 = \frac{Um_{A1}}{Um_{B2}} R_0. \quad (1.17)$$

Величины комплексных сопротивлений элементов 1 и 2 записать в показательной форме.

5. Сравнить величины сопротивлений элементов 1 и 2 между собой и сделать выводы.

Эксперимент 7. Измерение параметров периодической последовательности прямоугольных импульсов

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Открыть файл», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir1-7.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 1.26). Она содержит генератор, создающий импульсы прямоугольной формы и осциллограф.

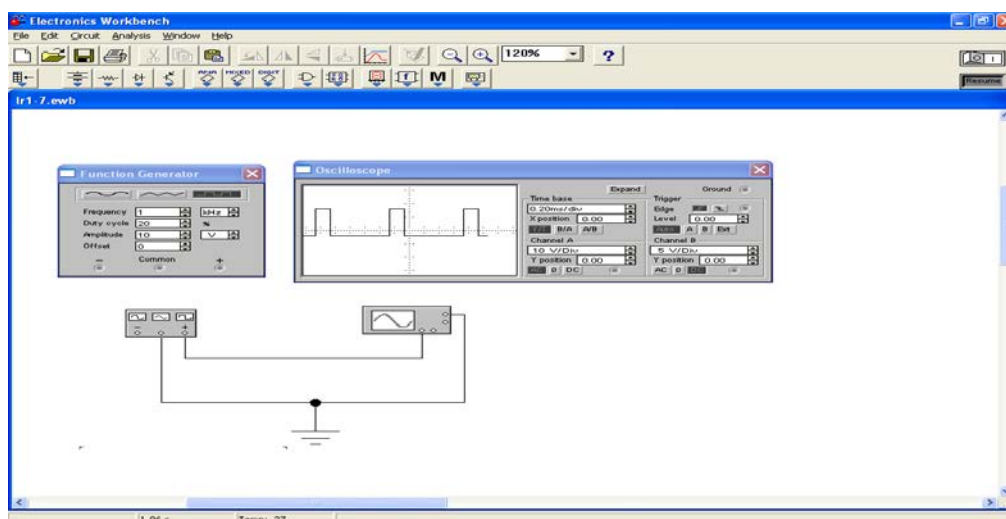


Рис. 1.26. Схема измерения параметров импульсного сигнала прямоугольной формы

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Нажав кнопку «Expand» понаблюдать, как изображается (развертывается) осциллограмма импульсного сигнала.

4. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по иконке «Pause» и получить осциллограмму прямоугольных импульсов примерно как на рис. 1.27. Для получения желаемой картинки эту операцию можно проделать несколько раз.

5. Используя визирные линейки с помощью осциллографа измерить период следования, (рис. 1.27), амплитуду, и длительность (рис. 1.28) прямоугольных импульсов. Результаты записать в таблицу 1.6.

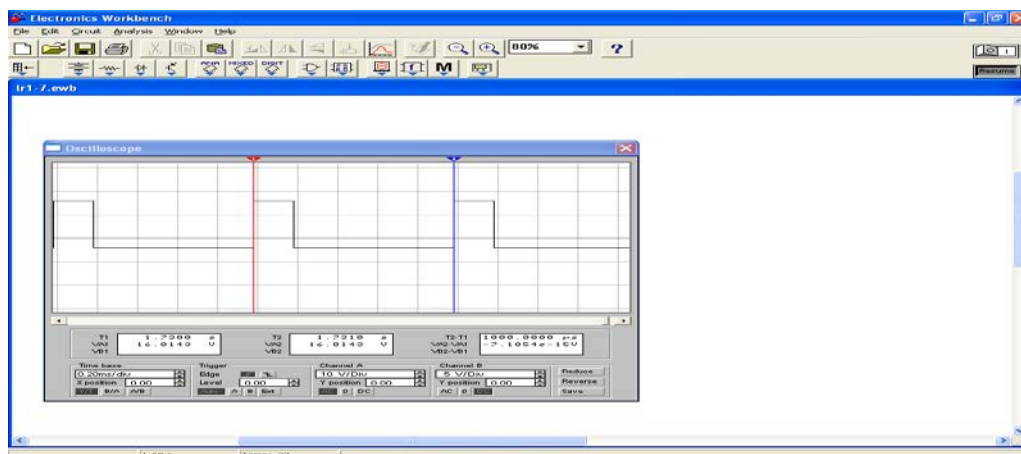


Рис. 1.27. Измерение периода прямоугольных импульсов

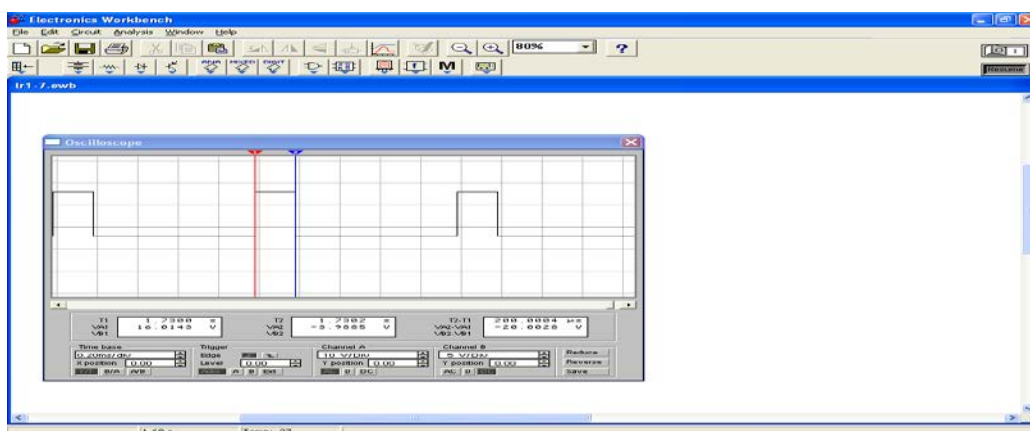


Рис.1.28. Измерение длительности прямоугольных импульсов

6. Определить для прямоугольного импульса энергию и норму сигнала. То же выполнить для случая, когда к вершине прямоугольного импульса добавляется период синусоиды с амплитудой в 10 % амплитуды импульса. Сделать выводы о влиянии синусоидальной помехи.

7. Для двух представляемых векторами прямоугольных импульсов, смещенных на величину t_0 , вычислите зависимость угла Ψ между векторами от параметра t_0 .

Таблица 1.6.

Результаты измерений

U_m	$T = T_2 - T_1$	$t_u = T_2 - T_1$	$Q = T / t_u$	$f = 1/T$

Эксперимент 8. Измерение параметров импульсного пилообразного напряжения.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Открыть файл», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir1-8.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 1.29). Она содержит генератор, создающий импульсы пилообразной формы и осциллограф.

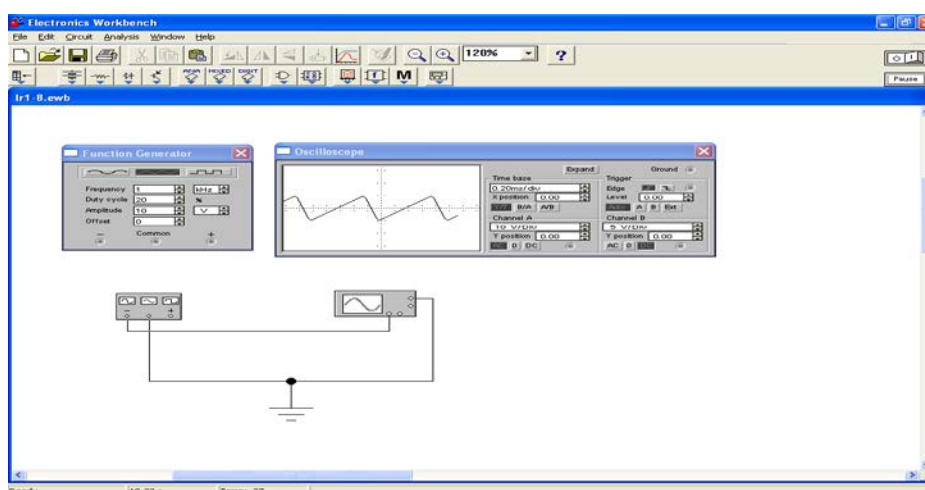


Рис. 1.29. Схема измерения параметров импульсного сигнала пилообразной формы

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Нажав кнопку «Expand» понаблюдать, как изображается (развертывается) осциллограмма импульсного сигнала.

4. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по иконке «Pause» и получить осциллограмму пилообразных импульсов примерно как на рис. 1.30. Для получения желаемой картинки эту операцию можно проделать несколько раз.

5. Используя визирные линейки с помощью осциллографа измерить период следования несимметричных треугольных импульсов, (рис. 1.30), их амплитуду, длительность прямого хода импульса (рис. 1.31). Результаты записать в таблицу 1.7.



Рис. 1.30. Измерение длительности пилообразных импульсов

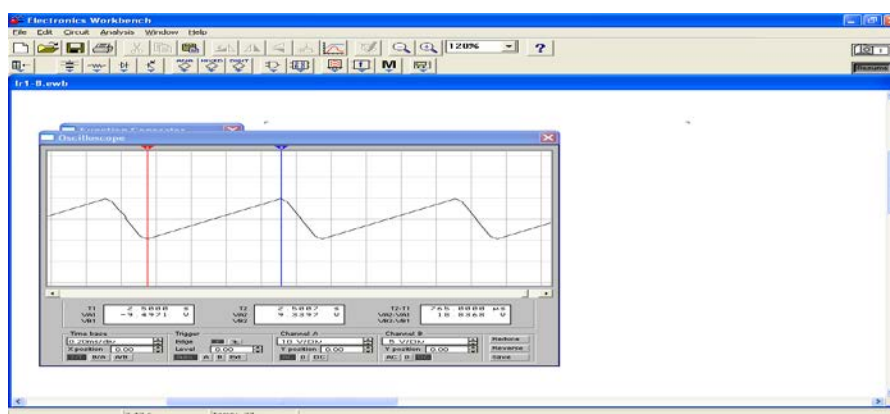


Рис. 1.31. Измерение длительности прямого хода пилообразного импульса

6. Определить для исследуемого импульса треугольной формы энергию и норму сигнала.

7. Сравнить нормы импульсов прямоугольной и треугольной форм и сделать выводы.

Таблица 1.7.

Результаты измерений

U_m	$T = T_2 - T_1$	$t_u = T_2 - T_1$	$Q = T / t_u$	$f = 1/T$

1.2.5. Обработка результатов экспериментов

В этой части студент должен привести все необходимые расчеты по лабораторной работе, произвести их анализ и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Опишите кратко основное окно моделирующей элементы и устройства электрической цепи программы (программного эмулятора) ELECTRONICS WORKBENCH.
2. Для чего используется комбинированный измерительный прибор или, сокращенно, мультиметр (Multimeter) ? Опишите его основные свойства.
3. Для чего используется электронно-лучевой осциллограф (Oscilloscope) ? Опишите его основные свойства и режимы работы.
4. Что такое функциональный генератор (Function Generator) ? Для чего он применяется ?
5. *Прямые и косвенные методы измерений.* Кратко охарактеризуйте их и когда они применяются ?
6. Сделать выводы о точности измерения постоянного напряжения косвенным методом.
7. Опишите последовательность действий для измерения сдвига фаз между гармоническим напряжением и током.
8. Сделайте выводы о возможности и точности измерения сдвига фаз между напряжением и током с помощью осциллографа.

9. Опишите последовательность действий для измерения параметров периодической последовательности прямоугольных импульсов.
10. Определить для прямоугольного импульса энергию и норму сигнала.
11. Сравнить нормы импульсов прямоугольной и треугольной форм и сделать выводы.

Индивидуальные задания № 1 к самостоятельной работе студентов

1. Для варианта гармонического колебания, приведенного в алгебраической форме в таблице 1.8., записать символическое изображение в виде комплексной амплитуды и изобразить полученную амплитуду на комплексной плоскости в виде вектора (взять три значения V).

2. Для варианта гармонического колебания (сигнала $u(t)$), приведенного в виде формулы в таблице 1.9., записать его символическое изображение в виде комплексной амплитуды и комплексного действующего значения, изобразить полученную амплитуду на комплексной плоскости в виде вектора.

3. Для заданного преподавателем тока и напряжения, приведенных в таблице 1.10 в виде комплексных чисел в показательной форме (т.е. модуля и аргумента), определить величину комплексного сопротивления элемента цепи и сдвиг фаз между напряжением и током.

4. Для заданного преподавателем варианта гармонического колебания $S_1(t)$, приведенного в таблице 1.11 в виде модуля и аргумента комплексной амплитуды колебания, записать закон изменения во времени самого колебания (сигнал $u(t)$). Построить временные зависимости сигнала $u(t)$ в двух системах координат: А. «Напряжение – время» $u = F(t)$ (т.е. когда по оси абсцисс откладывается время). Б. «Напряжение – угол» $u = F(\omega t)$ (т.е. когда по оси абсцисс откладывается угол в радианах, характеризующий поворот радиус-вектора).

5. Для заданного преподавателем варианта гармонического колебания $S_2(t)$, приведенного в таблице 1.11 в виде комплексного числа в показательной форме (т.е. модуля и аргумента), записать комплексную амплитуду в алгебраической форме.

6. Для заданного преподавателем варианта графика импульсного сигнала (осциллограммы) $u(t)$ и подварианта его параметров, приведенных в таблице 1.12 записать математическую модель сигнала, выраженную через временные отрезки (интервалы) и посредством сумм, которые составлены из произведений линейных функций и функций Хевисайда.

7. Для заданного преподавателем (табл. 1.13) варианта импульсного сигнала $S(\theta)$, описываемого формулой, постройте график импульса (осциллограмму) $u(t)$ для $t = 10\theta$ и для $t = 10\theta$, определите его макси-

мальное значение (амплитуду), а также момент достижения максимума. Построение графиков выполнить двумя способами, используя MATLAB.

Таблица 1.8.

Вариант	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
1	-5,1+j14	5,1-j14	-51+j1,4	-11+j1,1	-3,1+j24	-31+j2,4
2	45-j9	-45+j9	-4,5+j9,5	-1,5+j1,5	35-j29	3,5-j2,9
3	-41-j74	4,1-j14	4,1+j1,4	1,1+j1,4	-4,1-j7,4	-41+j7,4
4	48+j27	-8-j27	-18-j2,7	-11-j1,7	-4,8+j2,7	-6,8-j2,7
5	81-j49	-11+j49	-17-j4,9	-11-j1,9	-8,1-j4,9	-2,1-j3,9
6	53-j76	-33-j76	-3,3+j7,6	-1,3+j1,6	-5,3-j76	-6,3-j66
7	-7,2+j22	7,2-j82	2-j8,2	1-j1,2	-3,2+j2,2	-62+j62
8	38+j5	48+j15	4,8-j15	1,8-j1,5	3,8+j5,5	68+j55
9	-28-j74	88-j14	-8,8+j14	-1,8+j1,4	-2,8-j7,4	7,8-j7,4
10	53-j30	-53-j3	-5,3-j3,7	-1,3-j1,7	5,3-j3,9	9,3-j9,9
11	96-j82	-96-j82	-9,6+j8,2	-1,6+j1,2	5,6-j8,7	9,6-j9,7
12	44-j51	-41-j51	-4,4-j5,1	-1,4-j15,1	3,4+j53	8,4+j13
13	-6-j26	-66-j6	-6,6-j6,6	-16,6-j1,6	-36-j26	-6-j6,6
14	31+j6	-31-j6	-3,1-j6,1	-13,1-j6,1	31+j36	-3+j3,6
15	-51-j63	51-j63	5,4-j6,3	15,4-j16,3	-41-j43	-4,1-j4,3
16	44+j25	54-j25	-5,4-j2,5	-15,4-j1,5	64+j65	6,4+j6,5
17	84-j30	-4-j36	-4+j36	-14+j36	44-j40	4,4-j4,4
18	36-j41	-36+j41	-3,6+j4,1	-13,6+j1,1	46-j41	4,6-j1,1
19	-5,5+j20	-5-j20	-95-j2	-15-j12	-4,5+j24	-4,5+j24
20	36+j6	-36-j6	-3,6+j6	-13,6+j16	46+j63	36+j63
21	-58-j86	5,8-j8,6	-8+j8,6	-18+j18,6	-5,8-j4,6	-3,8-j36
22	20+j11	-2-j11	-21-j1,1	-11-j11,1	2,4+j1,1	9,4+j1,9
23	76-j66	-76-j6	-7,6-j6,6	-17,6-j16,6	4,6-j66	9,6-j6,9
24	20-j23	-2+j23	-2,2+j2,3	-12,2+j12,3	70-j23	8-j2,3
25	-98+j24	-8+j2,4	-8,1+j24	-18,1+j24	-78+j24	-7,8+j2,4
26	38+j8	-3,8+j8	-3,8-j8	-13,8-j18	78+j8	68+j88
27	-80-j92	-8-j9,2	-8+j9,2	-18+j9,2	-87-j9,2	-8,7-j1,2
28	80+j15	8-j1,5	-8-j15	-18-j15	48+j15	5,8+j1,5
29	56-j20	5,6+j20	-5,6-j20	-1,6-j20	-46-j20	-4,6-j6,4
30	20-j57	-20-j5,7	-20+j5,7	-21+j1,7	6-j5,7	6,4-j4,7

Таблица 1.9.

Вариант	Сигнал	Вариант	Сигнал
1	$u(t)=0,1\cos(\omega t+\pi/6)$	16	$u(t)=1,1\sin(\omega t+\pi/2)$
2	$u(t)=0,3\cos(\omega t-\pi/4)$	17	$u(t)=2,8\cos(\omega t-11\pi/33)$
3	$u(t)=0,5\cos(\omega t+3\pi/4)$	18	$u(t)=8,1\cos(\omega t+45^\circ)$
4	$u(t)=2,3\cos(\omega t+5\pi/4)$	19	$u(t)=7,7\sin(\omega t+\pi/2)$
5	$u(t)=0,5\cos(\omega t-11\pi/6)$	20	$u(t)=1,5\cos(\omega t-30^\circ)$
6	$u(t)=1,8\cos(\omega t+30^\circ)$	21	$u(t)=1,9s(\omega t-\pi/6)$
7	$u(t)=0,1\sin(\omega t+\pi/6)$	22	$u(t)=5\sin(\omega t+\pi/2)$
8	$u(t)=4\cos(\omega t+\pi/12)$	23	$u(t)=4\cos(\omega t+3\pi/4)$
9	$u(t)=4,5\cos(\omega t-\pi/6)$	24	$u(t)=0,1os(\omega t+30^\circ)$
10	$u(t)=2\cos(\omega t-30^\circ)$	25	$u(t)=2\cos(\omega t)$
11	$u(t)=0,6\sin(\omega t+\pi/2)$	26	$u(t)=0,8os(\omega t-45^\circ)$
12	$u(t)=1,7\sin(\omega t-\pi/4)$	27	$u(t)=1,8\cos(\omega t+30^\circ)$
13	$u(t)=0,4\cos(\omega t-11\pi/12)$	28	$u(t)=4\cos(\omega t+\pi)$
14	$u(t)=1,5\cos(\omega t+\pi/6)$	29	$u(t)=1,4\cos(\omega t-3\pi/4)$
15	$u(t)=3,5\sin(\omega t+\pi/6)$	30	$u(t)=2,5\cos(\omega t+11\pi/12)$

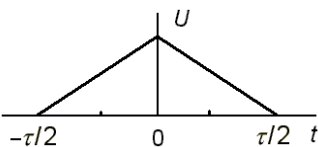
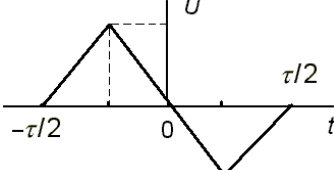
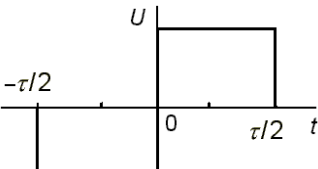
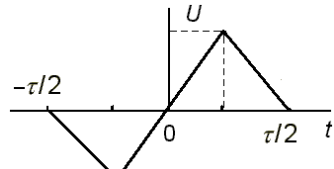
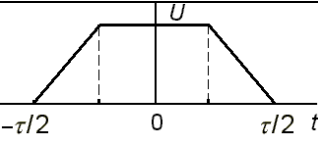
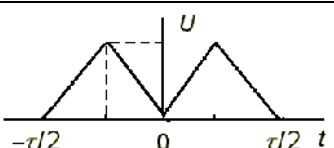
Таблица 1.10.

Вариант Т	$U_m,$ В	$I_m,$ м А	ψ_u	ψ_i	Вариант	$U_m,$ В	$I_m,$ м А	ψ_u	ψ_i
1	0,2	0,3	-14π/15	-1,4π	16	1,7	3,3	π/15	0,1π
2	0,3	0,5	-13π/15	-1,3π	17	1,8	3,5	2π/15	0,2π
3	0,4	0,7	-12π/15	-1,2π	18	1,9	3,7	π/15	0,3π
4	0,5	0,9	-11π/15	-1,1π	19	2,0	3,9	4π/15	0,4π
5	0,6	1,1	-2π/3	-1,0π	20	2,1	4,1	π/3	0,5π
6	0,7	1,3	-3π/5	-0,9π	21	2,2	4,3	2π/5	0,6π
7	0,8	1,5	-8π/15	-0,8π	22	2,3	4,5	7π/15	0,7π
8	0,9	1,7	-7π/15	-0,7π	23	2,4	4,7	8π/15	0,8π
9	1,0	1,9	-2π/5	-0,6π	24	2,5	4,9	3π/5	0,9π
10	1,1	2,1	-π/3	-0,5π	25	2,6	5,1	2/3	π
11	1,2	2,3	-4π/15	-0,4π	26	2,7	5,3	11π/15	1,1π
12	1,3	2,5	-π/15	-0,3π	27	2,8	5,5	4π/5	1,2π
13	1,4	2,7	-2π/15	-0,2π	28	2,9	5,7	13π/15	1,3π
14	1,5	2,9	-π/15	-0,1π	29	3,0	5,9	14π/15	1,4π
15	1,6	3,1	0	0	30	3,1	6,1	7π/15	1,5π

Таблица 1.11.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_{m1}	1,2	0,6	1,0	0,8	1,7	1,7	2,0	2,0	1,7	1,0
ψ_1	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/6$
S_{m2}	0,8	0,6	1,7	0,8	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0
ψ_2	$\pi/6$	$\pi/3$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	π	$\pi/3$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	$-2\pi/3$	$-5\pi/6$
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S_{m1}	1,0	1,7	1,5	1,7	1,0	0,8	1,0	2,0	1,0	1,0
ψ_1	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$	$-\pi/3$	$\pi/3$	$2\pi/3$	$2\pi/3$
S_{m2}	1,7	1,7	0,5	1,7	1,0	0,8	1,7	1,0	1,0	1,0
ψ_2	$-\pi/3$	$-\pi/6$	$\pi/3$	$2\pi/3$	$-\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/6$	$-2\pi/3$	$5\pi/6$	$-5\pi/6$
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
S_{m1}	1,4	1,4	1,0	1,4	2,0	1,0	1,6	1,0	1,4	1,0
ψ_1	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
S_{m2}	1,4	0,7	1,4	1,4	2,5	1,4	1,0	1,4	1,4	1,4
ψ_2	$-\pi/4$	$\pi/2$	$-\pi/2$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$	π	$-\pi/2$	$3\pi/4$	π	π

Таблица 1.12.

Вариант	Сигнал $S(t)$	Вариант	Сигнал $S(t)$
-1-	-2-	-3-	-4-
10		5	
1		6	
2		7	

Продолжение таблицы 1.12.

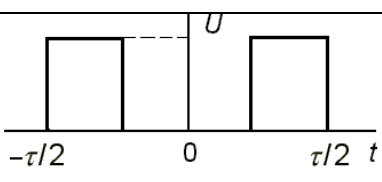
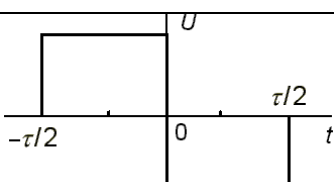
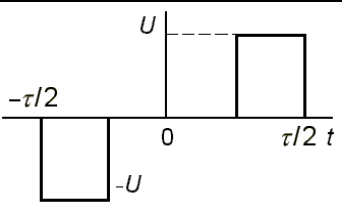
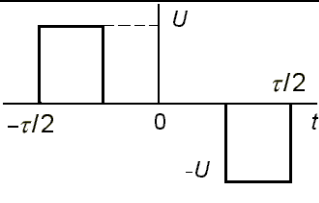

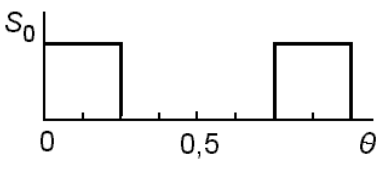
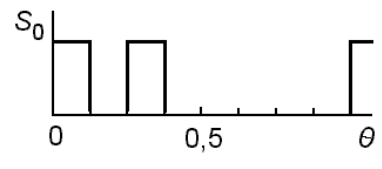
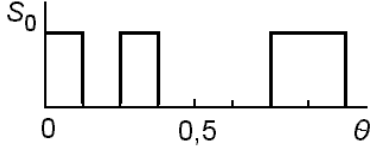
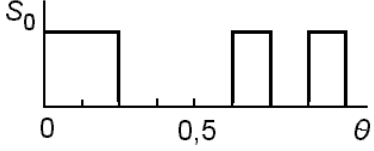
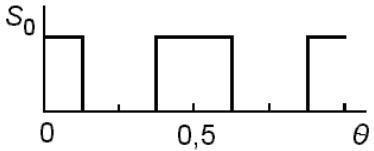
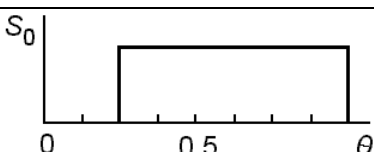
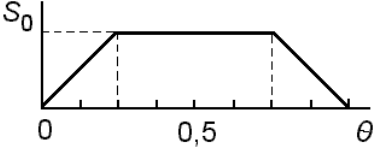
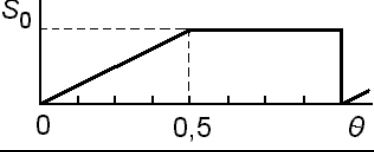
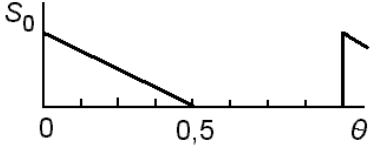
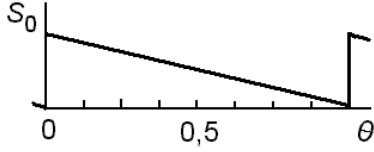
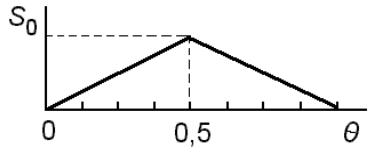
-1-	-2-	-3-	-4-							
3		9								
4		9								
Подвариант 10										
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В	8	4	2	1	10	8	4	2	1	10
τ, мс	2	3	4	5	5	4	3	2	1	1
T, мс	6	9	12	15	20	16	12	8	4	3

Таблица 1.13.

Ва- риант	Сигнал $S(\theta)$	
	График	Аналитическая запись
-1-	-2-	-3-
1		$\begin{cases} S_0, & 0 \leq \theta \leq 1/4, \\ -S_0, & 3/4 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
2		$\begin{cases} S_0, & 0 \leq \theta \leq 0,25, \\ 0, & 0,25 \leq \theta \leq 0,75, \\ S_0, & 0,75 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
3		$\begin{cases} S_0, & 0 \leq \theta \leq 1,25, \\ & 0,25 \leq \theta \leq 0,375, \\ 0, & \text{âì à ýòèë èì òàðâàèì â.} \end{cases}$

Продолжение таблицы 1.13.

-1-	-2-	-3-
4		$\begin{cases} S_0, & 0 \leq \theta \leq 1/8, 2/8 \leq \theta \leq 3/8, \\ & 6/8 \leq \theta \leq 10/8, \\ 0, & \text{âí â ýòèõ èí òàðâàèî â.} \end{cases}$
5		$\begin{cases} S_0, & 0 \leq \theta \leq 1/4, 5/8 \leq \theta \leq 6/8, \\ & 7/8 \leq \theta \leq 1,0, \\ 0, & \text{âí â ýòèõ èí òàðâàèî â.} \end{cases}$
6		$\begin{cases} S_0, & 0 \leq \theta \leq 1/8, 3/8 \leq \theta \leq 5/8, \\ & 7/8 \leq \theta \leq 1,0, \\ 0, & \text{âí â ýòèõ èí òàðâàèî â.} \end{cases}$
7		$\begin{cases} 0, & 0 \leq \theta \leq 0,25, \\ S_0, & 0,25 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
8		$\begin{cases} 4S_0\theta, & 0 \leq \theta \leq 0,25, \\ 0, & 0,25 \leq \theta \leq 0,75, \\ S_0[1-4(\theta-0,75)], & 0,75 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
9		$\begin{cases} 2S_0\theta, & 0 \leq \theta \leq 0,5, \\ S_0, & 0,5 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
10		$\begin{cases} S_0(1-2\theta), & 0 \leq \theta \leq 0,5, \\ 0, & 0,5 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
11		$\{ S_0(1-\theta), \quad 0 \leq \theta \leq 1,0,$
12		$\begin{cases} 2S_0\theta, & 0 \leq \theta \leq 0,5, \\ 2S_0(1-\theta), & 0,5 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$

Продолжение таблицы 1.13.

-1-	-2-	-3-
13		$\begin{cases} S_0(1-4\theta), & 0 \leq \theta \leq 0,25, \\ 0, & 0,25 \leq \theta \leq 0,75, \\ 4S_0(\theta-0,75), & 0,75 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
14		$\begin{cases} S_0(\theta+1-\theta_0), & 0 \leq \theta \leq \theta_0, \\ S_0(\theta-\theta_0), & \theta_0 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
15		$\begin{cases} S_0[(0,5-2(\theta_0-\theta))], & 0 \leq \theta \leq \theta_0, \\ S_0[(0,5-2(\theta_0-\theta))], & \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0+0,5, \\ S_0[2(\theta_0-\theta)-1,5], & 0,5+\theta_0 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
16		$\begin{cases} 2S_0(\theta_0-\theta), & 0 \leq \theta \leq \theta_0, \\ 2S_0(\theta-\theta_0), & \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0+0,5, \\ 2S_0[1-(\theta-\theta_0)-1,5], & 0,5+\theta_0 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
17		$\begin{cases} S_0\theta, & 0 \leq \theta \leq 0,5, \\ -S_0(\theta-1), & 0,5 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
18		$S_0(\theta-0,5), \quad 0 \leq \theta \leq 1,0.$
19		$\begin{cases} S_0(\theta_0-\theta), & 0 \leq \theta \leq \theta_0, \\ S_0[(1-(\theta-\theta_0))], & \theta_0 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$
20		$\begin{cases} S_0(0,5\theta-2\theta), & 0 \leq \theta \leq 0,5, \\ S_0(2\theta-1,5), & 0,5 \leq \theta \leq 1,0. \end{cases}$

Тема 2. Основные компоненты электрической цепи

2.1. Практическое занятие № 2

Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов характеристик и параметров компонентов электрической цепи и визуализации полученных результатов

2.1.1. Примеры задач

Задача 1.

Никель-металлогидридная (Ni-MH) аккумуляторная батарея ANB-15A имеет энергоемкость $Q = 1,2$ А час, начальное $U_{НАЧ} = 8,4$ В и конечное напряжения $U_{КОН} = 7,2$ В. Считая, что рост и уменьшение напряжения на батарее происходит линейно определить:

1. Номинальный (рекомендуемый) ток заряда батареи и мощность, потребляемую при этом от зарядного устройства.
2. Требуемое время заряда батареи.
3. Номинальный ток разряда (рабочий ток) батареи и мощность, отдаваемую при этом потребителю энергии.
4. Время работы заряженной аккумуляторной батареи.

Построить графики зависимости заряда, напряжения, тока, мощности от времени при зарядке и разрядке аккумулятора.

Решение.

Сформулируем общие положения, позволяющие рассчитывать необходимые параметры аккумулятора.

1. Номинальным считается ток заряда, определяемый по формуле

$$I_{ЗАР} = \frac{Q}{10}. \quad (2.1)$$

2. При зарядке аккумуляторов требуется, чтобы полученный заряд составлял примерно 140 % от энергоемкости батареи. Поэтому требуемое время заряда батареи можно определить из соотношения

$$t_{ЗАР} = \frac{1.4Q}{I_{ЗАР}}. \quad (2.2)$$

3. В так называемом «быстром режиме зарядки», при котором отдельные, не сконструированные специальным образом аккумуляторы могут взрываться (об этом есть указание в инструкции, прилагаемой к аккумулятору), ток зарядки в 4 раза больше номинального. Поэтому при «быстром режиме зарядки» время зарядки составляет

$$t_{3AP} = \frac{1.4Q}{4I_{3AP}}. \quad (2.3)$$

4. Номинальный (рекомендуемый) ток разрядки (рабочий ток) аккумулятора вычисляется по формуле

$$t_{3AP} = \frac{1.4Q}{I_{PA3}}. \quad (2.4)$$

Чтобы обеспечивать такой ток разряда, потребитель энергии аккумулятора должен использовать потребляющее устройство с входным сопротивлением (сопротивлением нагрузки) равным

$$R_{BX} = \frac{U_{NACH}}{I_{PA3}}. \quad (2.5)$$

5. При полной разрядке аккумулятора может произойти смена полярности батареи, поэтому многоэлементные аккумуляторные батареи следует разряжать до величины (10 – 20)% от полной энергоемкости. Поэтому для времени работы аккумулятора справедливо соотношение

$$t_{PAB} = \frac{Q(1-0.1)}{I_{PA3}} = \frac{0.9Q}{I_{PA3}}. \quad (2.6)$$

6. По условию задачи напряжение на аккумуляторной батарее во время зарядки растет линейно. Зная величины начального, конечного напряжений, время зарядки и воспользовавшись уравнением прямой, проходящей через 2 точки, можно записать выражение для мгновенных значений напряжения при зарядке

$$u_{3AP}(t) = U_{KON} + (U_{NACH} - U_{KON}) \frac{t}{t_{3AP}}. \quad (2.7)$$

7. Напряжение на аккумуляторной батарее во время разрядки (работы) по условию задачи уменьшается линейно. По аналогии с процессом заряда можно записать формулу, определяющую мгновенные значения напряжения на аккумуляторе при зарядке,

$$u_{PA3}(t) = U_{NACH} + (U_{NACH} - U_{KON}) \frac{t}{t_{PA3}}. \quad (2.8)$$

8. Мощность при зарядке и разрядке определяется по формуле

$$P(t) = u(t)i(t). \quad (2,9)$$

9. Величину заряда аккумулятора, имеющегося в данный момент времени на батарее, в процентах от номинальной энергоемкости, при заряде и разряде можно рассчитать следующим образом

$$q_{3AP} = 10 + 90 \frac{t}{t_{3AP}}, \quad (2.10)$$

$$q_{PA3} = 100 - 90 \frac{t}{t_{PA3}}. \quad (2.11)$$

Дальнейшие действия при решении задачи состоят в наборе (в копировании из файла) в командном окне системы MATLAB следующих MATLAB – выражений (программа в командах для MATLAB).

```
qak=1.2;
unach=8.4;
ukon=7.2;
izar=qak/10;
tzar=1.4*qak/izar;
tzarmin=tzar/4;
irazr=qak/10;
trab=0.9*qak/irazr;
n=1000;
ttzar=linspace(0,tzar,n);
ttrab=linspace(0,trab,n);
uzar=ukon+((unach-ukon)/tzar).*ttzar;
urazr=unach-((unach-ukon)/trab).*ttrab;
qzar=10+(90/tzar).*ttzar;
qrazr=100-(90/trab).*ttrab;
izart=izar.*ones(1,n);
irazrt=irazr.*ones(1,n);
pzar=-izar.*uzar;
prazr=irazr.*urazr;
subplot(4,2,1);plot(ttzar,qzar,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,час');ylabel('Qzar(t),%');
subplot(4,2,3);plot(ttzar,izart,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,час');ylabel('Izar(t),A');
```

```

subplot(4,2,5);plot(ttzar,uzar,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,chas');ylabel('Uzar(t),B');
subplot(4,2,7);plot(ttzar,pzar,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,chas');ylabel('Pzar(t),Wt');
subplot(4,2,2);plot(ttrab,qrazr,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,chas');ylabel('Qrazr(t),%');
subplot(4,2,4);plot(ttrab,irazrt,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,chas');ylabel('Irazr(t),A');
subplot(4,2,6);plot(ttrab,urazr,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,chas');ylabel('Urazr(t),B');
subplot(4,2,8);plot(ttrab,prazr,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t,chas');ylabel('Prazr(t),Wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем изображение искомых характеристик процесса заряда и разряда аккумулятора (рис. 2.1.).

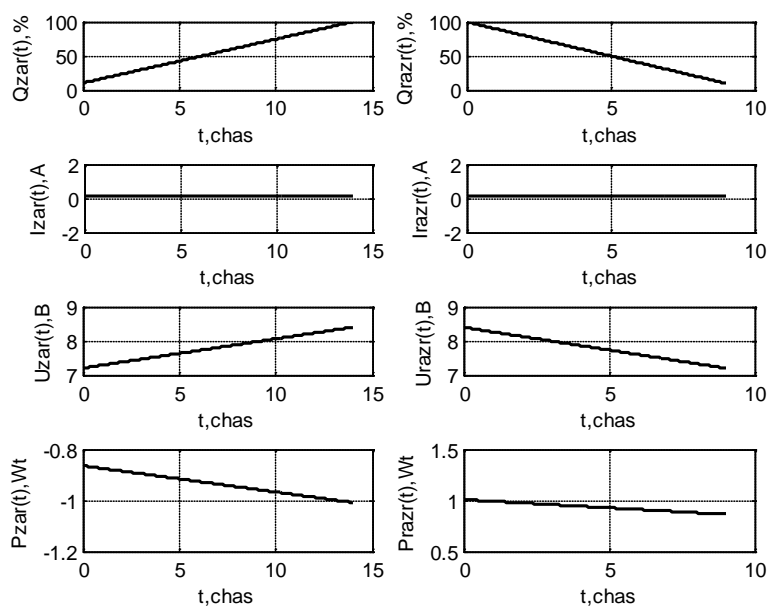


Рис. 2.1. График временных зависимостей заряда, тока, напряжения и мощности при зарядке и разряде аккумулятора

На графиках слева в подокнах отображены временные зависимости (время в часах) имеющегося заряда аккумулятора, тока заряда, изменения напряжения на батарее и мощности, потребляемой аккумулятором. Следует обратить внимание на то, что мощность отрицательна, поскольку аккумулятор потребляет энергию во время заряда.

На графиках справа в подокнах отображены временные зависимости имеющегося заряда аккумулятора, тока разряда, изменения напряжения на батарее и мощности, отдаваемой аккумулятором.

Численные значения искомых параметров можно посмотреть в окне рабочего пространства, а в случае необходимости, вывести на печать, убрав точку с запятой после соответствующих выражений.

Задача 2.

Определить комплексное и полное сопротивление идеального конденсатора емкостью $C = 10$ мкФ, если он подключен к источнику ЭДС, вырабатывающему гармоническое напряжение $U = (15 + j25)$ В с частотой $f = 50$ Гц. Подтвердить, что конденсатор является реактивным элементом, имеющим только мнимую часть у комплексного сопротивления.

Решение:

по определению комплексное сопротивление идеального конденсатора определяется выражением

$$\dot{Z}_C(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}. \quad (2.12)$$

Вместо круговой (угловой) частоты ω обычно используют частоту f . Связь между этими частотами определяется формулой $\omega = 2\pi f$.

Тогда для вычисления комплексного сопротивления в командном окне системы MATLAB надо набрать следующие MATLAB-выражения.

```
uc=15+i*25;  
c=10e-6;  
f=50;  
w=2*pi*f;  
zc=1/(i*w*c);
```

Для полного сопротивления конденсатора, как модуля комплексного сопротивления, справедливо представление

$$z = |\dot{Z}| = \frac{1}{2\pi f}. \quad (2.13)$$

```
zcm=abs(zc)
```

Аргумент комплексного сопротивления в радианах и градусах определяется следующими MATLAB-выражениями

```
zcargrad=angle(zc)
```

$$z_{carggrad} = z_{cargrad} * 180 / \pi$$

Покажем, что конденсатор является реактивным элементом, вычислив вещественную и мнимую часть комплексного сопротивления

$$\text{real}z_c = \text{real}(z_c)$$

$$\text{imag}z_c = \text{imag}(z_c)$$

После нажатия клавиши ENTER получаем

$$z_{cmod} =$$

$$318.3099$$

$$z_{cargrad} =$$

$$-1.5708$$

$$z_{cargggrad} =$$

$$-90$$

$$\text{real}z_c =$$

$$0$$

$$\text{imag}z_c =$$

$$-318.3099$$

Обратите внимание на то, что емкостное сопротивление, как мнимая часть комплексного сопротивления, есть величина отрицательная.

Задача 3.

Используя исходные данные задачи 2, определить зависимость комплексного сопротивления идеального конденсатора от частоты. Построить графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления от частоты. Расчет выполнить в диапазоне частот 30 Гц – 1 кГц.

Решение.

По определению комплексное сопротивление идеального конденсатора определяется выражением

$$\dot{Z}_C(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}. \quad (2.14)$$

Следовательно, комплексное сопротивление с частотой связано обратно пропорциональной зависимостью. При этом следует иметь в виду, что обратно пропорционально от частоты зависит только модуль (полное сопротивление конденсатора)

$$z = |\dot{Z}| = \frac{1}{2\pi f}. \quad (2.15)$$

Аргумент комплексного сопротивления от частоты не зависит

$$\arg(\dot{Z}_C) = \arctg(-jz/0) = -\pi/2 = \text{const.}$$

Действительно, как следует из формулы Эйлера

$$e^{\pm\pi/2} = \cos(\pm\frac{\pi}{2}) + j\sin(\pm\frac{\pi}{2}) = \pm j. \quad (2.16)$$

Поэтому умножение на $-j$ мнимой части комплексного сопротивления при нулевой действительной части означает, что вектор с длиной равной полному сопротивлению поворачивается по часовой стрелке на угол $-\pi/2$ (-90 град.) и остается неизменно в таком положении вне зависимости от того, как бы не менялась частота.

Тогда MATLAB-выражения для вычисления зависимости комплексного сопротивления будут иметь вид.

После ввода исходных данных

```
uc=15+i*25;
```

```
c=10e-6;
```

```
fnach=30;
```

```
fkon=1e3;
```

и формирования массива (вектор-строки) частот

```
n1=1000;
```

```
ff=linspace(fnach,fkon,n1);
```

```
ww=2*pi.*ff;
```

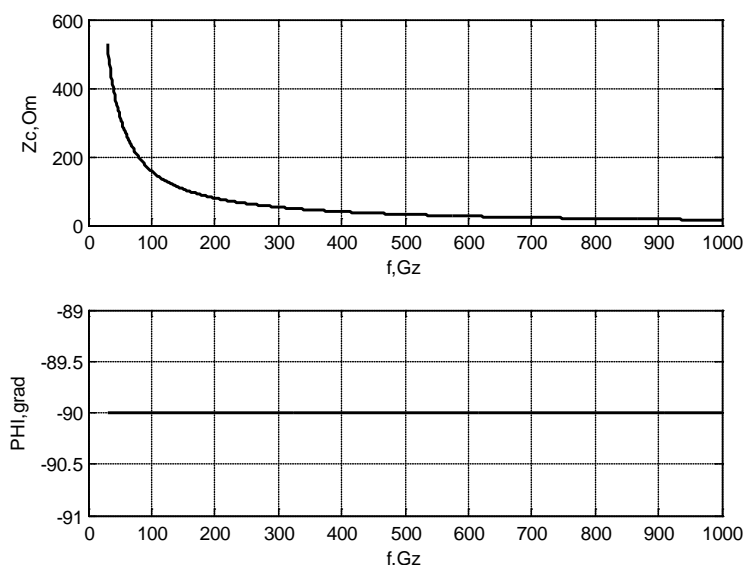


Рис. 2.2. Графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления идеального конденсатора от частоты

рассчитываем величину комплексного сопротивления, его модуля и аргумента (в радианах и градусах) и, наконец,

```
zcf=1./(i*c.*ww);  
zcmof=abs(zcf);  
zcfargrad=angle(zcf);  
zcfarggrad=zcfargrad.*180/pi;
```

строим требуемые графики

```
subplot(2,1,1);plot(ff,zcmof,'k','linewidth',2);grid on  
xlabel('f,Gz');ylabel('Zc,Om');  
subplot(2,1,2);plot(ff,zcfarggrad,'k','linewidth',2);grid on  
xlabel('f,Gz');ylabel('PHI,grad');
```

После нажатия клавиши ENTER получим графики, как на рис. 2.2.

Задача 4.

Используя исходные данные, что и в задаче 2, построить векторную диаграмму тока и напряжения на идеальном конденсаторе (емкостном элементе). Чтобы выяснить, что произойдет с диаграммой при изменении частоты, постройте вторую диаграмму, но для частоты $F_2 = 2f$.

Решение.

Сначала непосредственно введем исходные данные для расчета, используя следующие MATLAB-выражения,

```
uc=15+i*25;  
c=10e-6;  
f=50;  
w=2*pi*f;  
zc=1/(i*w*c);
```

и, затем, рассчитав требуемый ток,

```
ic=uc/zc;
```

построим векторную диаграмму

```
veku=[uc ic];  
compass(veku)
```

После нажатия клавиши ENTER получаем векторную диаграмму, показанную на рис. 2.3. Как видно из диаграммы имеется всего один вектор. Ошибка такого подхода к построению векторной диаграммы состояла в том, что длины векторов тока и напряжения существенно раз-

личаются по величине, поэтому, видя один вектор, мы совершенно не замечаем другой из-за его малой длины.

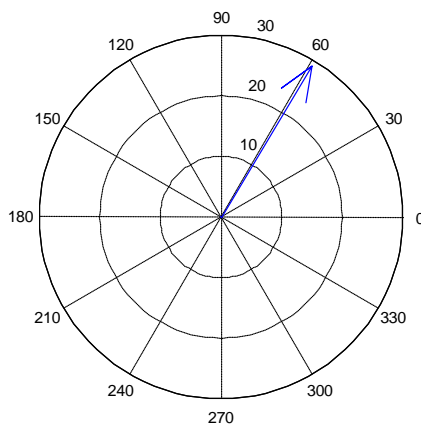


Рис. 2.3. Векторная диаграмма тока и напряжения, построенная без нормирования величин

Для того, чтобы видеть оба вектора надо сделать их примерно равной длины. Такую операцию можно осуществить, если пронормировать оба вектора. Кроме того, для удобства восприятия векторной диаграммы, имеет смысл строить вектор напряжения черным цветом, а вектор тока синим. Также, зная, что при печати цвета пропадут, будем помечать вектор напряжения надписью.

Следующие MATLAB-выражения позволяют осуществить построение желаемой векторной диаграммы

```
uc=15+i*25;  
c=10e-6;  
f=50;  
w=2*pi*f;  
zc=1/(i*w*c);  
ic=uc/zc;  
ucmax=max(abs(uc));  
icmax=max(abs(ic));  
ucotn=uc/ucmax;  
icotn=ic/icmax;  
compass(ucotn,'k'); hold on; compass(icotn); gtext('Uc')
```

После нажатия клавиши ENTER получаем векторную диаграмму, показанную на рис. 2.4.

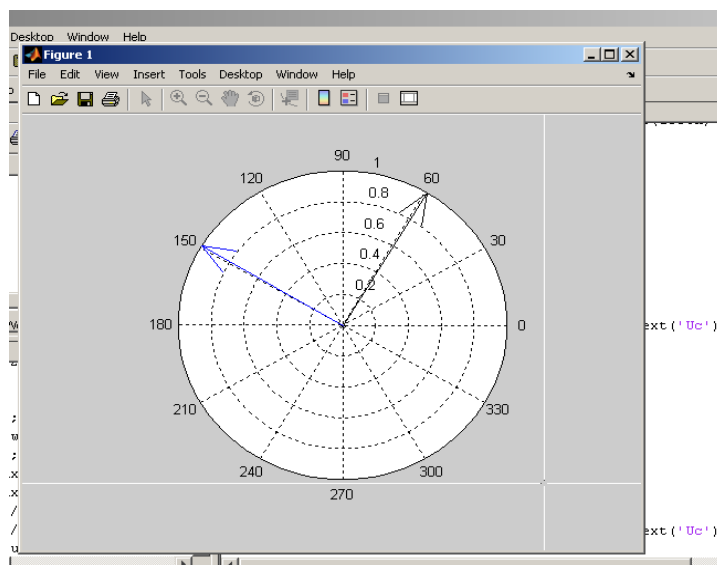


Рис. 2.4. Векторная диаграмма с перекрестьем для позиционирования текста

Оператор `gtext('Uc')` осуществляет позиционирование текста «Uc» с помощью мыши. Поэтому с появлением векторной диаграммы появится перемещаемый мышью маркер в виде перекрестия. Установив мышью перекрестье в нужное место, достаточно нажать левую кнопку мыши, чтобы в требуемом месте (в нашем случае вблизи конца вектора напряжения, имеющего черный цвет) появилась надпись (рис. 2.5)..

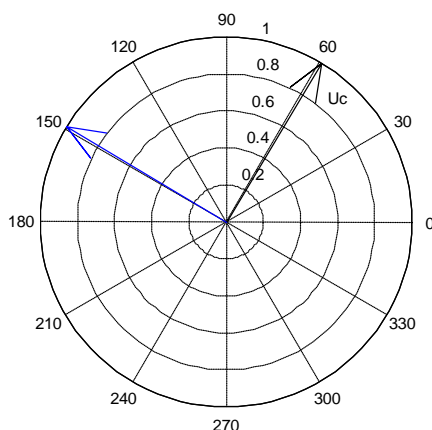


Рис. 2.5. Векторная диаграмма пронормированных тока и напряжения на емкостном элементе на частоте 50 Гц

Высокая точность позиционирования надписи и быстрота процесса делает данный способ нанесения надписей на графики одним из более удобных

Векторная диаграмма тока и напряжения для вдвое большей частоты 100 Гц показана на рис. 2.6.

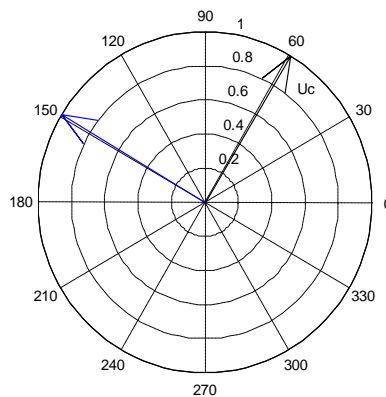


Рис. 2.6. Векторная диаграмма пронормированных тока и напряжения на емкостном элементе на частоте 100 Гц

Задача 5.

Используя исходные данные задачи 2, построить зависимости тока, напряжения, энергии и мощности на идеальном конденсаторе в системе координат, когда по оси абсцисс откладывается время.

Решение.

Приведем MATLAB-выражения для решения задачи:

```
uc=15+i*25;
c=10e-6;
f=50
w=2*pi*f;
zc=1/(i*w*c);
z2=zc
u2=uc;
u2m=abs(u2)
psiurad2=angle(u2);
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2
```

```

iz2=u2./z2;
iz2m=abs(iz2)
psiirad2=angle(iz2);
psiigrad2=(180/pi)*psiirad2
phirad=psiurad2-psiirad2;
phigrad=(180/pi)*phirad
w1=2*pi*f;
psirad1=psiurad2;
a1=-1*(abs(psirad1)+pi/1)/w1;
b1=(abs(psirad1)+2*pi)/w1;
n=300;
t1=linspace(a1,b1,n);
umt1=u2m;
ut1=umt1*cos(w1*t1+psirad1);
psiradi2=psiirad2;
t2=t1;
imt1=iz2m;
it1=imt1*cos(w1*t1+psiradi2);
pt1=it1.*ut1;
mwt=max(ut1)^2;
wt=(ut1.^2)./mwt;
subplot(411);plot(t1,ut1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('u(t), B');
subplot(412);plot(t2,it1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t2,wt,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t2,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем числовые данные, характеризующие частоту, сопротивление, напряжение, ток, а также графиче-

ки мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на емкостном элементе, показанные на рис. 2.7.

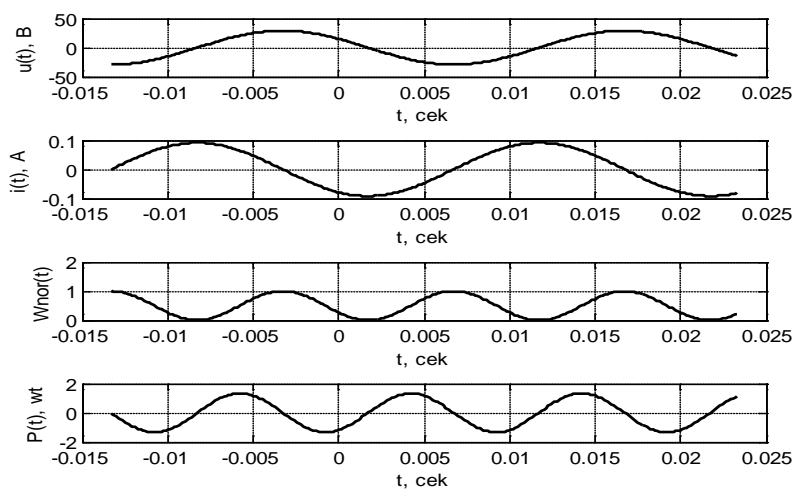


Рис. 2.7. Графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на емкостном элементе

$f =$
 50
 $z_2 =$
 $0 - 3.1831e+002i$
 $u_{2m} =$
 29.1548
 $\psi_{i\text{grad}2} =$
 59.0362
 $i_{z2m} =$
 0.0916
 $\psi_{i\text{grad}2} =$
 149.0362
 $\phi_{i\text{grad}} =$
 -90.

Задача 6.

Решить задачу 5, используя то обстоятельство, что ток, протекающий через емкость, определяется следующим соотношением

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}.$$

Решение.

Позволяют осуществить решение задачи следующие MATLAB-выражения, выполняющие дифференцирование напряжения

```

uc=15+i*25;
c=10e-6;
f=50
w=2*pi*f;
zc=1/(i*w*c);
z2=zC
u2=uc;
u2m=abs(u2)
psiurad2=angle(u2);
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2
w1=2*pi*f1;
psirad1=psiurad2;
a1=-1*(abs(psirad1)+pi/1)/w1;
b1=(abs(psirad1)+2*pi)/w1;
n=300;
t3=linspace(a1,b1,n);
umt1=u2m;
ut1=umt1*cos(w1*t3+psirad1);
delt=(b1-a1)/n;
itd=(c/delt).*diff(ut1);
ut1d=ut1(1:end-1);
t1=t3(1:end-1);
pt1=itd.*ut1d;
mwt=max(ut1)^2;
imd=max(itd)
wt=(ut1.^2)./mwt;
wtd=wtd(1:end-1);
subplot(411);plot(t1,ut1d,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, сек');
ylabel('u(t), В');
subplot(412);plot(t1,itd,'k','linewidth',2);grid on

```

```

xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t1,wtd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t1,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем искомые значения величин и графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на емкостном элементе, показанные на рис. 2.8.

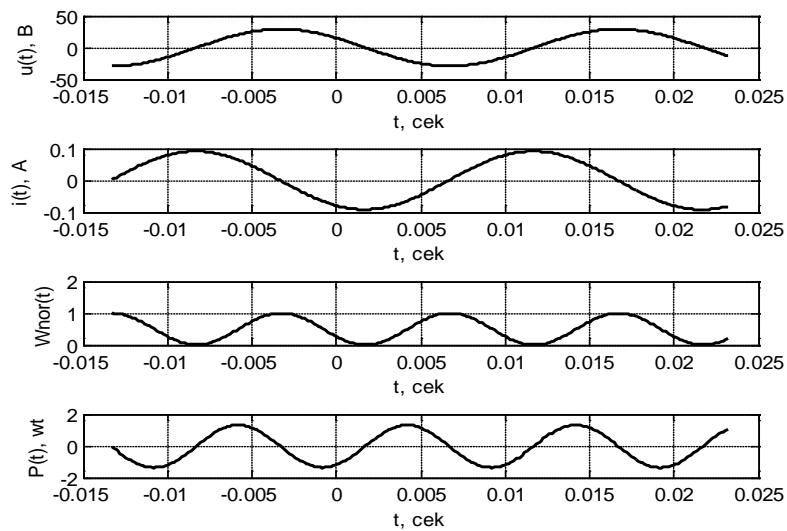


Рис. 2.8. Графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на емкостном элементе, построенные с

использованием выражения $i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$.

f =

50

z2 =

0 -3.1831e+002i

u2m =

29.1548

psiugrad2 =

59.0362

imd =

0.0919

Задача 7.

К конденсатору приложено импульсное напряжение в форме симметричного треугольного импульса (рис. 2.9). Амплитуда импульса 11В, длительность 100 мс. Импульс анализируется на временном интервале 150 мс. Построить для идеального конденсатора (емкостного элемента) зависимости тока, напряжения, энергии и мощности от времени.

Решение.

1. Для получения математической модели импульсного сигнала, заданного графически в виде кусочно-линейных прямых, вначале определим такие его точки $\{t_K, u_K(t_K)\}_{K=1}^{K=N_{KON}}$, которые оказывают существенное влияние на формирование формы сигнала. Это точки, в которых график сигнала претерпевает излом. Эти точки «разбивают» сигнал на $(N_{KON}-1)$ элементарных сигналов (линий, прямых), расположенных на $(N_{KON}-1)$ интервалах. Для симметричного треугольного импульса это точки начала координат, вершины и окончания импульса, точка окончания интервала на котором анализируется сигнал (чтобы было заметно линия замыкающая интервал анализа слегка приподнята над осью абсцисс).

Представим эти точки в виде таблицы 2.1. Точки t_K назовем узлами интерполяции, а ординаты этих точек, определяющие значения сигнала в узлах интерполяции, $u_K(t_{NKON-1})$, будем именовать опорными точками.

Для заданного по условиям задачи импульсного напряжения таблица 2.1 примет вид таблицы 2.2.

2. Для числовых табличных данных, представляющих сигнал всего в $(N_{KON}-1)$ точках, подберем функцию, совпадающую с $u(t)$ для табличных значений. Из математики известно, что подобная замена табличной функции иной, проходящей через эти точки, функцией, определенной на всем временном интервале, называется интерполяцией

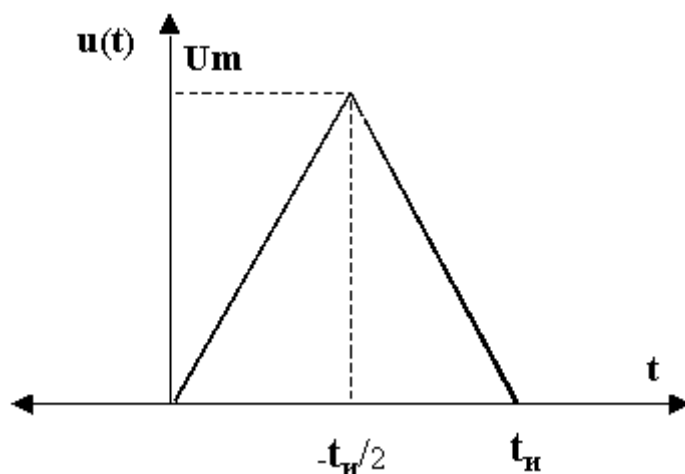


Рис. 2.9. График импульсного напряжения по форме имеющего вид симметричного треугольного импульса

Таблица 2.1

K	1	2	3	(N _{KON} -1)
t _K	t ₁	t ₂	t ₃	t _{N_{KON}-1}
u _K (t _K)	u ₁ (t ₁)	u ₂ (t ₂)	u ₃ (t ₃)	u _K (t _{N_{KON}-1})

Таблица 2.2

K	1	2	3	(N _{KON} -1)
t _K	0	t _H /2	t _H	t _{KON}
u _K (t _K)	0	U _m	0	0

Самым простым видом интерполяции является *линейная интерполяция*, когда две соседние опорные точки соединяются прямой линией, а промежуточные значения определяются уравнением прямой. При этом количество анализируемых точек новой функции должно быть таким, чтобы график сигнала представлял однородную линию.

Для проведения линейной интерполяции воспользуемся встроенной в MATLAB функцией UNOV=INTERP1(t,U,tNOV). Соответственно, для работы с ней в MATLAB-выражениях надо задать 3 вектор-строки исходных данных:

- а) вектор-строку узлов интерполяции t .
- б) вектор-строку опорных точек U .

в) вектор-строку новых значений времен t_{NOV} , в которых будет вычисляться значение сигнала $UNOV$ после проведения интерполяции.

Вычисленные значения новой функции будут представлены вектор – строкой ординат $UNOV$ и вектор строкой абсцисс t_{NOV} сигнала.

Приведем MATLAB-выражения для решения задачи.

Вводим исходные данные, задавая амплитуду импульса, количество точек в которых хотим получить значения новой функции и время окончания анализа импульсного сигнала.

```
um=11;  
nn=300;  
tkon=150e-3;
```

Формируем вектор строку всех тех новых значений времен t_{NOV} в которых вычисляется значение сигнала

```
t4=linspace(0, tkon,nn+1);
```

Задаем вектор-строку узлов интерполяции t .

```
tt=[0 50e-3 100e-3 150e-3];
```

Задаем вектор строку опорных точек U

```
upr1=[0 um 0 0];
```

Вычисляем вектор-строку $up2$ всех тех новых значений сигнала $UNOV$ после проведения интерполяции.

```
up2=interp1(tt,upr1,t4);
```

Осуществляем построение графика

```
tnov=t4(1:end-1);  
unov=up2(1:end-1);  
n=nn;  
ut1=unov;  
delt=(tkon)/n;  
itd=(c/delt).*diff(ut1);  
ut1d=ut1(1:end-1);  
t1=tnov(1:end-1);  
pt1=itd.*ut1d;  
mwt=max(ut1)^2;  
imd=max(itd)  
wt=(ut1.^2)./mwt;  
wtd=wt(1:end-1);  
subplot(411);plot(t1,ut1d,'k','linewidth',2);grid on
```

```

xlabel('t, cek');
ylabel('u(t), B');
subplot(412);plot(t1,itd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t1,wtd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t1,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем искомые графики, показанные на рис. 2.10.

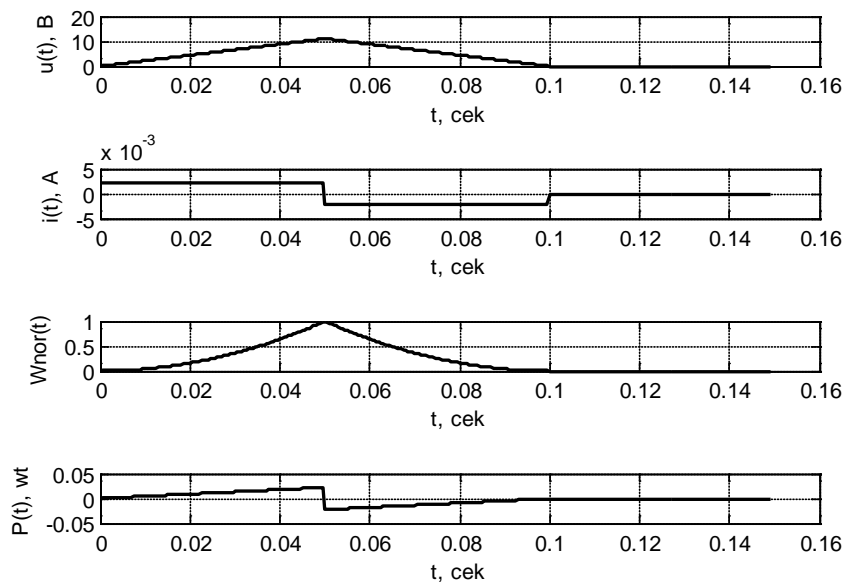


Рис. 2.10. Зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на емкостном элементе, для треугольного импульса..

Задача 8.

К конденсатору приложено импульсное напряжение в форме двух прямоугольных импульсов с амплитудами 11 В. Длительность первого импульса 40 мс., второго – 20 мс. Первый импульс начинается при $t = 0$, второй появляется по истечении времени равного 60 мс. Импульсы анализируются на интервале в 150 мс. Построить для идеального конденсатора зависимости тока, напряжения, энергии и мощности от времени.

Решение.

Проделав действия, аналогичные приведенным в задаче 7, получаем MATLAB-выражения позволяющие решить задачу 8. Следует иметь в виду, что прямоугольные импульсы при $t = 0$ мс, $t = 60$ мс и после окончания импульсов имеет точки разрыва первого рода (бесконечно малые фронт и спад). Поэтому для осуществления интерполяции искусственно вводим фронт и спад конечной, но малой величины. К примеру, считаем, что при $t = 0$ мс напряжение равно нулю, а при $t = 1$ мс оно линейно достигает амплитуды импульса. Аналогично, при длительности первого импульса $t = 40$ мс напряжение равно амплитуде, а при $t = 41$ мс оно линейно достигает нулевой величины. Также поступаем с заданием узлов интерполяции и опорных точек для второго импульса. Следующие MATLAB-выражения позволяют осуществить решение задачи

```
um=11;
nn=300;
tkon=150e-3;
t4=linspace(0, tkon,nn+1);
tt=[0 1e-3 40e-3 41e-3 60e-3 61e-3 80e-3 81e-3 150e-3];
upr1=[0 um um 0 0 um um 0 0];
up2=interp1(tt,upr1,t4);
tnov=t4(1:end-1);
unov=up2(1:end-1);
n=nn;
ut1=unov;
delt=(tkon)/n;
itd=(c/delt).*diff(ut1);
ut1d=ut1(1:end-1);
t1=tnov(1:end-1);
pt1=itd.*ut1d;
mwt=max(ut1)^2;
imd=max(itd)
wt=(ut1.^2)./mwt;
wtd=wt(1:end-1);
subplot(411);plot(t1,ut1d,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, сек');
```

```

ylabel('u(t), B');
subplot(412);plot(t1,itd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t1,wtd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t1,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем искомые графики, показанные на рис. 2.11.

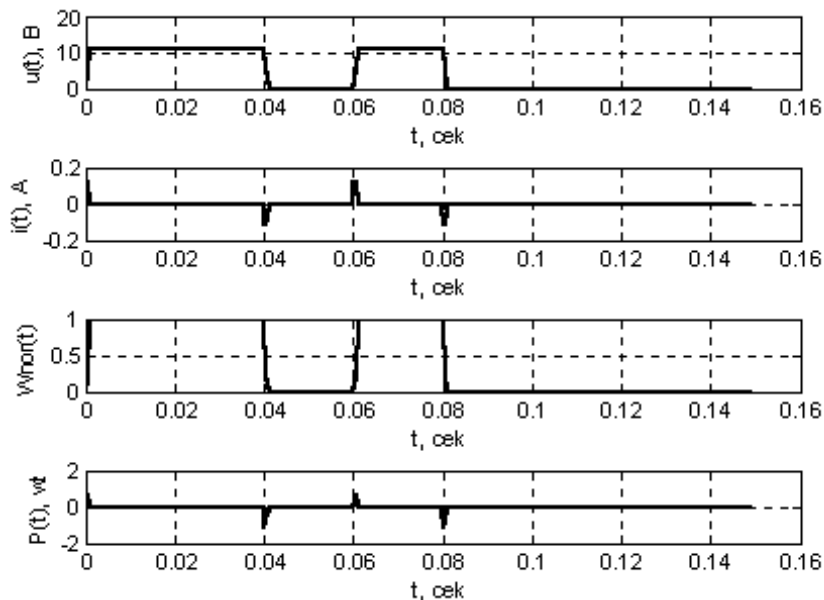


Рис. 2.11. Графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на емкостном элементе, построенные для двух прямоугольных импульсов

Задача 9.

Определить комплексное и полное сопротивление идеальной катушки индуктивности (индуктивного элемента) с индуктивностью равной $L = 10$ мГн, если она подключена к источнику ЭДС, вырабатывающему гармоническое напряжение $U = (15 + j25)$ В с частотой $f = 50$ Гц. Подтвердить, что катушка индуктивности является реактивным элементом, имеющим только мнимую часть сопротивления.

Решение.

По определению комплексное сопротивление идеальной катушки индуктивности определяется выражением

$$\dot{Z}_L(j\omega) = j\omega L = j2\pi f.$$

Поэтому для вычисления комплексного сопротивления в командном окне MATLAB надо набрать следующие MATLAB-выражения

```
ul=15+i*25;  
l=10e-3;  
f=50;  
w=2*pi*f;  
zl=i*w*l;  
zlmod=abs(zl)  
zlarrad=angle(zl)  
zlarggrad=zlarrad*180/pi  
realzl=real(zl)  
imagzl=imag(zl)
```

После нажатия клавиши ENTER получаем искомые величины

```
zlmod =  
    3.1416  
zlarrad =  
    1.5708  
zlarggrad =  
    90  
realzl =  
    0  
imagzl =  
    3.1416
```

Задача 10.

Используя исходные данные задачи 9, определить, как комплексное сопротивление идеальной катушки индуктивности зависит от частоты. Построить графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления от частоты для диапазоне частот от 30 Гц до 1 кГц.

Решение.

Комплексное сопротивление идеальной катушки индуктивности определяется выражением $\dot{Z}_L(j\omega) = j\omega L = j2\pi f$. Следовательно, полное

сопротивление с частотой связано прямо пропорциональной зависимостью. Аргумент комплексного сопротивления от частоты не зависит.

$$\arg(\dot{Z}_L) = \arctg(jz/0) = \pi/2 = const.$$

Тогда MATLAB-выражения для вычисления зависимости комплексного сопротивления будут иметь вид.

```
ul=15+i*25;  
l=10e-3;  
fnach=30;  
fkon=1e3;  
n1=1000;  
ff=linspace(fnach,fkon,n1);  
ww=2*pi.*ff;  
zlf=i*ww*l;  
zlmodf=abs(zlf);  
zlfarrad=angle(zlf);  
zlfarggrad=zlfarrad.*180/pi;  
subplot(2,1,1);plot(ff,zlmodf,'k','linewidth',2);grid on  
xlabel('f,Gz');ylabel('ZL,Om');  
subplot(2,1,2);plot(ff,zlfarggrad,'k','linewidth',2);grid on  
xlabel('f,Gz');ylabel('PHI,grad');
```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления от частоты, показанные на рис. 2.12.

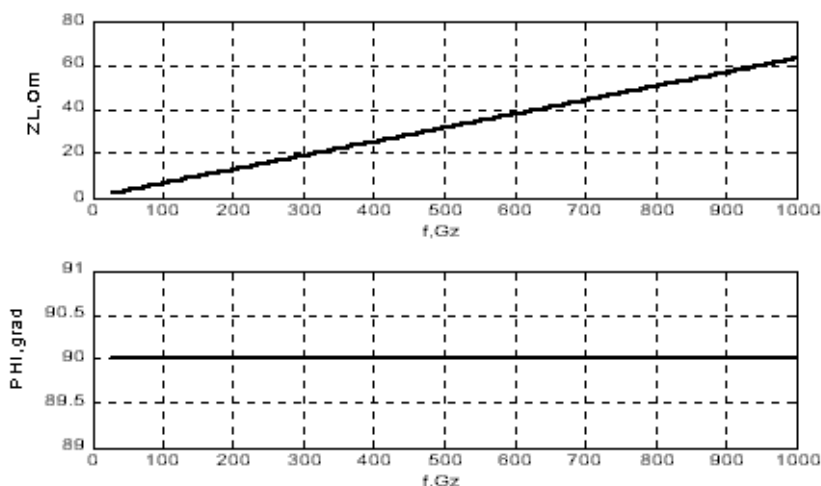


Рис. 2.12. Графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления от частоты для индуктивного элемента

Задача 11.

Используя исходные данные, что и в задаче 9, построить векторную диаграмму тока и напряжения на идеальной катушке индуктивности.

Решение.

Осуществить решение задачи, при условии нормирования величин и позиционирования надписи, аналогично тому, как было сделано в задаче 4, позволяют следующие MATLAB-выражения

```
ul=15+i*25;  
l=10e-3;  
f=50;  
w=2*pi*f;  
zl=i*w*l;  
il=ul/zl;  
ulmax=max(abs(ul));  
ilmax=max(abs(il));  
ulotn=ul/ulmax;  
ilotn=il/ilmax;  
vekuiot=[ulotn, ilotn];  
zlmod=abs(zl)  
zlarrad=angle(zl);  
zlarggrad=zlarrad*180/pi  
compass(ulotn,'k');gtext('UL'); hold on; compass(ilotn)
```

После нажатия клавиши ENTER и позиционирования надписи получаем искомые величины и векторную диаграмму, показанную на рис.

2.13. $zlmod = 3.1416$ $zlarggrad = 90$

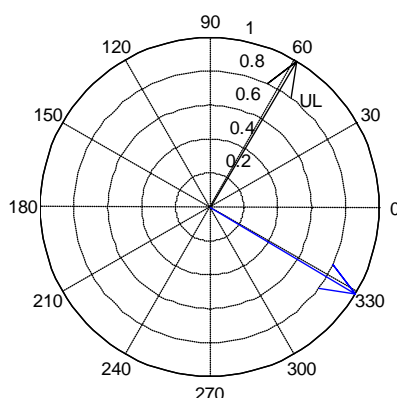


Рис. 2.13. Векторная диаграмма тока и напряжения на индуктивном элементе на частоте 50 Гц.

Задача 12.

Комплексная амплитуда тока, протекающего через катушку индуктивности равна $I = (7.9577 - i * 4.7746)$ А. Частота изменения тока 50 Гц. Построить зависимости тока, напряжения, энергии и мощности на идеальной катушке индуктивности $L = 10$ мГн (индуктивном элементе) в системе координат, когда по оси абсцисс откладывается время. *Решение.*

Позволяют осуществить решение задачи следующие MATLAB-выражения

```
il=7.9577-i*4.7746;
l=10e-3;
f=50;
w=2*pi*f;
zl=i*w*l;
ul=il*zl;
u2=u1;
u2m=abs(u2)
psiurad2=angle(u2);
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2
iz2m=abs(il)
psiirad2=angle(il);
psiigrad2=(180/pi)*psiirad2
phirad=psiurad2-psiirad2;
phigrad=(180/pi)*phirad
w1=2*pi*f;
psirad1=psiurad2;
a1=-1*(abs(psirad1)+pi/1)/w1;
b1=(abs(psirad1)+2*pi)/w1;
n=300;
t1=linspace(a1,b1,n);
umt1=u2m;
ut1=umt1*cos(w1*t1+psirad1);
psiradi2=psiirad2;
t2=t1;
imt1=iz2m;
it1=imt1*cos(w1*t1+psiradi2);
pt1=it1.*ut1;
```

```

mwt=max(it1)^2;
wt=(it1.^2)./mwt;
subplot(411);plot(t1,ut1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('u(t), B');
subplot(412);plot(t2,it1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t2,wt,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t2,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем искомые величины и графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности, показанные на рис. 2.14.

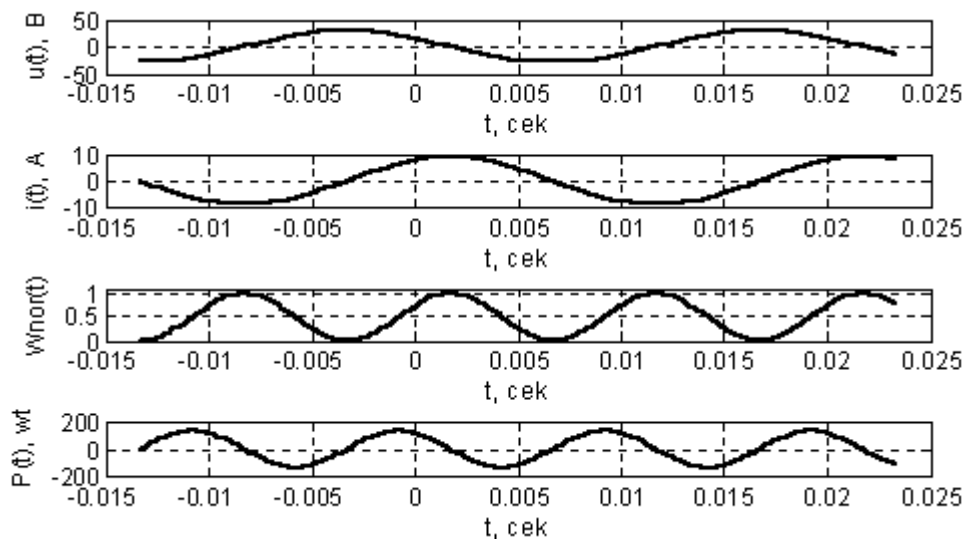


Рис. 2.14. Графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на индуктивном элементе

```

u2m =
    29.1546
psiugrad2 =
    59.0363
iz2m =
    9.2802

```

```
psiigrad2 =  
-30.9637  
phigrad =  
90
```

Задача 13.

Решить задачу 12, используя то, что напряжение и ток на индуктивной катушке связаны следующим соотношением $u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$.

Решение.

Для решения задачи используем следующие MATLAB-выражения, осуществляющие дифференцирование тока

```
il=7.9577-i*4.7746;  
l=10e-3;  
f=50;  
w=2*pi*f;  
zl=i*w*l;  
ul=il*zl;  
u2=u1;  
u2m=abs(u2)  
psiurad2=angle(u2);  
psiugrad2=(180/pi)*psiurad2  
w1=2*pi*f;  
psirad1=psiurad2;  
a1=-1*(abs(psirad1)+pi/1)/w1;  
b1=(abs(psirad1)+2*pi)/w1;  
i2m=abs(il)  
psiirad2=angle(il);  
n=300;  
t3=linspace(a1,b1,n);  
umt1=u2m;  
ut1=umt1*cos(w1*t3+psirad1);  
ip1=i2m*cos(w1*t3+psiirad2);  
delt=(b1-a1)/n;  
uld=(l/delt).*diff(ip1);  
ut1d=uld(1:end);
```

```

it1d=ip1(1:end-1);
t1=t3(1:end-1);
pt1=it1d.*ut1d;
mwt=max(it1d)^2;
wt=(it1d.^2)./mwt;
wtd=wt(1:end);
subplot(411);plot(t1,ut1d,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('u(t), B');
subplot(412);plot(t1,it1d,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t1,wtd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t1,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем искомые величины и графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности, показанные на рис. 2.15.

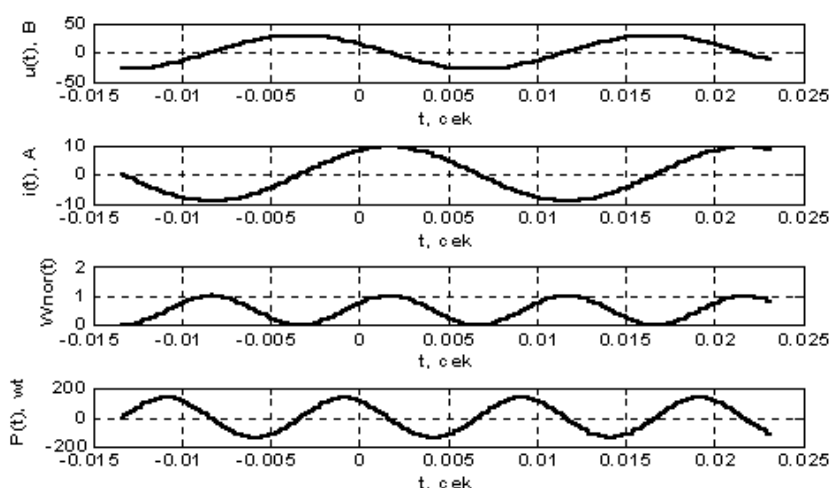


Рис. 2.15. Графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на индуктивном элементе, построенные с

использованием выражения $u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$.

Задача 14.

В телевизионных системах строчной развертки через катушку индуктивности ($L = 500$ мкГн) отклоняющей системы протекает импульсный ток имеющий вид пилообразного треугольного импульса (рис. 2.16). Амплитуда импульса 6 А, длительность прямого хода развертки 50 мкс, длительность обратного хода развертки 14 мкс. Импульс анализируется на временном интервале 70 мкс. Построить для этой катушки индуктивности зависимости тока, напряжения, энергии и мощности от времени.

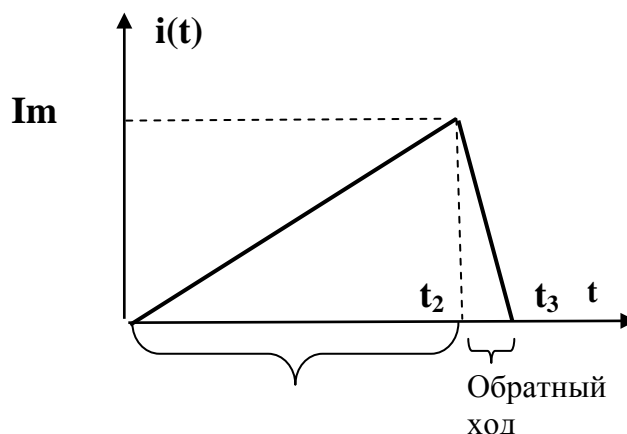


Рис. 2.16. График импульсного тока пилообразного треугольного импульса, протекающего через катушку индуктивности

Приведем MATLAB-выражения для решения задачи:

```
im=6;
l=200e-6;
nn=600;
tkon=70e-6;
t4=linspace(0, tkon,nn+1);
tt=[0 50e-6 64e-6 70e-6];
ipr1=[0 im 0 0];
ip2=interp1(tt,ipr1,t4);
tnov=t4(1:end-1);
inov=ip2(1:end-1);
n=nn;
it1=inov;
delt=(tkon)/n;
utd=(l/delt).*diff(it1);
it1d=it1(1:end-1);
```

```

t1=tnov(1:end-1);
pt1=utd.*it1d;
mwt=max(it1)^2;
umd=max(utd)
umdotr=-max(abs(utd))
wt=(it1.^2)./mwt;
wtd=wtd(1:end-1);
subplot(411);plot(t1,utd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('u(t), B');
subplot(412);plot(t1,it1d,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('i(t), A');
subplot(413);plot(t1,wtd,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('Wnor(t)');
subplot(414);plot(t1,pt1,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, cek');
ylabel('P(t), wt');

```

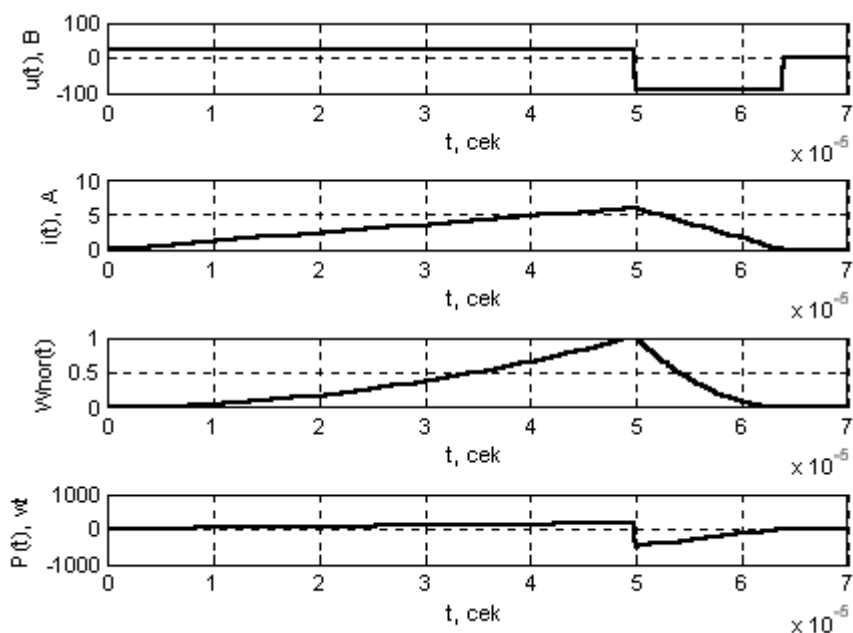


Рис. 2.17. Графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на катушке индуктивности отклоняющей системы телевизора для пилообразного треугольного импульса

После нажатия клавиши ENTER получаем амплитуды положительного и отрицательного импульсов напряжения на катушке и графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности, показанные на рис. 2.17.

umd =

24.0000

umdotr =

-85.7143.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте общие положения, позволяющие рассчитывать необходимые параметры аккумулятора.
2. Как определяется номинальный ток заряда аккумулятора?
3. Как определяется мощность при зарядке и разрядке аккумулятора?
4. Каким выражением определено комплексное сопротивление идеального конденсатора? Какое значение имеет емкостное сопротивление?
5. Опишите последовательность получения математической модели импульсного сигнала, заданного графически в виде кусочно-линейных прямых.
6. Что называется интерполяцией функции? Какие виды Вы знаете?
7. Что означают понятия: узлы интерполяции и опорные точки?
8. Как определяется комплексное сопротивление идеальной катушки индуктивности? Определить как оно зависит от частоты.
9. Охарактеризуйте график импульсного тока пилообразного треугольного импульса. Приведите пример применения токов такой формы.
10. Поясните графики зависимости мгновенных значений напряжения, тока, энергии и мощности на катушке индуктивности отклоняющей системы телевизора для пилообразного треугольного импульса.

2.2. Лабораторная работа № 2

Измерение характеристик и параметров компонентов электрической цепи

2.2.1. Цели работы

1. Углубить и закрепить знания о понятиях и параметрах, характеризующих компоненты электрической цепи.

2. Сформировать практические умения математической записи временных зависимостей тока, напряжения, мощности, формул для оценки их сопротивлений для основных компонентов электрической цепи, а также построения для них графиков, численной оценки и измерений их параметров с помощью контрольно-измерительной аппаратуры.

3. Выработать умения практической работы с моделирующей программой (программным эмулятором) ELECTRONICS WORKBENCH, необходимые для оценки параметров компонентов электрической цепи.

2.2.2. Самостоятельная работа студентов

Перед выполнением лабораторной работы студенту необходимо.

1. Изучить теорию, которой пользуются в электротехнике для оценки, характеристики и расчетов компонентов электрической цепи, понятия, которыми характеризуют компоненты электрической цепи

2. Провести самопроверку эффективности своей теоретической подготовки, ответив на вопросы из раздела «Контрольные вопросы».

3. Изучить средства и способы проведения эксперимента, краткие описания измерительных приборов и методов измерений, используемых в работе. В результате исполнения этого пункта студент должен уметь объяснять порядок выполнения работы и то, какие результаты он ожидает получить.

4. Подготовить отчет о лабораторной работе.

В тетради изобразить принципиальные схемы экспериментов.

В тетради подготовить таблицы, в которые будут записываться данные, полученные в результате проведения экспериментов.

Подготовить оси координат графиков, необходимых для изображения исследуемых сигналов или осциллограм.

Выполняя предыдущее надо помнить, что схемы, таблицы, результаты исследований помещаются в рабочей тетради отдельно по каждому пункту задания, желательно на отдельных страницах отчета.

Для заданного преподавателем типа гальванического элемента определить величину сопротивления нагрузки, при котором будет передаваться максимальная мощность от источника в нагрузку.

Построить схему замещения гальванического элемента в виде соединения как ИИН, так и ИИТ с резистивным элементом (проводимостью) расчетной величины.

Для заданного преподавателем типа аккумулятора определить с величину тока его заряда и форму тока, обеспечивающую наилучшие условия заряда.

Для заданного преподавателем варианта импульсного тока $i(t)$, выраженного через временные отрезки (интервалы), изобразить графики временных зависимостей тока, напряжения, мощности для емкостного элемента. Пояснить, что происходит с энергией на каждом интервале и как на каждом временном отрезке можно условно представить емкостной элемент (посредством КЗ и ИИН).

Для заданного преподавателем варианта импульсного напряжения $u(t)$, выраженного через временные отрезки (интервалы), изобразить графики временных зависимостей тока, напряжения, мощности для индуктивного элемента. Пояснить, что происходит с энергией на каждом интервале и как на каждом временном отрезке можно условно представить емкостной элемент (посредством разрыва и ИИТ).

2.2.3. Средства и способы проведения эксперимента

Лабораторная работа выполняется на IBM PC с использованием моделирующей элементы и устройства электрической цепи программы (программного эмулятора) ELECTRONICS WORKBENCH. В лабораторной работе для проведения экспериментов, используются амперметр и вольтметр, позволяющие измерять напряжение, силу тока. Пиктограммы приборов («иконки») показаны на рис. 2.18 слева вверху.

Для визуального наблюдения графиков зависимостей напряжения от частоты – амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазы от частоты – фазо-частотной характеристики (ФЧХ) используется измери-

тель частотных характеристик (Bode Plotter). Иконка прибора и развернутое крупное его изображение, показаны на рис. 2.18. Для получения развернутого изображения прибора необходимо навести указатель мыши на иконку прибора и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши. На иконке прибора показаны входные клеммы (порт входа - IN) и выходные (порт выхода -OUT).

На экране измерителя частотных характеристик имеются оси координат и перемещающаяся в любое место экрана визирная линейка. Переместив указатель мыши на линейку и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, устанавливается требуемая точка пересечения визирной линейки и графика $u = F(f)$ или $\varphi = F(f)$. Расположенные справа внизу экрана цифровые дисплеи покажут значения амплитуды (фазы) и частоты для выбранной точки. Визирную линейку можно перемещать кнопками «←» и «→». Максимальное F и минимальное значение I осей координат устанавливается в соответствующих окошках справа экрана.

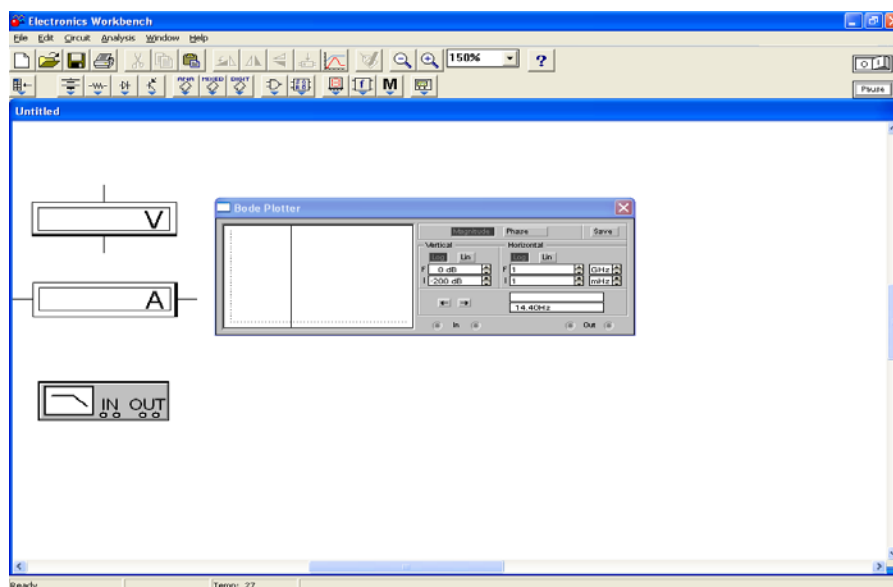


Рис. 2.18. Пример изображения «окна» Electronics Workbench с вольтметром, амперметром и измерителем амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик

При работе с измерителем частотных характеристик также требуется задавать масштаб по оси ординат и абсцисс графика. В зависимости от того, с сигналом какого вида предстоит работать, устанавливается линейный масштаб при нажатии кнопки «LIN» или логарифмический

при нажатии «LOG». Выбор того, что предстоит анализировать, АЧХ или ФЧХ, производится кнопками «MAGNITUDE» и «PHASE».

2.2.4. Порядок выполнения работы

Эксперимент 1. Исследование свойств источников напряжения

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Открыть диалоговое окно программы «Electronics Workbench». При появлении сообщения «Could not open file» нажмите кнопку «ОК».

2. Откройте необходимый файл, нажав, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2-1.

3. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.19). Она содержит ИИН, ЭДС которого остается неизменным во времени и два контрольно измерительных прибора: вольтметр и амперметр. В качестве нагрузки ИИН используются резисторы разной величины, подключаемые нажатием кнопки на клавиатуре, указанной справа ключа. При этом должен быть установлен английский алфавит.

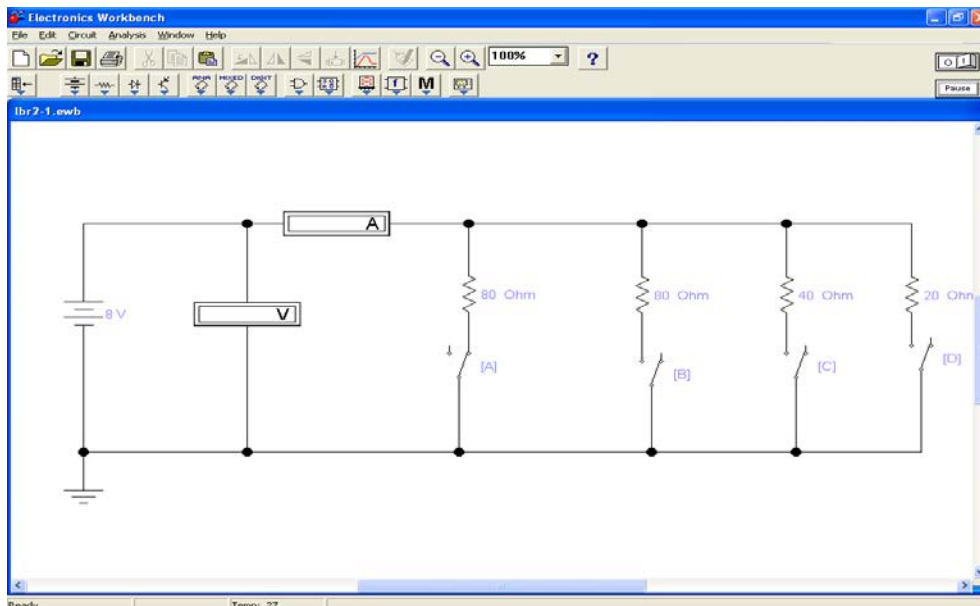


Рис. 2.19. Измерение параметров ИИН

4. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши. Символы I/O произ-

ходят от английских слов Include (I) – включить и Output (O) – выход, выключить.

5. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин напряжения U и тока I , создаваемого источником ЭДС для различных нагрузок (in – включить, off – выключить). Записать показания в таблицу 2.3.

6. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать величину мощности, отдаваемой источником в нагрузку и результаты записать в таблицу 2.3. Определить величину дифференциального сопротивления ИИН и величину статического сопротивления для случая D in.

Таблица 2.3.

Результаты исследования ИИН

	Един.изм.	A off	A in	B in	C in	D in
R	Ом	∞	80	40	20	10
U	В					
I	мА					
$P_{иин}$	мВт					

$$r = \frac{U_C - U_D}{I_D - I_C}, \quad R = \frac{U_D}{I_D}.$$

7. Откройте моделирующую программу для исследования реального источника напряжения. Для этого нажав кнопку «открыть», и затем, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-1 дать отрицательный ответ.

8. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.20). Она содержит реальный источник напряжения с внутренним сопротивлением 40 Ом, вольтметром, амперметром и набором резисторов разной величины.

9. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

10. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин напряжения U и тока I , создаваемого реальным источником напряжения для различных

нагрузок (in - включить, off - выключить). Записать величины напряжений и токов в таблицу 2.4.

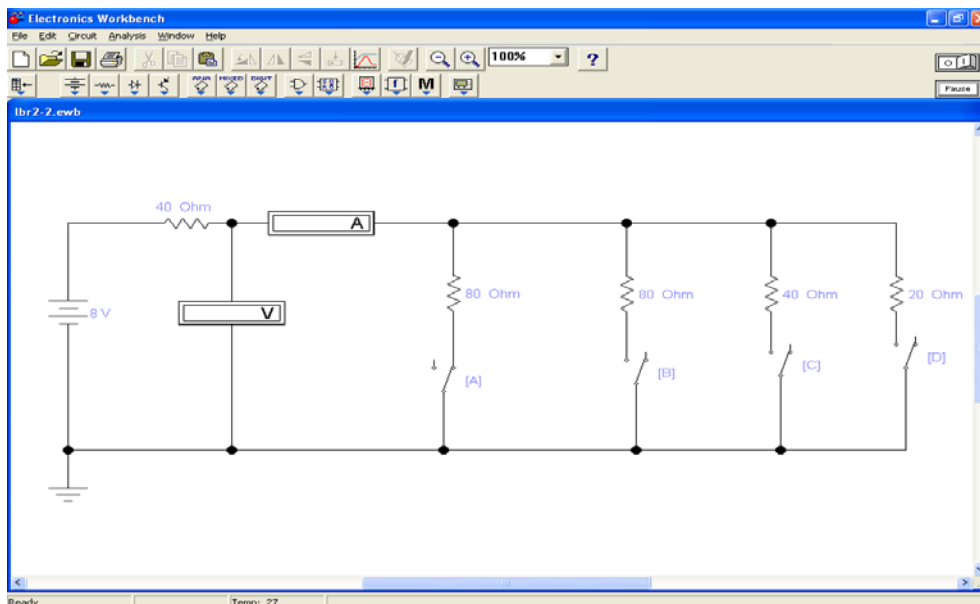


Рис. 2.20. Измерение параметров реального источника напряжения

Таблица 2.4.

Результаты исследования реального источника напряжения

	Един.изм.	A off	A in	B in	C in	D in
R	Ом	∞	80	40	20	10
<i>U</i>	В					
<i>I</i>	мА					
<i>P_{рин}</i>	мВт					

11. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать величину мощности, отдаваемой источником в нагрузку и результаты записать в таблицу 2.4. Найти величину $P_{рин}$ при которой мощность, передаваемая в нагрузку максимальна. Определить выполняется ли теоретическое соотношение. Рассчитать величину дифференциального сопротивления реального ИИН и величину статического сопротивления для случая D in.

12. Сделать выводы о наличии присущих ИИН свойств и об отличии реального источника напряжения от ИИИН.

Эксперимент 2. Исследование свойств источников тока

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав необходимое в контекстном меню и нажав кнопку «ОК», открыть файл lbr2-3. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-2 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.21). Она содержит ИИТ, ток которого остается неизменным во времени и два контрольно измерительных прибора: вольтметр и амперметр. В качестве нагрузки ИИТ используются резисторы разной величины, подключаемые нажатием кнопки на клавиатуре, указанной справа ключа. При этом должен быть установлен английский алфавит.

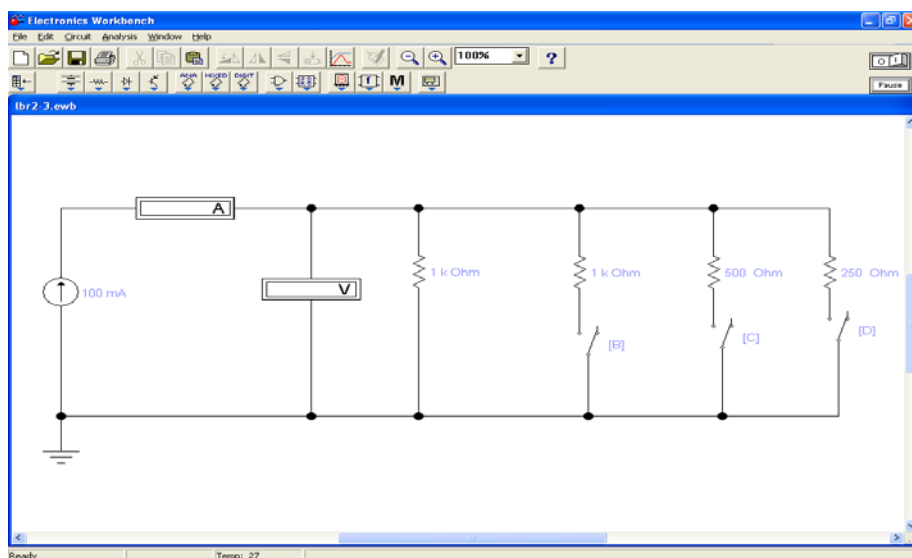


Рис. 2.21. Измерение параметров ИИТ

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин напряжения U и тока I , создаваемого ИИТ для различных нагрузок (in – включить, off – выключить). Записать величины напряжений и токов в таблицу 2.5.

5. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать величину мощности, отдаваемой источником в нагрузку и результаты записать в таблицу 2.5. Определить величину дифференциального сопротивления ИИТ и величину статического сопротивления для случая D in.

Результаты исследования ИИТ

	Един.изм.	A in	B in	C in	D in
R	Ом	1000	500	250	125
<i>U</i>	В				
<i>I</i>	мА				
<i>P_{sum}</i>	мВт				

6. Откройте моделирующую программу для исследования реального источника тока. Для этого, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2-4. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-3 дать отрицательный ответ.

7. На экране монитора появиться схема установки для эксперимента (рис. 2.22). Она содержит реальный источник тока с внутренним сопротивлением 10 кОм, вольтметром, амперметром и набором резисторов разной величины.

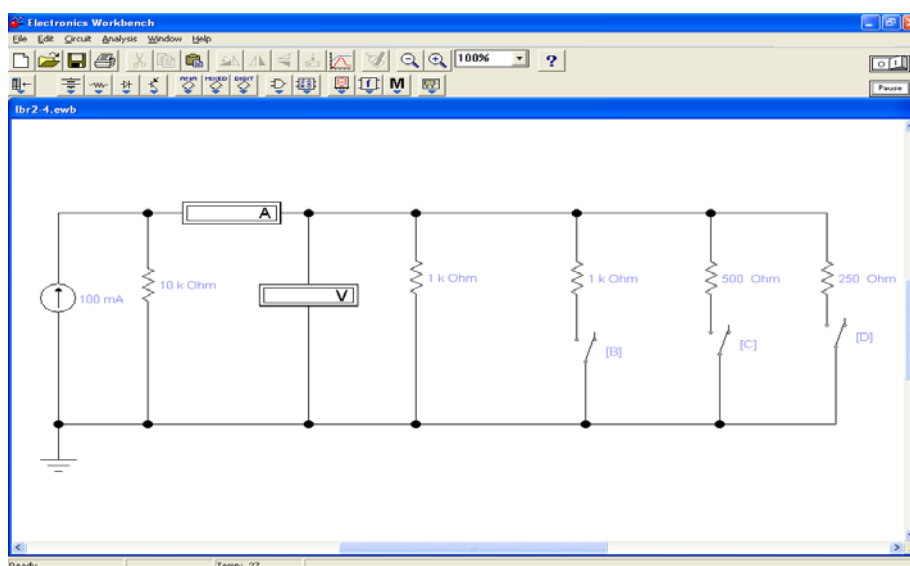


Рис. 2.22. Измерение параметров реального источника тока

8. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

9. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин напряжения U и тока I , создаваемого реальным источником напряжения для различных нагрузок. Записать величины напряжений и токов в таблицу 2.6.

Таблица 2.6.

Результаты исследования реального источника тока

	Един.изм.	A in	B in	C in	D in
R	Ом	1000	500	250	125
U	В				
I	мА				
$P_{\text{прт}}$	мВт				

10. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать мощность, отдаваемую источником в нагрузку и результаты записать в таблицу 2.6. Найти величину $P_{\text{прт}}$, при которой мощность, передаваемая в нагрузку максимальна. Рассчитать величину дифференциального сопротивления реального ИТ и величину статического сопротивления для случая D in.

11. Сделать выводы о наличии присущих ИИТ свойств и об отличии реального источника тока от ИИТ.

Эксперимент 3. Измерение параметров повторителя напряжения

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл lbr1-5. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-4 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.23). Она содержит зависимый источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН), вольтметры, амперметры и набор резисторов по 5 кОм, объединенных в одном корпусе (сборку резисторов). Резисторы одной величины используются в качестве нагрузки. Они подключаются нажатием кнопки на клавиатуре, указанной справа ключа. При этом должен быть установлен английский алфавит. ИНУН при коэффициенте передачи напряжения равном единице называется повторителем напря-

жения: напряжение на его выходе тождественно равно напряжению на его входе (он повторяет напряжение на входе).

3. Запустить моделирующую программу щелкнув левой кнопкой мыши на пиктограмме включателя/выключателя I/O.

4. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин напряжения U и тока I , создаваемого повторителем напряжения для разных нагрузок. Записать величины напряжений и токов в таблицу 2.7.

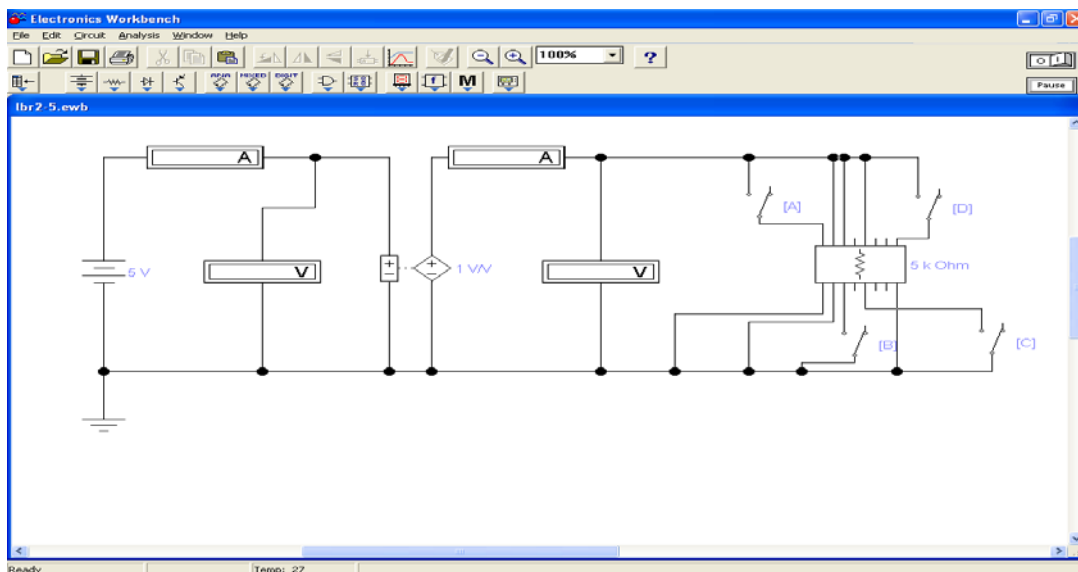


Рис. 2.23. Измерение параметров повторителя напряжения

Таблица 2.7.

Результаты исследования повторителя напряжения

	Един.изм.	A off	A in	B in	C in	D in
R	кОм	5	2,5	1,25	0,625	0,312
$U_{вх}$	В					
$I_{вх}$						
U	В					
I	мА					
Рпов	мВт					

6. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать мощность, отдаваемую источником в нагрузку, и результаты записать в таблицу 2.7.

Определить величину дифференциального выходного сопротивления повторителя напряжения и величину статического сопротивления для случая $D \text{ in}$. Рассчитать величину входного сопротивления повторителя и мощность, потребляемую им от источника со стороны входа.

7. Сделать выводы о свойствах повторителя напряжения.

Эксперимент 4. Измерение параметров отражателя тока.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить:

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл lbr2-6. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-5 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема для эксперимента (рис. 1.24). Она содержит источник тока, управляемый токком (ИТУТ), вольтметры, амперметры, резисторы, которые используются в качестве нагрузки. Они подключаются нажатием кнопки на клавиатуре, указанной справа ключа. При этом должен быть установлен английский алфавит.

ИТУТ при коэффициенте передачи тока равном минус единице называется отражателем тока: ток на его выходе тождественно равен току на его входе. При этом, если мысленно провести линию симметрии между источниками ИТУТ, то показания амперметров как бы зеркально отражают друг друга. (Отражатель тока еще иногда в технической литературе называют токовым зеркалом).

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин напряжения U и тока I , создаваемого отражателем тока для различных нагрузок. Записать величины напряжений и токов в таблицу 2.8.

5. Перевести кнопку I/O в положение О. Рассчитать величину мощности, отдаваемой отражателем тока в нагрузку и результаты записать в таблицу 2.8. Определить величину дифференциального выходного сопротивления отражателя тока и величину статического сопротивления для случая $A \text{ in}$.

Рассчитать величину входного сопротивления отражателя тока и мощность, потребляемую им от источника со стороны входа.

6. Сделать выводы о свойствах отражателя тока.

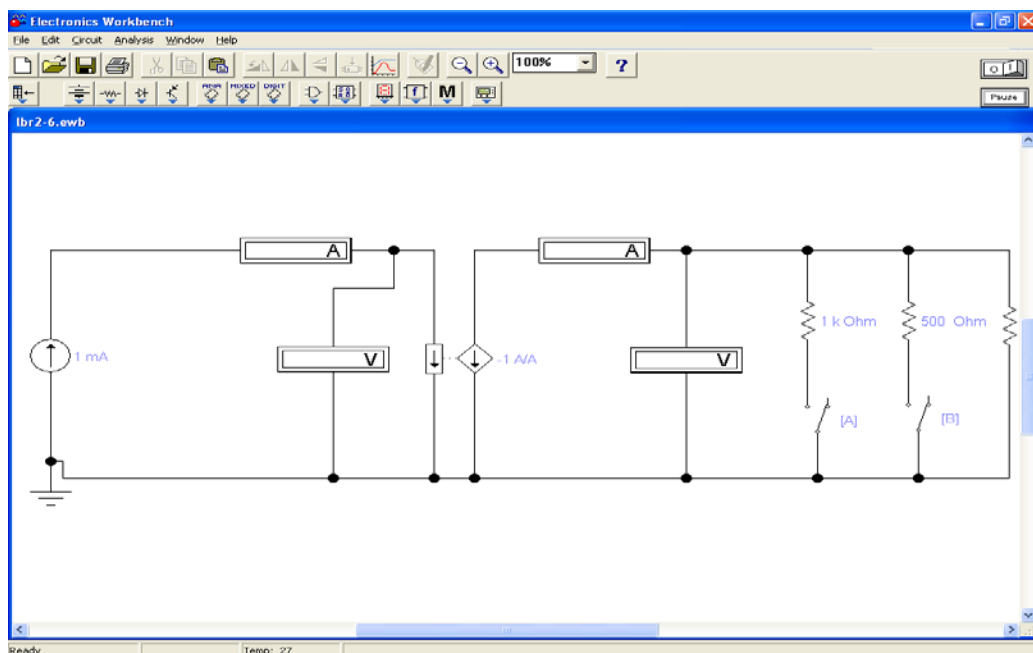


Рис. 2.24. Измерение параметров отражателя тока

Таблица 2.8.

Результаты исследования отражателя тока

	Един.изм.	A off	A in	B in
R	кОм	1	0,5	0,25
<i>U_{вх}</i>	В			
<i>I_{вх}</i>				
<i>U</i>	В			
<i>I</i>	мА			
<i>P_{отр}</i>	мВт			

Эксперимент 5. Измерение частотных характеристик РЭ и реального резистора.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл lbr2-7.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.25). Она содержит РЭ, с величиной сопротивления 10 кОм, измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

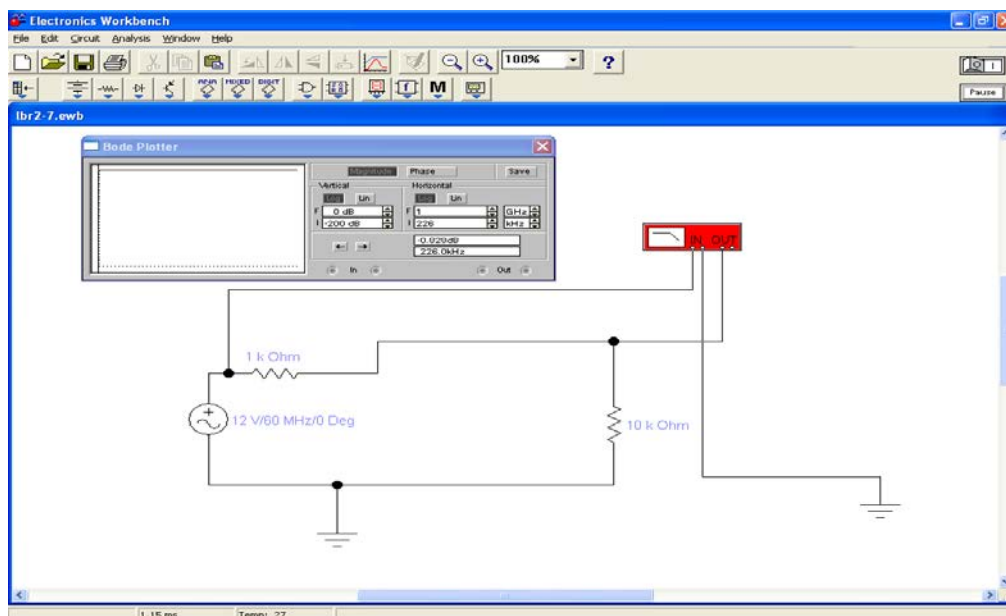


Рис. 2.25. Измерение частотных характеристик РЭ

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Просмотреть, что представляет собой графики зависимости сопротивления и фазы для РЭ. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить величину амплитуды и фазы в двух точках АЧХ и ФЧХ. Сделать выводы о частотных свойствах РЭ. Перевести кнопку I/O в положение О.

5. Откройте моделирующую программу для исследования реального резистора. Для этого, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2-8. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-7 дать отрицательный ответ.

6. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.26). Она содержит реальный резистор, представленный схемой замещения в виде РЭ, ЕЭ и ИЭ определенных величин, а также измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

7. Запустить моделирующую программу.

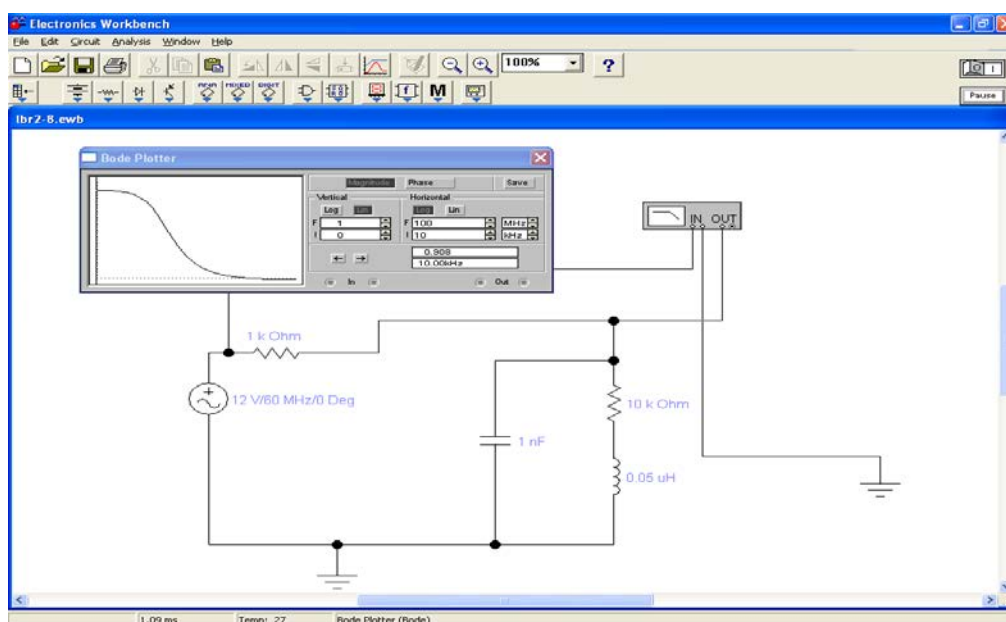


Рис. 2.26. Измерение частотных характеристик реального резистора обычного исполнения

8. Просмотреть, что представляет собой графики зависимости сопротивления и фазы для постоянного резистора обычного исполнения. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить величину частоты, при которой АЧХ и ФЧХ резистора становятся отличными от теоретических.

Сделать выводы о частотных свойствах реальных резисторов обычного исполнения. Перевести кнопку I/O в положение O.

9. Откройте моделирующую программу для исследования реального резистора, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2-9. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-8 дать отрицательный ответ.

10. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.27). Она содержит реальный миниатюрный ЧИП резистор, выполненный для монтажа на поверхность (в SMD исполнении), представленный схемой замещения в виде РЭ, ЕЭ и ИЭ определенной величины, а также измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

11. Запустить моделирующую программу.

12. Просмотреть, что представляют собой графики зависимости сопротивления и фазы для резистора от частоты. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить величину частоты, при которой АЧХ и ФЧХ резистора становятся отличными от теоретических.

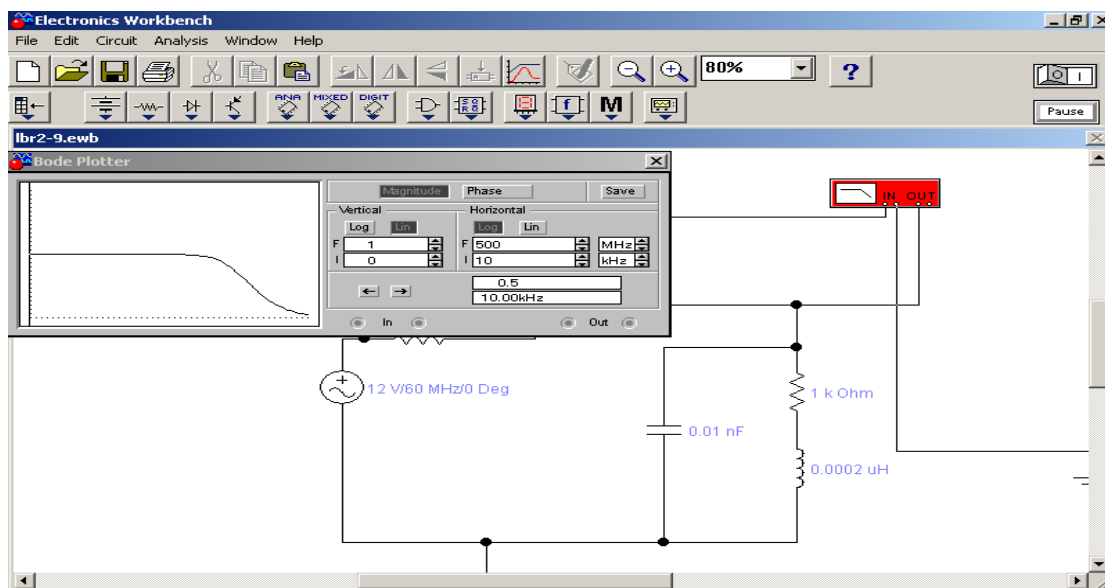


Рис. 2.27. Измерение частотных характеристик реального миниатюрного ЧИП резистора выполненного для монтажа на поверхность (в SMD исполнении)

Сделать выводы о достоинствах и преимуществах реальных резисторов в SMD исполнении. Перевести кнопку I/O в положение O.

Эксперимент 6. Измерение частотных характеристик ЕЭ и реального конденсатора.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir2-10. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-9 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.28). Она содержит ЕЭ, величиной 10 мкФ, измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

3. Запустить моделирующую программу.

4. Просмотреть, что представляет собой графики зависимости сопротивления и фазы от частоты для ЕЭ. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить величину амплитуды и фазы в двух точках АЧХ и ФЧХ.

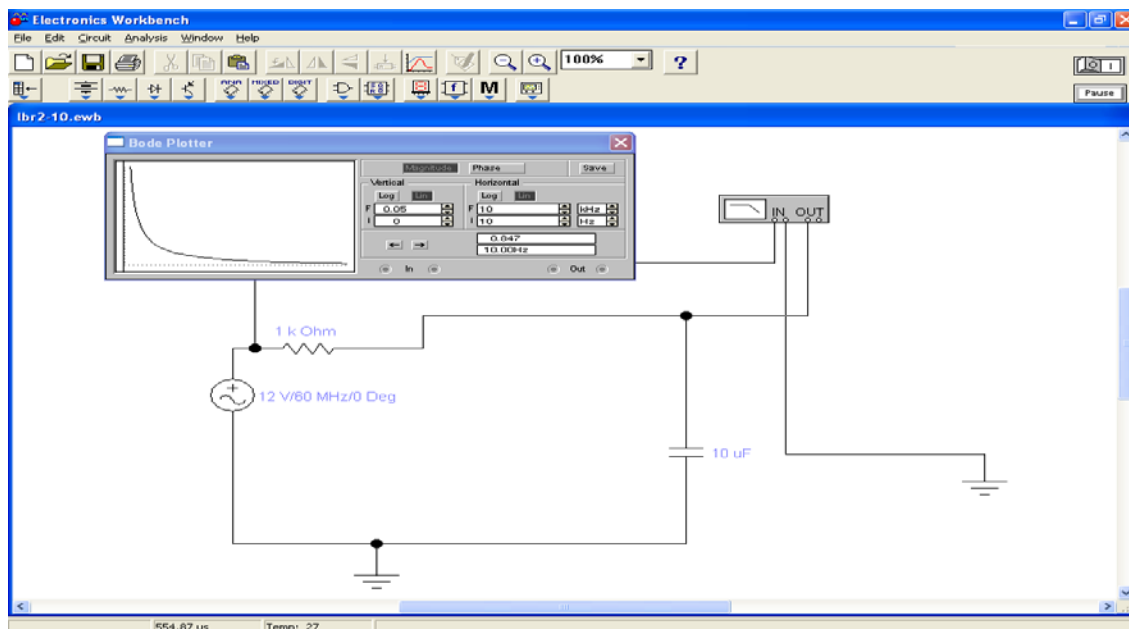


Рис. 2.28. Измерение частотных характеристик ЕЭ

Сделать выводы о частотных свойствах ЕЭ. Перевести кнопку I/O в положение O.

5. Откройте моделирующую программу для исследования реального алюминиевого электролитического конденсатора, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2-11. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-10 дать отрицательный ответ.

6. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.29). Она содержит реальный реального алюминиевый электролитический конденсатор, представленный схемой замещения в виде РЭ, ЕЭ и ИЭ определенных величин, а также измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

7. Запустить моделирующую программу.

8. Просмотреть, что представляют собой графики зависимости сопротивления и фазы от частоты для реального алюминиевого электролитического конденсатора. Определить соответствуют ли они теорети-

ческим зависимостям. Используя визирную линейку определить величину частоты, при которой АЧХ и ФЧХ резистора становятся отличными от теоретических.

Сделать выводы о частотных свойствах реального алюминиевого электролитического конденсатора. Перевести кнопку I/O в положение O.

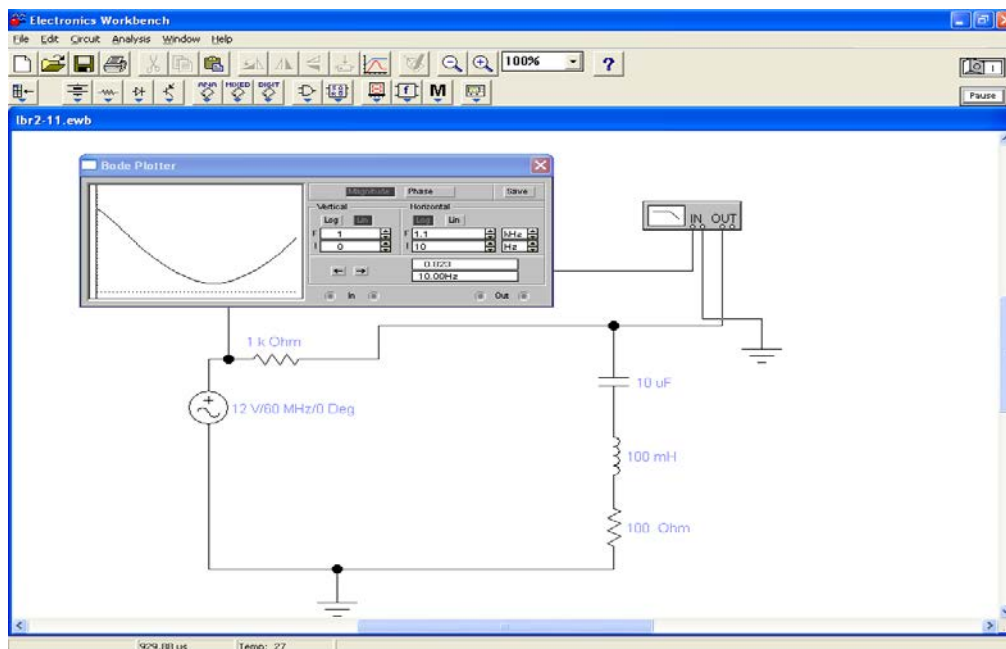


Рис. 2.29. Измерение частотных характеристик реального алюминиевого электролитического конденсатора

9. Откройте моделирующую программу для исследования реального миниатюрного танталового конденсатора в SMD исполнении, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr2-12. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-11 дать отрицательный ответ.

10. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.30). Она содержит реальный миниатюрный танталовый конденсатор в SMD исполнении, представленный схемой замещения в виде РЭ, ЕЭ и ИЭ определенных величин, а также измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

11. Запустить моделирующую программу.

12. Просмотреть, что представляет собой графики зависимости сопротивления и фазы от частоты для реального танталового конденсатора в SMD исполнении. Определить соответствуют ли они теоретическим

зависимостям. Используя визирную линейку определить величину частоты, при которой АЧХ и ФЧХ резистора становятся отличными от теоретических.

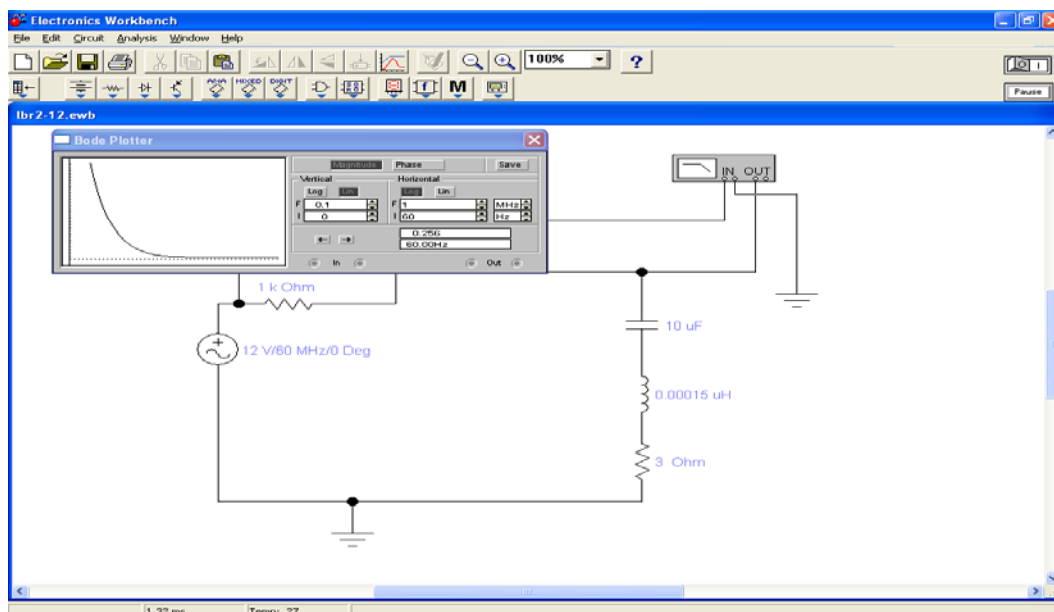


Рис. 2.30. Измерение частотных характеристик реального миниатюрного танталового ЧИП конденсатора выполненного для монтажа на поверхность (в SMD исполнении)

Сделать выводы о достоинствах реальных танталовых конденсаторов в SMD исполнении. Перевести кнопку I/O в положение O.

Эксперимент 7. Измерение частотных характеристик ИЭ.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir2-13. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr2-12 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 2.31). Она содержит ИЭ, величиной 10 мГн, измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Просмотреть, что представляет собой графики зависимости сопротивления и фазы для ИЭ. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить величину амплитуды и фазы в двух точках АЧХ и ФЧХ.

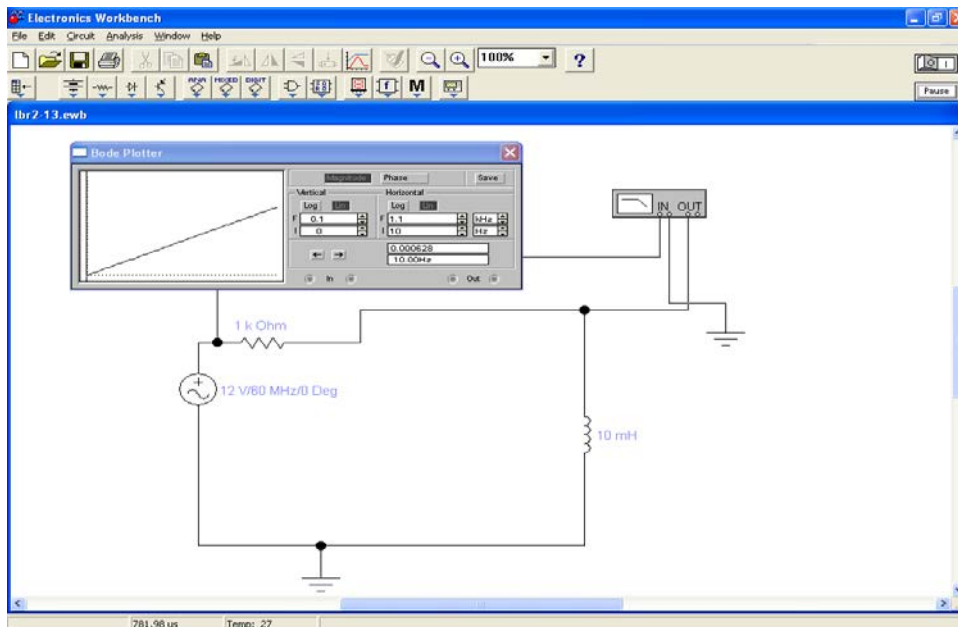


Рис. 2.31. Измерение частотных характеристик ИЭ

Сделать выводы о частотных свойствах ИЭ. Перевести кнопку I/O в положение O.

2.2.5. Обработка результатов экспериментов

В этой части студент должен привести все необходимые расчеты по лабораторной работе, внести их в соответствующие таблицы, произвести их анализ и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Постройте схему замещения гальванического элемента в виде соединения как ИИН, так и ИИТ с резистивным элементом (проводимостью) расчетной величины.
2. С какой целью и как используется измеритель частотных характеристик (Bode Plotter)?

3. В чем отличие схем ИИН и реального источника напряжения?
4. В чем отличие схем ИИТ и реального источника тока?
5. Как определяются статическое и дифференциальное сопротивление источников тока и напряжения?
6. Как определяется величина P_{rim} , при которой мощность, передаваемая в нагрузку максимальна.
7. Что такое повторитель напряжения ? Охарактеризуйте его схему.
8. Что такое отражатель тока ? Охарактеризуйте его схему.
9. Что представляют собой графики зависимости сопротивления и фазы для постоянного резистора обычного исполнения и в SMD исполнении ?
10. Что представляют собой графики зависимости сопротивления и фазы от частоты для реального алюминиевого электролитического конденсатора и реального миниатюрного танталового конденсатора в SMD исполнении ?
11. Что представляют собой графики зависимости сопротивления и фазы для ИЭ ?

Индивидуальные задания № 2 к самостоятельной работе студентов

1. Для заданной модели аккумулятора, параметры которой приведены в таблице 2.9, определить:

- а) номинальный (рекомендуемый) ток заряда батареи и мощность, потребляемую при этом от зарядного устройства;
- б) требуемое время заряда батареи;
- в) номинальный ток разряда (рабочий ток) батареи и мощность, отдаваемую при этом потребителю энергии;
- г) время работы заряженной аккумуляторной батареи.

Построить графики зависимости заряда батареи, напряжения, тока, мощности от времени при зарядке и разрядке аккумулятора.

2. Для варианта гармонического напряжения, приведенного в алгебраической форме в таблице 1.8, и величин частоты f_1 и емкости, заданных в таблице 2.9:

а) построить графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления конденсатора от частоты. Расчет выполнить в диапазоне частот от 30 Гц до 1 кГц. Используя графики подтвердить, что ЕЭ обладает заградительно - шунтирующим свойством.

б) построить векторную диаграмму тока и напряжения на конденсаторе;

в) построить зависимости тока, напряжения, энергии и мощности на конденсаторе в системе координат, когда по оси абсцисс откладывается время. Кратко описать, какие процессы происходят в конденсаторе в различные моменты времени.

3. Для заданного преподавателем и приведенного в таблице 1.13 варианта импульсного напряжения {взять для $u(t)$ сигнал $S(\theta)$ и время в миллисекундах $t = 100 \theta$ и $t = 200 \theta$ }, а также времени анализа равного 150 мс и 300мс:

а) построить для конденсатора зависимости тока, напряжения, энергии и мощности от времени. Кратко описать, какие процессы происходят в конденсаторе в различные моменты времени.

4. Для варианта гармонического напряжения, приведенного в алгебраической форме в таблице 1.8, и величин частоты f_2 и индуктивности, заданных в таблице 2.9:

а) построить графики зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления от частоты. Расчет выполнить в диапазоне частот от 30 Гц до 1 кГц. Используя графики подтвердить, что ИЭ обладает шунтирующе-заградительным свойством;

б) построить векторную диаграмму тока и напряжения на индуктивности;

в) построить, для варианта гармонического тока, приведенного в алгебраической форме в таблице 1.8, зависимости тока, напряжения, энергии и мощности на индуктивности в системе координат, когда по оси абсцисс откладывается время. Кратко описать какие процессы происходят в индуктивности в различные моменты времени.

3. Для заданного преподавателем и приведенного в таблице 1.13 варианта импульсного тока {взять для $i(t)$ сигнал $S(\theta)$ и время в миллисекундах $t = 10\theta$ и $t = 20\theta$ }, а также времени анализа равного 15 мс и 30мс:

а) построить для индуктивности зависимости тока, напряжения, энергии и мощности от времени. Кратко описать какие процессы происходят в индуктивности в различные моменты времени.

Таблица 2.9.

Параметры основных моделей аккумуляторов

№ варианта	Модель аккумулятора	Тип	Емкость (ампер-часы)	Начальное напряжение, В	Конечное напряжение, В	Частота f_1 , Гц	Емкость, мкФ	Частота f_2 , Гц	Индуктивность, мГн
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-
1	SNN5636	NiMH	0.8	4.2	3.6	76	15	215	10
2	APB-34N	NiCd	1.8	5.6	4.8	42	8	84	4
3	Sony (графит-2)	Li-ion	1.6	4.2	2.5	102	12	305	13
4	Sony (кокс)	Li-ion	1.6	4.2	2.5	138	14	112	16

Продолжение таблицы 2.9.

-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-
5	Toshiba (кокс)	Li-ion	1.6	8.4	5.0	136	20	409	12
6	APB-18	NiCd	1.2	8.4	7.2	145	25	366	10
7	APB-34N	NiCd	1.8	5.6	4.8	32	18	138	7
8	Panasonic (графит-1)	Li-ion	1.6	4.1	3.0	79	13	332	8
9	APB-32	NiMH	0.9	7.2	6.0	134	8	103	9
10	ANB-13	Li-ion	1.2	8.4	5.2	47	12	100	8
11	APB-34N	NiCd	1.8	5.6	4.8	59	4	83	11
12	HNN9044	NiMH	0.9	8.4	7.2	35	6	282	6
13	Toshiba (кокс)	Li-ion	1.6	8.4	5.0	34	9	421	9
14	ANB-V47	Li-ion	1.8	8.2	5.0	50	15	76	19
15	ANB-29	Li-ion	1.2	8.2	6.0	56	8	276	5
16	APB-34N	NiCd	1.8	5.6	4.8	32	12	241	11
17	HNN9044	NiMH	0.6	8.4	7.2	64	14	271	3
18	Hitachi (графит-1)	Li-ion	1.6	4.1	3.0	71	20	137	14
19	ANB-13	Li-ion	1.2	8.2	5.0	96	25	75	7
20	Moli (графит-2)	Li-ion	1.6	4.2	2.5	73	18	443	14
21	HNN9044	NiMH	0.9	8.4	7.2	75	13	211	5
22	Saft (графит-1)	Li-ion	1.6	4.1	3.0	73	23	231	12
23	ANB-13	Li-ion	1.2	8.4	5.2	139	7	179	19
24	APB-32	NiMH	0.9	7.2	6.0	86	30	186	12
25	Asahi (графит-2)	Li-ion	1.6	4.2	2.5	81	15	376	2
26	Asahi (кокс)	Li-ion	1.6	4.2	2.5	66	8	78	9
27	Toshiba (кокс)	Li-ion	1.6	8.4	5.0	147	12	53	15
28	Panasonic (графит-1)	Li-ion	1.6	4.1	3.0	127	4	197	4
29	ANB-29	Li-ion	1.2	8.2	6.0	149	6	221	14
30	HNN9044	NiMH	0.6	8.4	7.2	61		190	17
31	Asahi (графит-2)	Li-ion	1.6	4.2	2.5	144		127	19

Тема 3. Методы анализа электрических цепей

3.1. Практическое занятие № 3

Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов параметров электрических цепей и визуализации полученных результатов

3.1.1. Общие сведения

Для понимания того, что представляет собой электрическая цепь, важно уметь находить и анализировать и использовать, для получения информации о цепи, *операторную передаточную характеристику*.

Для того чтобы по заданной схеме цепи класса SISO и ее элементам найти операторную передаточную характеристику необходимо:

1. Представить электрическую цепь ее операторной схемой замещения (при нулевых ГНУ) и к ее входу подключить источник гармонического напряжения, операторное изображение которого равно $U_{ВХ}(s)$.
2. Любым методом анализа электрических цепей найти необходимое операторное изображение напряжения на выходе $U_{ВЫХ}(s)$.
3. Взяв отношение операторных изображений на выходе и входе цепи, получить искомую передаточную характеристику цепи.

Электрическую цепь класса SISO для многих практических случаев можно представить в виде простейших четырехполюсников, как говорят, элементарных звеньев. Простейшие четырехполюсники, исходя из внешнего вида соединения их элементов, получили условные названия: Г-образный, Т-образный, П-образный. В ряде случаев, используя эти элементарные звенья можно вычислять передаточные характеристики довольно сложных электрических цепей, встречающихся на практике.

3.1.2. Вычисление передаточных характеристик Г-образных четырехполюсников

Рассмотрим вначале Г-образные четырехполюсники, состоящие из двух элементов, у которых, в свою очередь, компоненты Z_1 и Z_2 могут состоять из последовательно или параллельно соединенных элементов электрической цепи

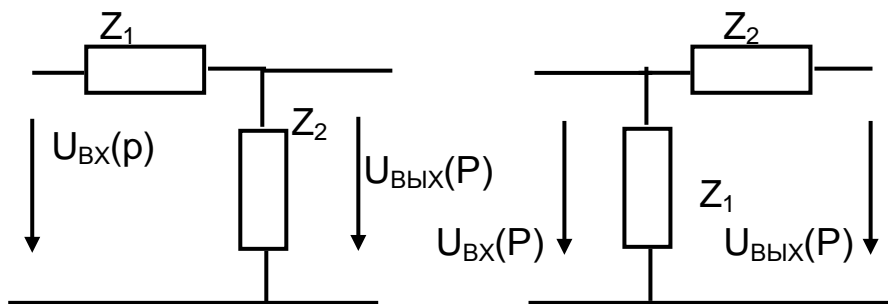


Рис. 3.1. Г-образные четырехполюсники с продольным и поперечным компонентом на входе и на выходе

Для расчета передаточной характеристики Г-образного четырехполюсника с продольным компонентом на входе Z_1 и поперечным компонентом на выходе Z_2 используют свойство простейшего делителя напряжения.

$$U_{B_{YX}}(s) = \frac{U_{B_X}(s)Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \Rightarrow K(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)}. \quad (3.1)$$

Передаточная характеристика Г-образного четырехполюсника с поперечным компонентом на входе Z_1 и продольным компонентом на выходе Z_2 определяется следующим образом

$$K(s) = \frac{Z_1(s) + Z_2(s)}{Z_1(s)} = 1 + \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}. \quad (3.2)$$

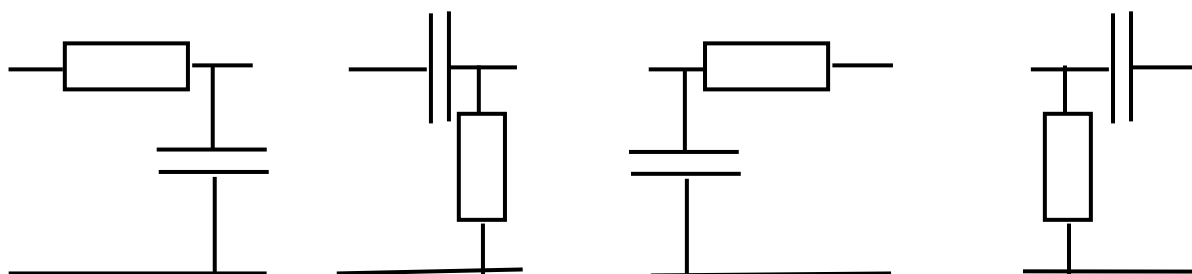


Рис. 3.2. Г-образные RC четырехполюсники

Передаточные характеристики, к примеру, RC - звеньев можно получить подстановкой в формулы величин операторных сопротивлений.

Для RC цепей, показанных на рис. 3.2 получаем следующее.

Для первой схемы операторные сопротивления равны $Z_1(s) = R_1$ и $Z_2(s) = 1/C_1s$. Отсюда находим

$$K_1(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{1/C_1s}{R_1 + 1/C_1s} = \frac{1}{R_1C_1s + 1} = \frac{1}{R_1C_1(s + 1/R_1C_1)} = \quad (3.3)$$

$$= \frac{\tau}{s + \tau} = \frac{1}{s/\tau + 1},$$

где $\tau = 1/R_1C_1$.

Такой же результат, который мы получили применяя «ручные» выкладки можно получить, используя операторы символьных вычислений системы MATLAB. Для этого надо выполнить следующую последовательность действий.

Объявляем, какие символы будем использовать

```
syms z1 z2 r1 c1 s
```

Затем определяем функцию, которую необходимо вычислить

```
kspr1=z2/(z1+z2);
```

Проводим замену переменных (в функции kspr1 заменяем переменную 'z1' на переменную 'r1')

```
kspr2=subs(kspr1,'z1','r1');
```

```
kspr3=subs(kspr2,'z2','1/(c1*s)');
```

Упрощаем выражение

```
ks1=simplify(kspr3);
```

Получаем результат в виде, привычном для восприятия

```
pretty(ks1)
```

Окончательный результат будет иметь вид

$$\frac{1}{r_1 \cdot s \cdot c_1 + 1}$$

Аналогично, подставляя величины операторных сопротивлений в формулу делителя напряжения можно получить передаточную характеристику для второй цепи

```

syms z1 z2 r2 c2 s
kspr1=z2/(z1+z2);
kspr2=subs(kspr1,'z1','1/(c2*s)');
kspr3=subs(kspr2,'z2','r2');
ks2=simplify(kspr3);
pretty(ks2)

```

$$\frac{r2 \cdot s \cdot c2}{r2 \cdot s \cdot c2 + 1}$$

В третьей цепи Г-образного четырехполюсника с поперечным компонентом на входе Z_1 и продольным компонентом на выходе Z_2 меняется общая формула для расчета. Поэтому операторы будут иметь вид

```

syms z1 z2 r3 c3 s
kspr1=1+(z2/z1);
kspr2=subs(kspr1,'z1','1/(c3*s)');
kspr3=subs(kspr2,'z2','r3');
ks3=simplify(kspr3);
pretty(ks3)

```

Передаточная характеристика третьей цепи будет иметь вид

$$r3 \cdot s \cdot c3 + 1$$

Для четвертой цепи Г-образного четырехполюсника с поперечным компонентом на входе Z_1 и продольным компонентом на выходе Z_2 получаем следующую операторную характеристику

```

syms z1 z2 r4 c4 s
kspr1=1+(z2/z1);
kspr2=subs(kspr1,'z1','r4');
kspr3=subs(kspr2,'z2','1/(c4*s)');
ks4=simplify(kspr3);
pretty(ks4)

```

$$\frac{r4 \cdot s \cdot c4 + 1}{r4 \cdot s \cdot c4}$$

Подобным образом, используя систему символьных вычислений, можно получать передаточные операторные характеристики для Г-образных четырехполюсников, у которых компоненты Z_1 и Z_2 являются

сложными и представляют или последовательное или параллельное соединение элементов. Рассмотрим цепь, показанную на рис. 3.3.

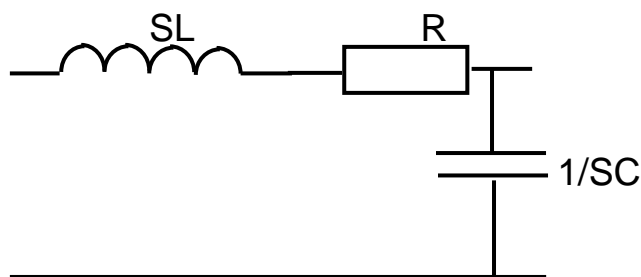


Рис. 3.3. Г-образные RLC четырехполюсник

В ней продольный компонент представлен последовательным соединением операторной индуктивности и резистивного элемента. Подставляя значения операторных сопротивлений, находим операторную передаточную характеристику

```
syms z1 z2 r5 c5 L5 s
kspr1=z2/(z1+z2);
kspr2=subs(kspr1,'z1','r5+(s*L5)');
kspr3=subs(kspr2,'z2','1/(c5*s)');
ks5=simplify(kspr3);
pretty(ks5)
```

$$\frac{1}{1+r5 \cdot s \cdot c5+L5 \cdot s \cdot c5}$$

Для численных расчетов коэффициентов полиномов a_1 , a_2 операторной передаточной характеристики можно подставить вместо символьных значений числовые значения L , C , R . При этом можно также рассчитать собственные частоты цепи и ее добротность. Для этой цели предыдущее надо дополнить операторами расчета этих величин

```
syms z1 z2 r5 c5 L5 s
kspr1=z2/(z1+z2);
kspr2=subs(kspr1,'z1','r5+(s*L5)');
kspr3=subs(kspr2,'z2','1/(c5*s)');
ks5=simplify(kspr3);
pretty(ks5)
r5 = 100;
```

```

c5 = 1000e-12;
L5=100e-3;
digits(8)
a1 = vpa(L5*c5)
a2= vpa(r5*c5)
w0=vpa(1/sqrt((L5*c5)))
w1=vpa(1/(r5*c5))
q=w1/w0

```

$$\frac{1}{1+r5 \cdot s \cdot c5+L5 \cdot s \cdot c5}$$

```

a1 =
.100000000e-9
a2 =
.100000000e-6
w0 =
100000.
w1 =
10000000.
q =
100.00000

```

3.1.3. Вычисление передаточных характеристик Т и П-образных четырехполюсников

Для нахождения операторных передаточных функций Т- , П- образных и других сложных цепей обычно используют метод узловых напряжений (узловых потенциалов). Продемонстрируем методику расчета операторной передаточной функции на примере Т– образной цепи, изображенной на рис. 3.4

Перенумеруем узлы как показано на рис 3.4 и на вход четырехполюсника подключим идеальный источник ЭДС. Изображение задающего напряжения обозначим $U_{BX}(s)$.

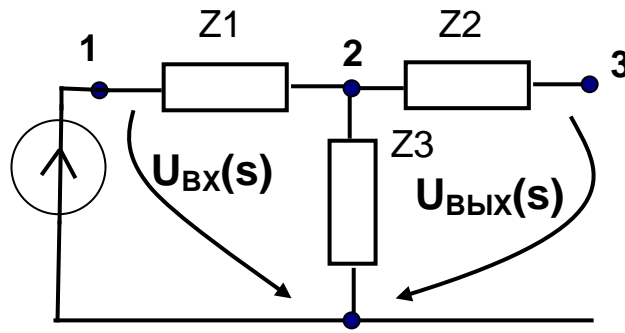


Рис. 3.4. Т-образный четырехполюсник

В схеме 4 узла, поэтому по общим правилам метода узловых напряжений надо составить систему из трех уравнений. Однако, т.к. между узлом 1 и базисным узлом включен источник с известным напряжением, то неизвестными оказываются напряжения второго и третьего узлов. Для этих узлов составляем уравнения

$$\begin{cases} -Y_{21}(s)U_{BX}(s) + Y_{22}(s)U_2(s) - Y_{23}(s)U_{ВЫХ}(s) = 0 \\ -Y_{31}(s)U_{BX}(s) - Y_{32}(s)U_2(s) + Y_{33}(s)U_{ВЫХ}(s) = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Переносим известные величины в правую часть уравнения, получим

$$\begin{cases} Y_{22}(s)U_2(s) - Y_{23}(s)U_{ВЫХ}(s) = Y_{21}(s)U_{BX}(s) \\ -Y_{32}(s)U_2(s) + Y_{33}(s)U_{ВЫХ}(s) = Y_{31}(s)U_{BX}(s) \end{cases} \quad (3.5)$$

Отсюда, по правилу Крамера находим

$$U_{ВЫХ}(s) = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{Y_{22}(s) \quad Y_{21}(s)U_{BX}(s)}{-Y_{32}(s) \quad Y_{31}(s)U_{BX}(s)} = \frac{Y_{22}(s)Y_{31}(s)U_{BX}(s) + Y_{21}(s)U_{BX}(s)Y_{32}(s)}{Y_{22}(s)Y_{33}(s) - Y_{23}(s)Y_{32}(s)} \quad (3.6)$$

Наконец, операторная передаточная характеристика цепи, показанной на рис. 3.4, в общем виде будет

$$K(s) = \frac{Y_{22}(s)Y_{31}(s) + Y_{21}(s)Y_{32}(s)}{Y_{22}(s)Y_{33}(s) - Y_{23}(s)Y_{32}(s)}. \quad (3.7.)$$

Подставив конкретные значения операторных проводимостей можно получить передаточную операторную характеристику в виде отношения полиномов. После того, как найдена операторная передаточная характеристика (вне зависимости от того каким методом она вычислялась) в виде дробно-рациональной функции (в форме отношения полиномов аргумента s)

$$K(s) = \frac{b(1)s^{nb} + b(2)s^{nb-1} + b(3)s^{nb-2} + \dots + b(nb)s + b(nb+1)}{a(1)s^{ab} + a(2)s^{ab-1} + a(3)s^{ab-2} + \dots + a(na)s + a(na+1)}, \quad (3.8)$$

где nb и na – степени полиномов числителя и знаменателя, s – комплексная переменная, можно рассчитать и построить следующие характеристики цепи.

3.1.4. Графическое построение характеристик электрических цепей

Диаграмма нулей и полюсов электрической цепи строится с помощью функции

`zplane(b,a)`

где a, b – вектор-строки, составленные из коэффициентов полинома числителя и знаменателя.

Для электрической цепи, изображенной на рис. 3.3 и имеющей коэффициенты $a1 = .10000000e-9$, $a2 = .10000000e-6$, $a3 = 1$, $b1 = 0$, $b2 = .0$, $b3 = 1$ вводим в командное окно

`a=[0.1e-9 0.1e-6 1];`

`b=[0 0 1];`

`zplane(b,a)`

После нажатия клавиши ENTER получаем диаграмму нулей и полюсов, показанную на рис. 3.5.

После того, как найдена операторная передаточная характеристика, можно рассчитать и построить также АЧХ и ФЧХ электрической цепи.

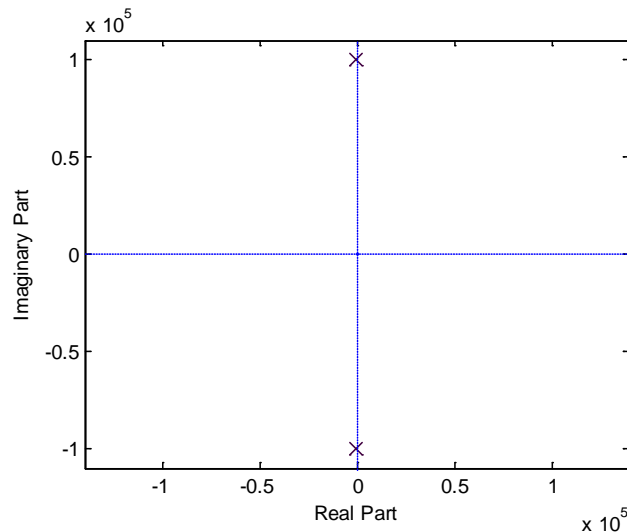


Рис. 3.5. Диаграмма нулей и полюсов электрической цепи

АЧХ и ФЧХ электрической цепи в логарифмическом масштабе строится с помощью функций
`w=logspace(WLOG1, WLOG2);`
`freqs(b,a,w)`

Первая функция формирует массив частот. Логарифмы круговых частот `WLOG1`, `WLOG2` определяют диапазон частот от `w1` до `w2`, в котором строим ЛАЧХ и ЛФЧХ. Вторая функция строит графики ЛАЧХ и ЛФЧХ

Для той же цепи вводим в командное окно
`a=[0.1e-9 0.1e-6 1];`
`b=[0 0 1];`
`w=logspace(-1,7);`
`freqs(b,a,w)`

После нажатия клавиши `ENTER` получаем ЛАЧХ и ЛФЧХ, показанные на рис. 3.6.

После того, как найдена операторная передаточная характеристика, можно построить переходную характеристику электрической цепи. Для этой цели используется специальное расширение `MATLAB`, называемое `SIMULINK`.

Для запуска расширения в командном окне набираем команду
`>> simulink.`

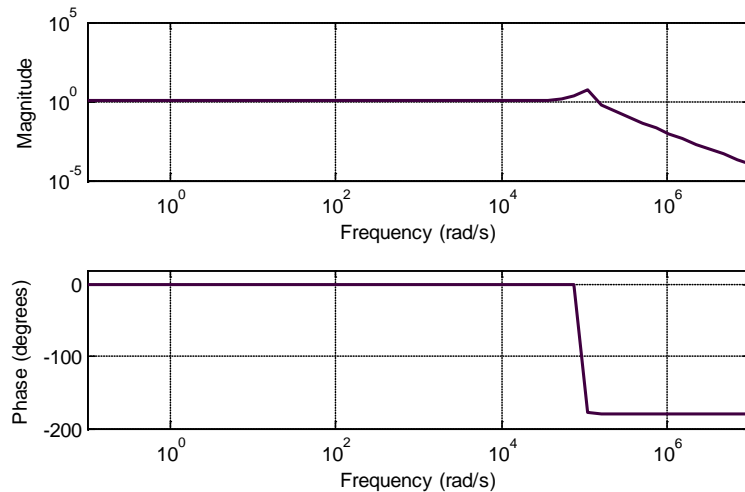


Рис. 3.6. ЛАЧХ и ЛФЧХ электрической цепи

Через некоторое время появится картинка обзревателя объектов. Для создания новой модели откроем пустое окно выполнив команды FILE >NEW > MODEL. После этих действий должна появиться картинка, показанная на рис. 3.7.

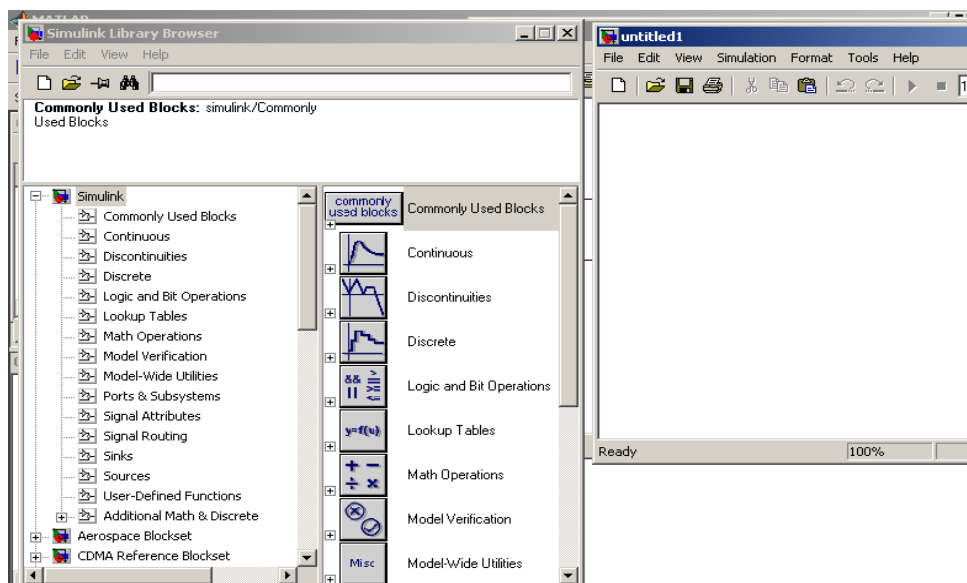


Рис. 3.7. Исходное окно системы SIMULINK

После этого приступаем к размещению необходимых блоков в окне. Сначала перетащим мышью источник единичного скачка STEP из раздела SOURCES (рис. 3.8). Затем из раздела TRANSFER FCP (рис.

3.9) – блок операторной передаточной функции $Ttransfer$ Fcp и из раздела SINKS (рис. 3.10) – блок виртуального осциллографа SCOPE.

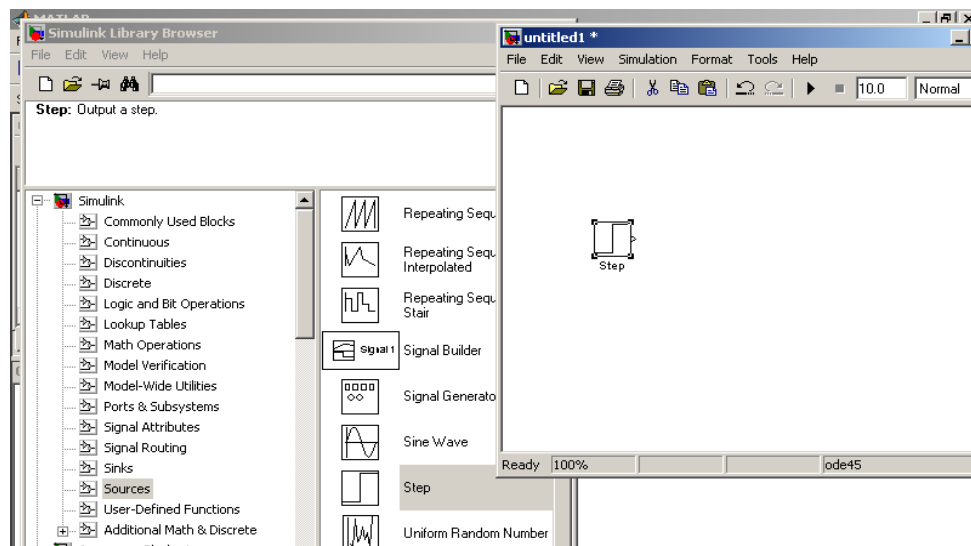


Рис. 3.8. Окно системы SIMULINK с блоком единичного скачка

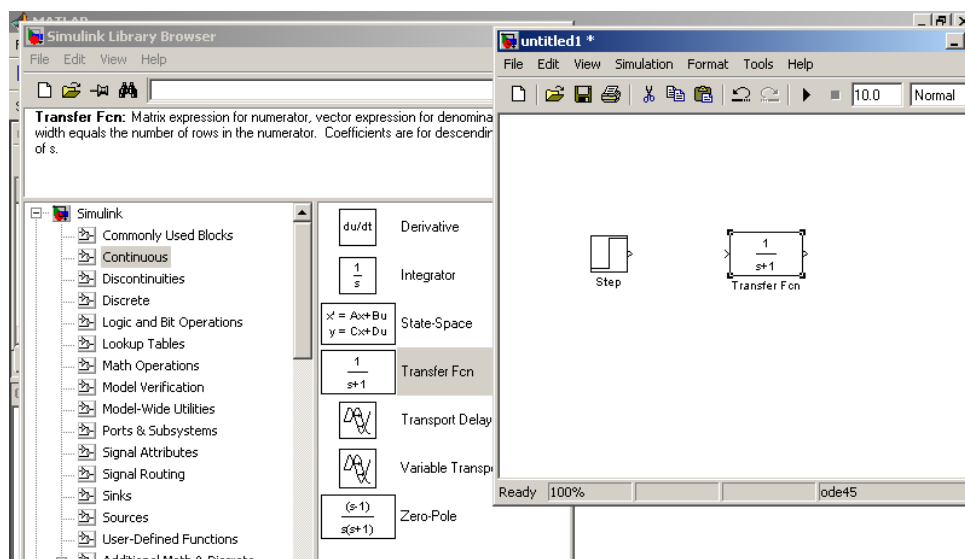


Рис. 3.9. Окно системы SIMULINK с блоками единичного скачка и передаточной операторной функции

Чтобы на осциллограф можно было подавать одновременно два сигнала дважды щелчком мышью по иконке осциллографа и установим 2 оси (рис. 3.11). После этого приступаем к соединению выводов. Для этого надо указать курсором мыши на начало соединения (выход, поме-

ченный символом <) и затем при нажатой кнопке мыши протянуть соединение в его конец (вход, помеченный символом >) (рис. 3.12).

Создание линии отвода выполняется аналогично. Завершив соединения мы получим модель, показанную на рис. 3.13.

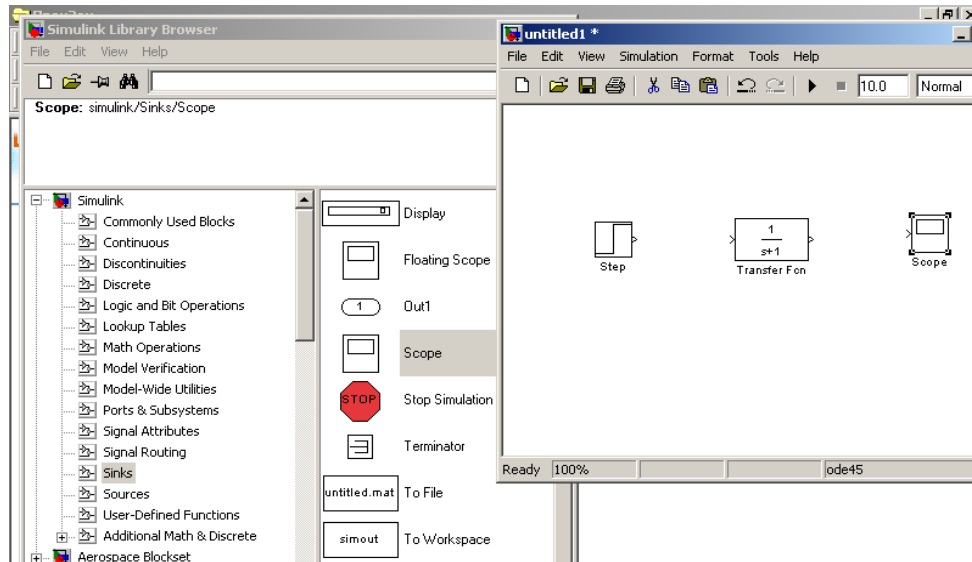


Рис. 3.10. Окно системы SIMULINK с тремя блоками

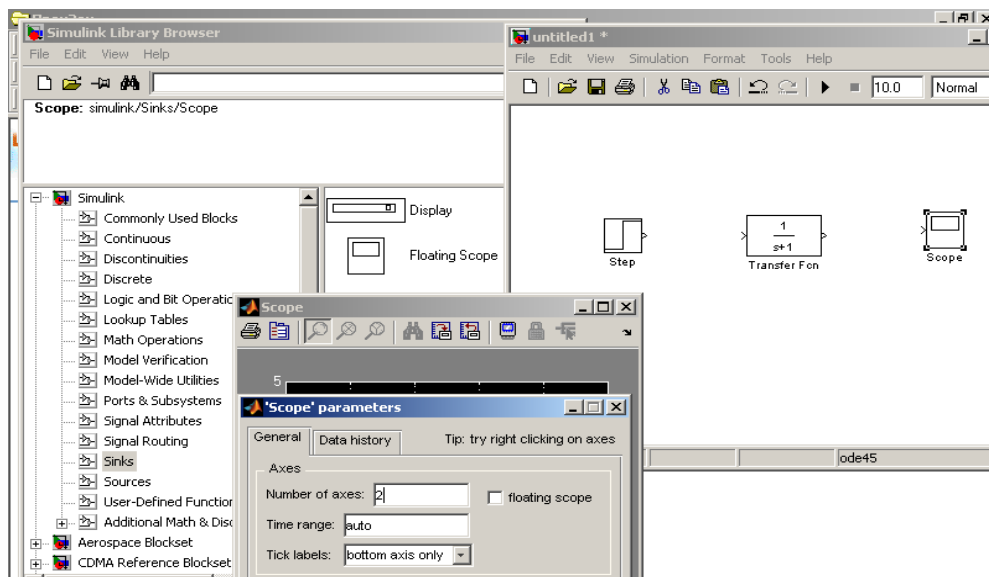


Рис.3.11. Окно SIMULINK с установкой двух каналов осциллографа

Для установки параметров блоков надо дважды щелкнуть мышью по пиктограмме блока. На рис. 3.13 показано, как устанавливаются параметры источника единичного скачка (генератора перепада) и блока

передаточной характеристики. У первого источника устанавливается время появления перепада. У второго – коэффициенты вектор-строки полинома числителя (NUMERATOR) и полинома знаменателя (DENOMINATOR). Требуется также установить время моделирования (1E-1 в верхнем окошке левее окошка с надписью NORMAL).

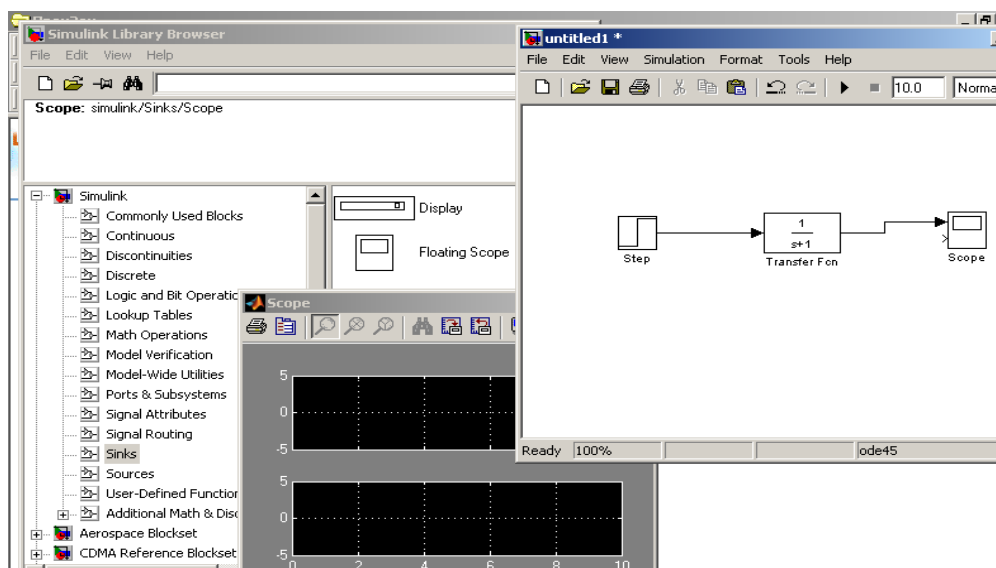


Рис. 3.12. Окно системы SIMULINK с выполненными первыми соединениями блоков

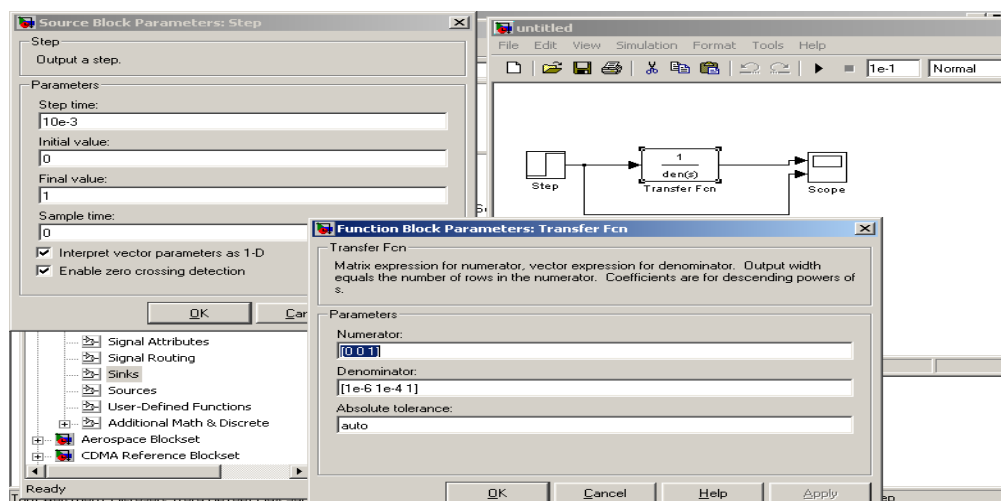


Рис. 3.13. Окно системы SIMULINK с выполненными соединениями и установленными параметрами блоков

После этих действий запускаем модель на исполнение, нажав кнопку запуска в виде черного треугольника.

Для удобства наблюдения переходной характеристики электрической цепи необходимо провести настройку масштабов осциллограмм. Для смены масштаба достаточно щелкнуть правой кнопкой мыши в окне осциллограммы. В появившемся контекстном меню нужно выбрать команду Axes Properties и установить удобные масштабы. В контекстном меню есть команда авто масштабирования Autoscale. С ее помощью удобно задавать масштаб переходной характеристики.

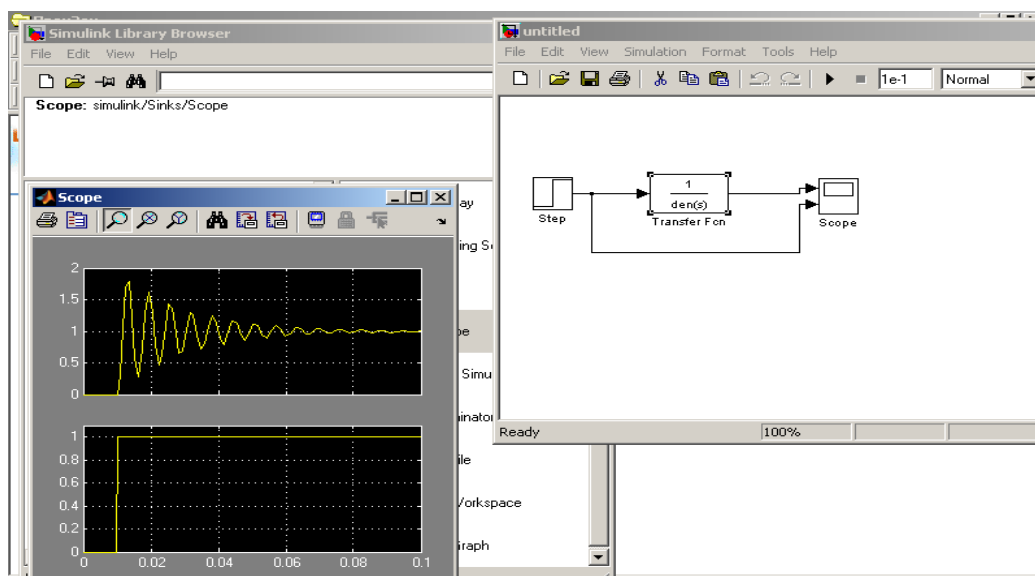


Рис. 3.14. Окно системы SIMULINK с изображениями единичного скачка и переходной характеристики цепи

После запуска модели и выполнения всех операций масштабирования получаем изображение переходной характеристики цепи, которая задана операторной передаточной характеристикой (рис. 3.14.).

Как видно из осциллограммы в момент подключения последовательного электрического контура напряжение на емкостном элементе сильно осциллирует около среднего значения а затем, затухая, приходит к единичной амплитуде.

Колебательный процесс в начале переходного периода обусловлен резонансным характером электрической цепи.

Выполняя аналогичную последовательность действий можно получить одновременно переходную характеристику цепи и импульсную характеристику цепи (двумя способами, рис. 3.15.)

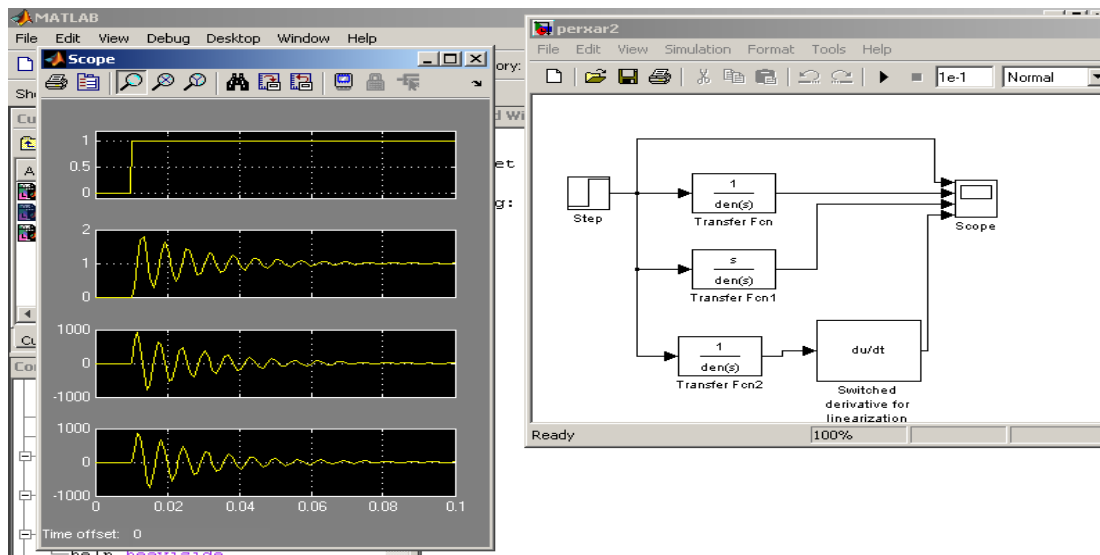


Рис. 3.15. Окно системы SIMULINK с изображениями единичного скачка и переходной характеристики цепи и двух импульсных характеристик, полученных двумя различными способами

Контрольные вопросы.

1. Какие операции нужно выполнить для нахождения операторной передаточной характеристики класса SISO?
2. Перечислите простейшие четырехполюсники.
3. Какое правило используют для расчета передаточной характеристики Г-образного четырехполюсника с продольным компонентом на входе Z_1 и поперечным компонентом на выходе Z_2 ?
4. Какой метод используют обычно для нахождения операторных передаточных функций Т-, П-образных и других сложных цепей?
5. Что представляет собой графическое построение характеристик электрических цепей?
6. С помощью какой функции строится диаграмма нулей и полюсов электрической цепи?
7. С помощью каких функций строится АЧХ и ФЧХ электрической цепи в логарифмическом масштабе?
8. Как с помощью системы MATLAB можно построить переходную характеристику электрической цепи?
9. Что представляет собой блок виртуального осциллографа SCOPE?

3.2. Лабораторная работа № 3

Измерение характеристик и параметров сложных электрических цепей

3.2.1. Цели работы

1. Углубить и закрепить знания о понятиях, параметрах и характеристиках, которыми пользуются при описании сложных электрических цепей.

2. Сформировать практические умения математической записи, определения различными методами тока и напряжения на элементах сложной цепи, амплитудно-частотных и фазо-частотных, передаточных, импульсных характеристик для типовых звеньев электрической цепи, а также измерений их параметров с помощью контрольно-измерительной аппаратуры.

3. Выработать умения практической работы с моделирующей программой (программным эмулятором) ELECTRONICS WORKBENCH, необходимые для оценки параметров и характеристик сложных электрических цепей.

4. Выработать умения практической работы с системой MATLAB, необходимые для для оценки параметров и характеристик сложных электрических цепей.

3.2.2. Самостоятельная работа студентов

Перед выполнением лабораторной работы студенту необходимо.

1. Изучить теорию, которой пользуются в электротехнике для описания, оценки и расчетов сложных электрических цепей, понятия, которыми характеризуют сложные электрические цепи.

2. Провести самопроверку эффективности своей теоретической подготовки, ответив на вопросы, приведенные в разделе «Контрольные вопросы».

3. Изучить средства и способы проведения эксперимента, краткие описания измерительных приборов и методов измерений, используемых в работе. В результате исполнения этого пункта студент должен уметь

объяснять порядок выполнения работы и то, какие результаты он ожидает получить.

4. Подготовить отчет о лабораторной работе.

В тетради изобразить принципиальные схемы экспериментов.

В тетради подготовить таблицы, в которые будут записываться данные, полученные в результате проведения экспериментов.

Подготовить оси координат графиков, необходимых для изображения исследуемых сигналов или осциллограмм.

Выполняя предыдущее надо помнить, что схемы, таблицы, результаты исследований помещаются в тетради отдельно по каждому пункту задания, желательно на отдельных страницах отчета.

Для заданной преподавателем схемы электрической цепи определить характер входного сопротивления схемы.

Пользуясь понятием о делителе напряжения для заданной преподавателем схемы электрической цепи рассчитать комплексную амплитуду напряжения на конденсаторе.

Пользуясь понятием о делителе тока для заданной преподавателем схемы электрической цепи рассчитать комплексную амплитуду напряжения на резисторе.

Для заданной преподавателем схемы электрической цепи методом контурных токов рассчитать комплексные амплитуды всех токов и напряжений.

Для заданной преподавателем схемы электрической цепи методом узловых напряжений рассчитать комплексные амплитуды всех токов и напряжений. Определить амплитуды и начальные фазы всех токов и напряжений. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех элементов схемы.

Для заданной преподавателем схемы электрической цепи рассчитать операторную передаточную характеристику. Для этой цепи построить диаграмму нулей и полюсов, АЧХ, ФЧХ, переходную и импульсную характеристики.

3.2.3. Средства и способы проведения эксперимента

Лабораторная работа вначале выполняется на IBM PC с использованием моделирующей элементы и устройства электрической цепи программы (программного эмулятора) ELECTRONICS WORKBENCH.

В данной лабораторной работе для проведения экспериментов, используются амперметр и вольтметр, позволяющие измерять напряжение, силу тока. Пиктограммы приборов («иконки») показаны на рис. 3.16 слева вверху.

Для визуального наблюдения графиков зависимостей напряжения от частоты – амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазы от частоты – фазо-частотной характеристики (ФЧХ) используется измеритель частотных характеристик (Bode Plotter). Иконка прибора и развернутое, более крупное его изображение, показаны на рис. 3.16. Для получения развернутого изображения прибора необходимо навести указатель мыши на иконку прибора и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши. На иконке прибора показаны входные клеммы (порт входа – IN) и выходные (порт выхода –OUT).

На экране измерителя частотных характеристик имеются оси координат и перемещающаяся в любое место экрана специальная визирная линейка. Переместив указатель мыши на линейку и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, устанавливается требуемое значение амплитуды (фазы), как точка пересечения визирной линейки и графика $u = F(f)$ или $\varphi = F(f)$. Расположенные справа экрана цифровые дисплеи покажут значения амплитуды (фазы) и частоты для выбранной точки.

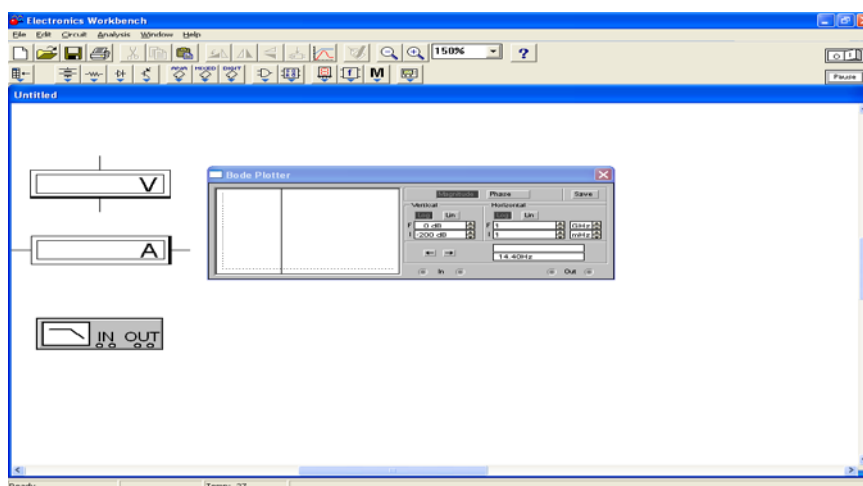


Рис. 3.16. Пример изображения «окна» Electronics Workbench вольтметром, амперметром и измерителем АЧХ и ФЧХ

При работе с измерителем частотных характеристик требуется задавать масштаб по оси ординат и абсцисс графика. При нажатии кнопки

«LIN» устанавливается линейный масштаб, при нажатии «LOG» - логарифмический. Выбор наблюдаемой АЧХ или ФЧХ производится кнопками «Magnitude» и «Phase».

О средствах системы MATLAB будет рассказано в эксперименте 5.

3.2.4. Порядок выполнения работы

Эксперимент 1. Исследование свойств делителя напряжения.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Открыть диалоговое окно программы «Electronics Workbench». При появлении сообщения «Could not open file» нажмите кнопку «ОК».

2. Откройте необходимый файл, нажав, например, кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл Ir3-1.

3. На экране монитора появиться схема установки для эксперимента (рис. 3.17). Она содержит три резистора и три вольтметра. Резистор величиной 4.8 кОм может подключаться или отключаться нажатием клавиши «пробел» на клавиатуре. При этом должен быть установлен английский алфавит.

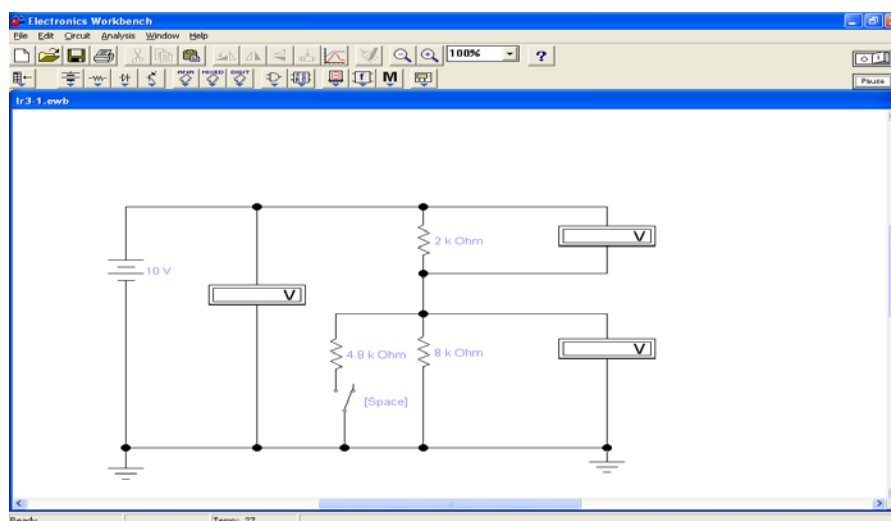


Рис. 3.17. Схема для исследования свойств делителя напряжения

4. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

5. Произвести отсчет с дисплеев приборов (рис.3.18) величин напряжений на элементах делителя для разных сопротивлений (in– включить, off– выключить). Записать величины напряжений в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

Результаты измерений

	Един.изм.		R1	R2	ВХОД
R	Ом	SPASE off	2	8	==
U	B				
R	Ом	SPASE in	2	3	==
U	B				

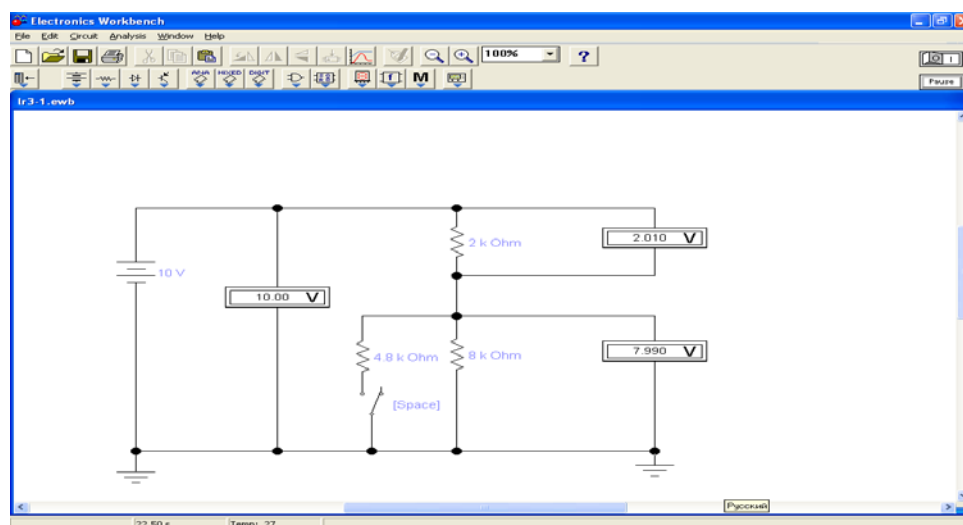


Рис. 3.18. Измерение напряжений на элементах делителя

6. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать теоретические величины напряжений, какие должны показывать вольтметры. Сделать выводы о свойствах делителя напряжения.

Эксперимент 2. Исследование свойств делителя тока.

Для проведения эксперимента необходимо:

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir3-2. На вопрос о сохранении изменений в файле lbr3-1 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 3.19). Она содержит 4 амперметра, три резистора и два ключа.

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Произвести отсчет с дисплеев приборов величин токов, протекающих через элементы для разных сопротивлений делителя (in– включить, off – выключить). Записать величины напряжений в таблицу 3.2.

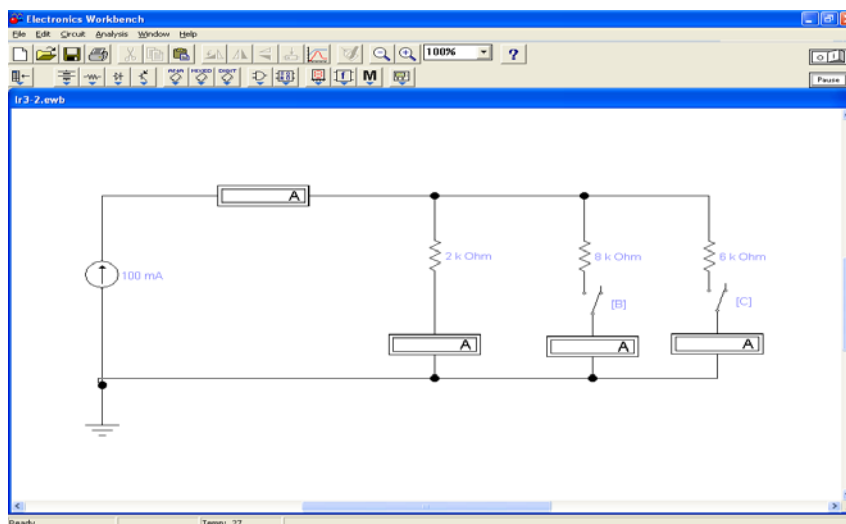


Рис. 3.19 Схема для исследования свойств делителя тока

Таблица 3.2.

Результаты измерений.

	Един.изм.		ВХОД	R1	R2	R2
R	Ом	B,C off	==	2	8	6
I	A					
R	Ом	B in, C off		2	3	6
I	A					
R	Ом	B in, C in		2	3	6
I	A					
R	Ом	C in, B off		2	3	6
I	A					

5. Перевести кнопку I/O в положение O. Рассчитать теоретические величины токов, которые должны показывать амперметры. Сделать выводы о свойствах делителя тока.

Эксперимент 3. Измерение параметров АЧХ и ФЧХ параллельного контура.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir3-3. На вопрос о сохранении изменений в файле Ir3-2 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 3.20). Она содержит параллельный контур, измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

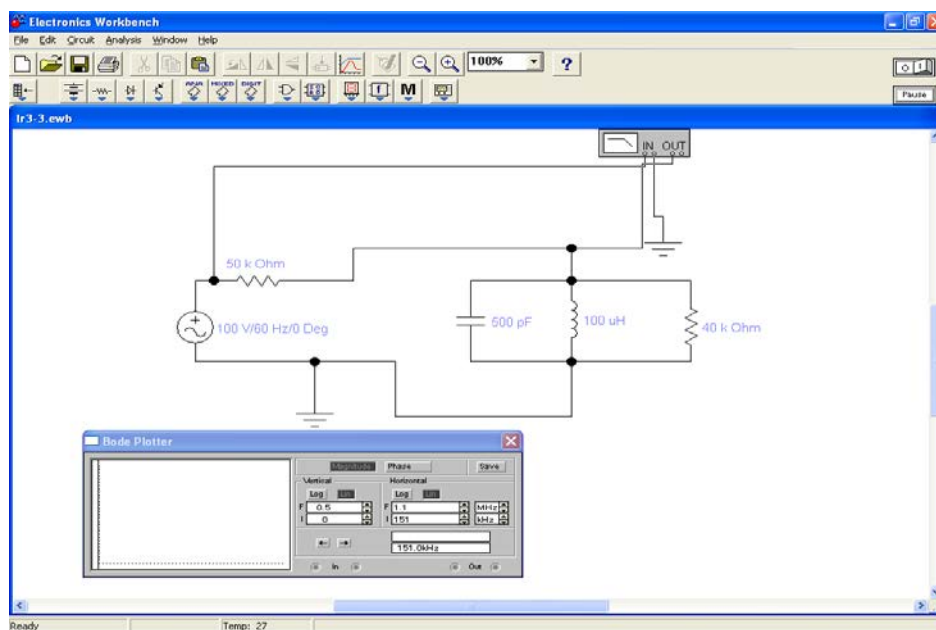


Рис. 3.20. Схема для исследования параметров АЧХ и ФЧХ параллельного контура

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Просмотреть, что представляет собой графики АЧХ и ФЧХ параллельного контура. Определить соответствуют ли они теоретическим

зависимостям, имеет ли место явление резонанса токов. Используя визирную линейку определить *резонансную частоту* f_0 параллельного контура (рис.3.21). Значение резонансной частоты записать в таблицу.

5. Сдвигая визирную линейку влево и вправо, измерить частоты f_{Π} и f_{Π} , на которых АЧХ уменьшается в 1.4 раза. Частоты f_{Π} и f_{Π} записать в таблицу. Рассчитать полосу пропускания контура и его добротность; результаты занести в таблицу 3.3.

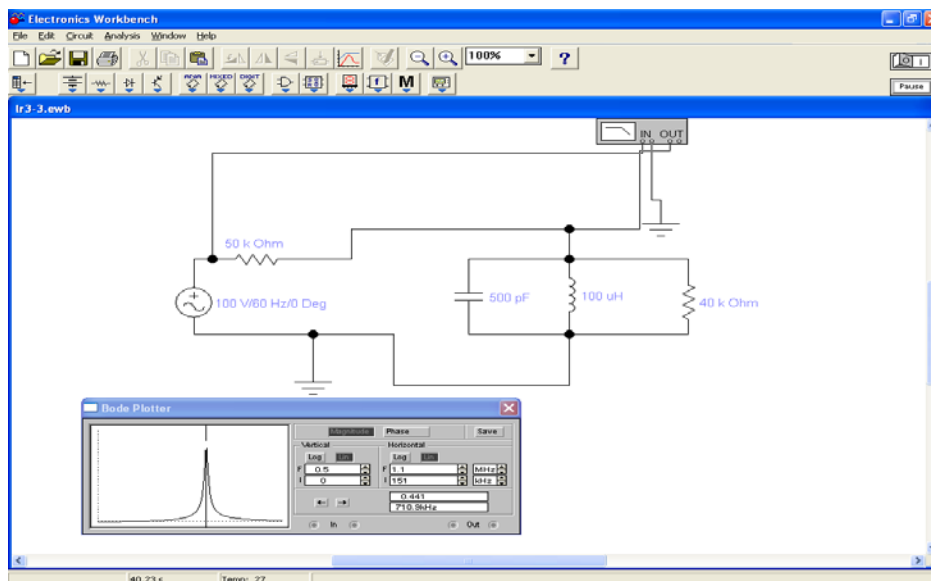


Рис. 3.21. Определение резонансной частоты параллельного контура

Таблица 3.3.

Результаты измерений.

Рез. част. f_0	f_{Π}	f_{Π}	Пол. проп. П	Доброт. Q

6. Сделать выводы о свойствах параллельного контура.

Эксперимент 4. Измерение частотных характеристик кварцевого пьезорезонатора.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir3-4. На вопрос о сохранении изменений в файле Ir3-3 дать отрицательный ответ.

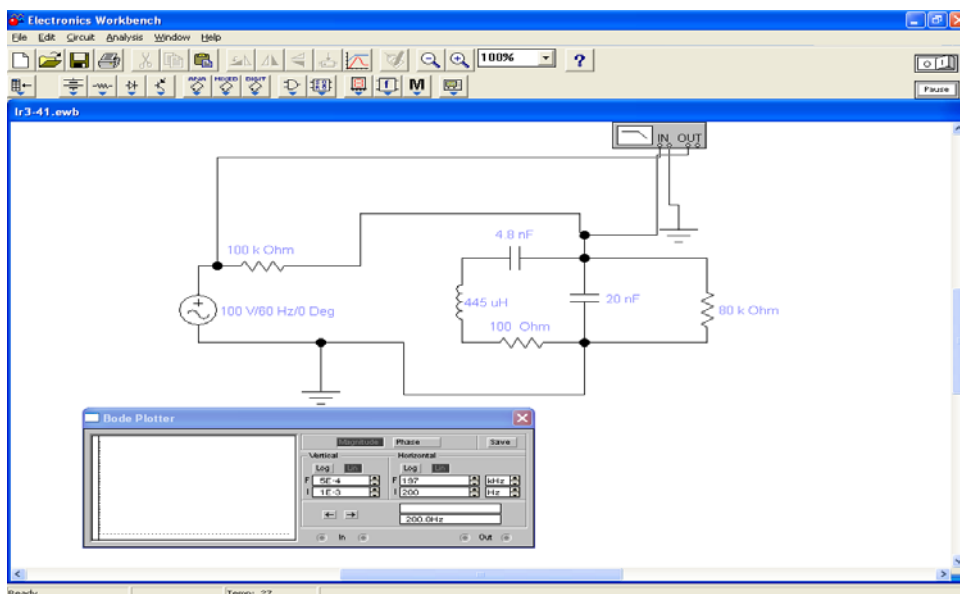


Рис. 3.22. Схема измерения частотных характеристик кварцевого пьезорезонатора

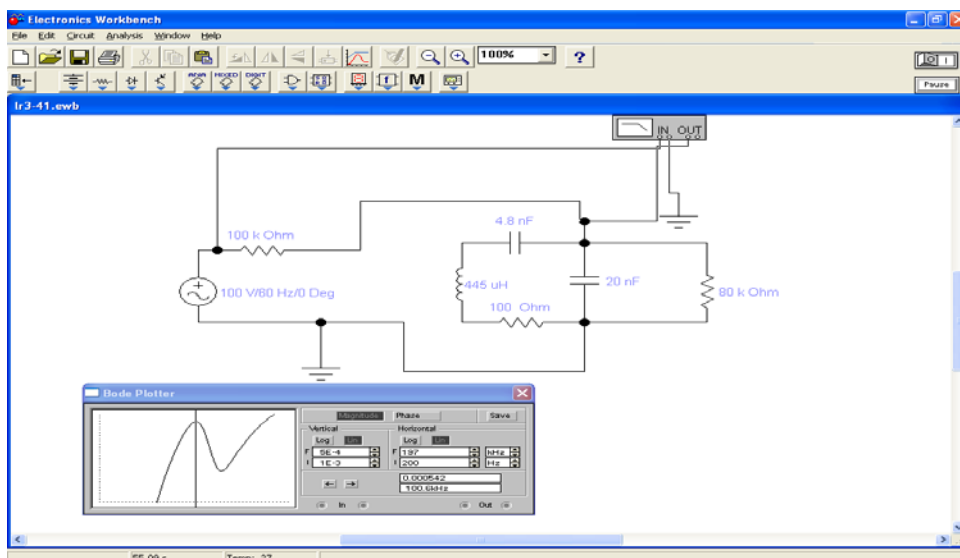


Рис. 3.23. Определение резонансной частоты кварцевого пьезорезонатора

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 3.22). Она содержит представленный схемой замещения кварце-

вый пьезорезонатор, а также измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на пиктограмму I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Просмотреть, что представляют собой графики АЧХ и ФЧХ кварцевого пьезорезонатора. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить и записать в отчет величины частот параллельного и последовательного резонанса (рис. 3.23).

5. Сделать выводы о частотных свойствах кварцевого пьезорезонатора.

Эксперимент 5. Измерение частотных характеристик ЦТС –(PZT-) керамического пьезорезонатора.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить:

1. Используя команды «Файл. Открыть», выбрав в контекстном меню необходимое и нажав кнопку «ОК» открыть файл Ir3-5. На вопрос о сохранении изменений в файле Ir3-4 дать отрицательный ответ.

2. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 3.24). Она содержит представленный схемой замещения ЦТС – (PZT-) керамический пьезорезонатор, а также измеритель частотных характеристик и вспомогательные элементы для измерения АЧХ и ФЧХ.

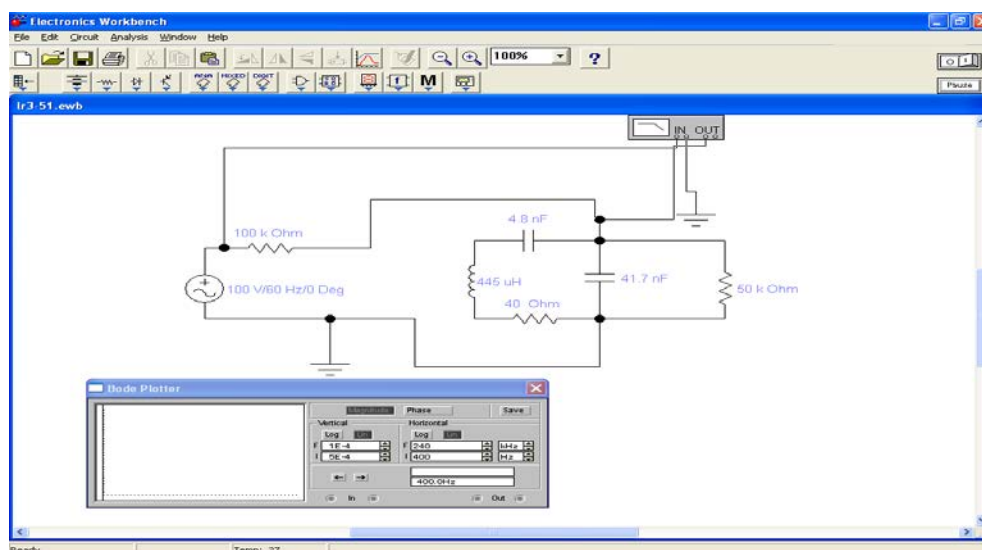


Рис. 3.24. Схема измерения частотных характеристик ЦТС – (PZT-) керамического пьезорезонатора

3. Запустить моделирующую программу, наведя указатель курсора на расположенную в правом верхнем углу пиктограмму включателя/выключателя I/O и щелкнув левой кнопкой мыши.

4. Просмотреть, что представляют собой графики АЧХ и ФЧХ ЦТС –(PZT-) керамического пьезорезонатора. Определить соответствуют ли они теоретическим зависимостям. Используя визирную линейку определить и записать в отчет величины частот параллельного и последовательного резонанса (рис.3.25).

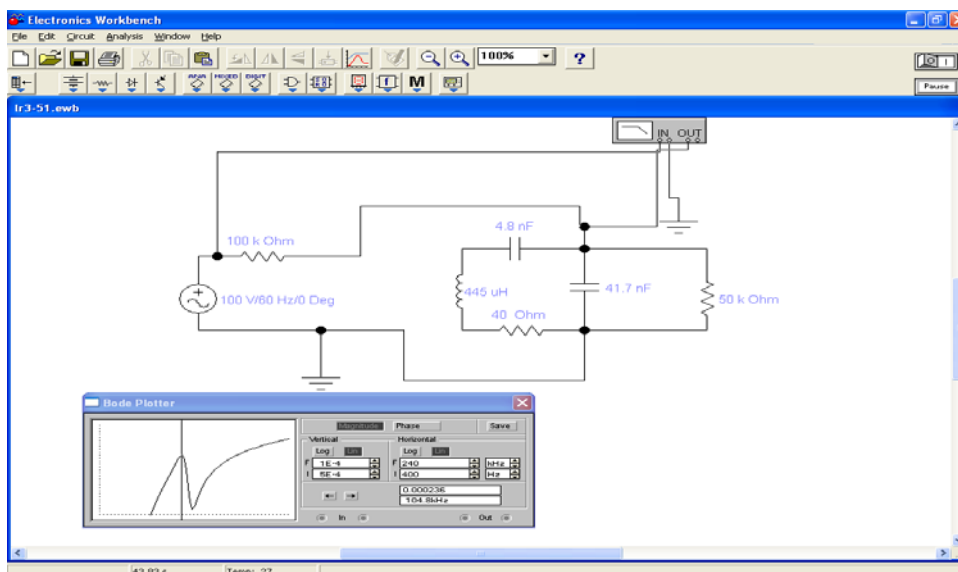


Рис. 3.25. Определение резонансной частоты ЦТС –(PZT-) керамического пьезорезонатора

5. Сделать выводы о частотных свойствах ЦТС –(PZT-) керамического пьезорезонатора.

Эксперимент 6. Измерение и анализ характеристик сложной электрической цепи.

Для выполнения задания необходимо выполнить следующие операции:

1. Закрыть ELECTRONICS WORKBENCH. Запустить из главного меню операционной системы Windows MATLAB. Для запуска MATLAB, как обычно, необходимо дважды щелкнуть по специфической иконке с надписью.

2. После запуска системы MATLAB на экране появится основное окно пользовательского интерфейса в открытом виде как на рис.3.26.

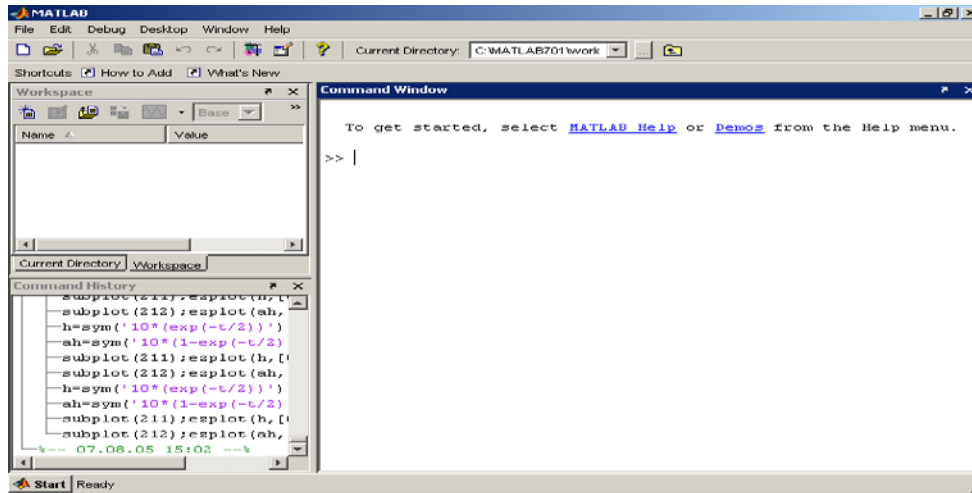


Рис. 3.26. Пример изображения «окна» MATLAB после загрузки

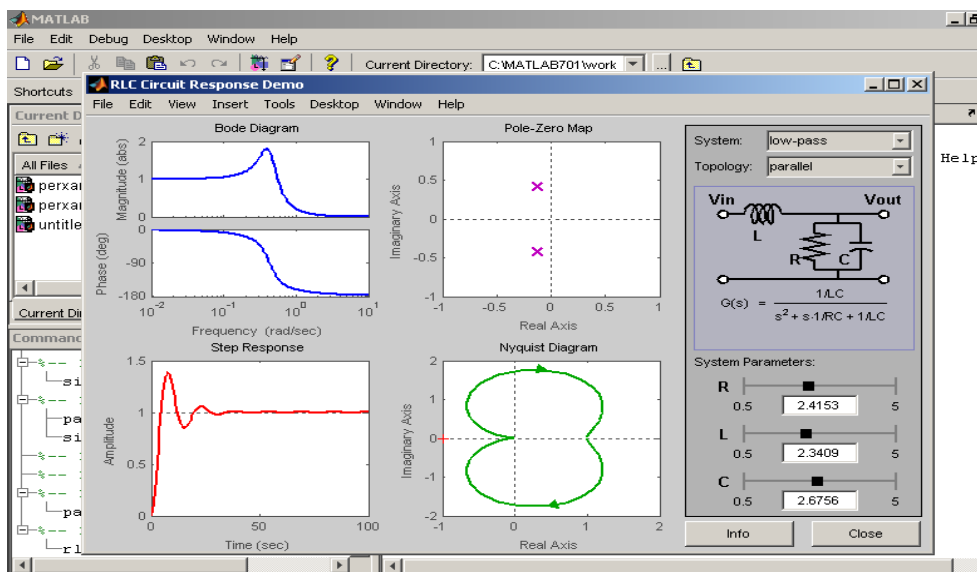


Рис. 3.27. Изображение окна интерактивной системы для исследования RLC цепей

3. Набрать в командной строке `>>rlcdemo` (малыми буквами – RLCDEMO). Через некоторое время откроется окно интерактивной системы для исследования RLC цепей, показанное на рис. 3.27. С его помощью можно провести исследование семи Г-образных RLC схем с различными вариантами исполнения продольного и поперечного элементов. Схема соединения элементов выбирается в строках меню

(SYSTEM, TOPOLOGY). При этом в диалоговом окне системы отображаются АЧХ и ФЧХ цепи (BODE DIAGRAM), переходная характеристика (STEP RESPONSE), диаграмма полюсов и нулей (POLE – ZERO MAP) и диаграмма Найквиста. Параметры выбранной RLC цепи задаются в разделе SYSTEM PARAMETERS ползунковыми движками. Кроме того, под каждой схемой приведены выражения для операторной передаточной характеристики.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Выбрать исследуемую Г-образную схему и записать ее функциональное назначение.

2. При среднем положении ползунков зарисовать для выбранной схемы графики АЧХ и ФЧХ цепи (BODE DIAGRAM), переходной характеристики (STEP RESPONSE) и диаграмму (POLE – ZERO MAP).

Описать словесно расположение полюсов и нулей и на этом основании дать характеристику цепи с точки зрения ее устойчивости, резонансных свойств. Выявить связь между параметрами АЧХ и ФЧХ цепи (BODE DIAGRAM) и переходной характеристикой (STEP RESPONSE).

3. Варьируя величинами R , L , C установите связь между значениями R , L , C и положением нулей и полюсов. Отрадите пунктирными линиями направление перемещения нулей и полюсов.

4. Варьируя величинами R , L , C установите связь между значениями R , L , C и формой АЧХ. Отрадите штриховыми линиями изменения графиков.

5. Варьируя величинами R , L , C установите связь между значениями R , L , C и формой переходной характеристики. Отрадите штриховыми линиями изменения графиков.

Для понимания происходящих изменений целесообразно представлять, какими величинами определяются коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной операторной характеристики.

3.2.5. Обработка результатов экспериментов

В этой части работы студент должен привести все необходимые расчеты по лабораторной работе, внести их в соответствующие таблицы, произвести их анализ и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой прибор используется в программе ELECTRONICS WORKBENCH для визуального наблюдения графиков зависимостей напряжения от частоты – амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазы от частоты – фазо-частотной характеристики (ФЧХ)?
2. Перечислите последовательность действий при исследовании свойств делителя напряжения.
3. Приведите и поясните схему установки для исследования свойств делителя тока.
4. Приведите и поясните схему установки для измерения параметров АЧХ и ФЧХ параллельного контура.
5. Что представляют собой графики АЧХ и ФЧХ параллельного контура?
6. Определите понятия резонанса токов, резонансной частоты параллельного контура, его полосу пропускания и добротность.
7. Что представляют собой графики АЧХ и ФЧХ кварцевого пьезорезонатора?
8. Опишите последовательность действий при измерении и анализе характеристик сложной электрической цепи с помощью системы MATLAB.

Индивидуальные задания № 3 к самостоятельной работе студентов

1. Для заданной преподавателем схемы электрической цепи и для вариантов величин элементов схемы, приведенных в таблицах 3.4, 3.5, определить величину и характер (активно-индуктивный, активно-емкостной и т. д.) входного сопротивления схемы.

2. Пользуясь понятием о делителе напряжения, для заданной преподавателем схемы электрической цепи и для вариантов величин элементов схемы, приведенных в таблицах, 3.4, 3.5, рассчитать комплексную амплитуду напряжения для таблицы 3.4 – на конденсаторе, а для таблицы 3.5 – на индуктивности.

3. Пользуясь понятием о делителе тока, для заданной преподавателем схемы электрической цепи и для вариантов величин элементов схемы, приведенных в таблицах, 3.4, 3.5, рассчитать комплексную ам-

плитуду тока для таблицы 3.4 – на конденсаторе, а для таблицы 3.5 – на индуктивности. Рассчитав также напряжения на этих элементах, проверить соответствие полученных результатов с результатами задания 2.

4. Для заданной преподавателем схемы электрической цепи, которая приведена на рис. 3.28, и величин элементов, согласно таблице 3.6, методом контурных токов рассчитать комплексные амплитуды токов и напряжений на трех элементах. Амплитуды источников ЭДС равны $E_1 = 0,1 n$ (В) и $E_2 = 0,2 n$ (В) (n – см. пункт 6).

5. Для заданной преподавателем схемы электрической цепи, которая приведена на рис. 3.28, и величин элементов, согласно таблице 3.6, методом узловых напряжений рассчитать комплексные амплитуды токов и напряжений на тех же трех элементах. Проверить правильность расчетов путем сравнения с результатами задания 4.

6. Для заданной преподавателем схемы электрической цепи (таблица 3.7 (цифры в таблице обозначают номер варианта)) рассчитать операторную передаточную характеристику. Для этой цепи построить диаграмму нулей и полюсов, АЧХ, ФЧХ, переходную и импульсную характеристики. Параметры элементов выбираются по формулам

$$L = \frac{n}{m+n} \text{ (мкГн)}, C = \frac{1}{2n(m+n)} \text{ (мкФ)}, R1=10n, R2=20n,$$

где

n – соответствует номеру, под которым записана фамилия студента в журнале группы, m – соответствует номеру группы на факультете.

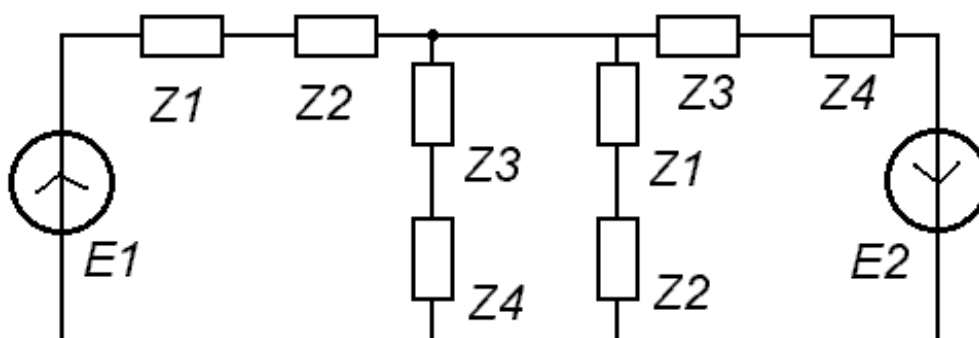
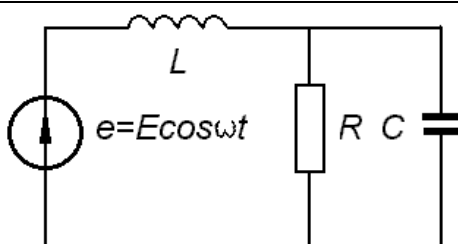


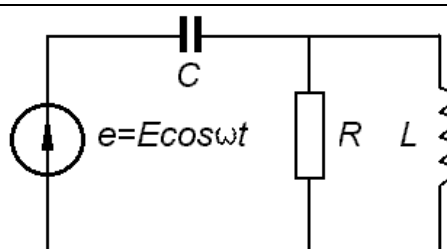
Рис. 3.28. Схема электрической цепи для выполнения индивидуального задания

Таблица 3.4.



Вари ант	E	X_L	R	X_C			Вари ант	B	E	X_L	R	X_C		
	B	OM	OM	OM	ω_1	ω_2			B	OM	OM	OM	ω_1	ω_2
1	150	2	3	3	ω	2ω	20	205	7	9	6	$\omega/2$	ω	
2	150	2	6	6	ω	2ω	21	212	2	6	5	ω	2ω	
3	150	6	14	14	ω	2ω	22	218	2	10	6	ω	2ω	
4	150	6	16	4	$\omega/2$	ω	23	218	4	6	5	ω	2ω	
5	150	2	3	4	ω	2ω	24	260	2	4	3	ω	2ω	
6	150	2	4	6	ω	2ω	25	260	2	4	8	ω	2ω	
7	153	3	3	4	ω	2ω	26	260	2	6	4	ω	2ω	
8	156	4	8	3	$\omega/2$	ω	27	260	4	6	2	$\omega/2$	ω	
9	156	4	8	6	ω	2ω	28	260	4	10	10	ω	2ω	
10	156	8	4	2	$\omega/2$	ω	29	260	5	4	4	$\omega/2$	ω	
11	156	10	8	8	$\omega/2$	ω	30	260	6	8	4	$\omega/2$	ω	
12	180	6	6	9	ω	2ω	31	260	6	10	10	ω	2ω	
13	183	2	5	3	ω	2ω	32	260	5	5	2	$\omega/2$	ω	
14	183	3	4	8	ω	2ω	33	260	5	5	3	$\omega/2$	ω	
15	183	3	5	2	$\omega/2$	ω	34	290	2	7	7	ω	2ω	
16	183	3	10	4	ω	2ω	35	290	5	8	4	$\omega/2$	ω	
17	183	5	9	3	$\omega/2$	ω	36	300	6	6	2	ω	2ω	
18	204	6	10	3	$\omega/2$	ω	37	300	6	6	4	ω	2ω	
19	205	5	8	10	ω	2ω	38	300	9	6	6	$\omega/2$	ω	

Таблица 3.5.

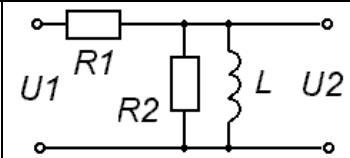
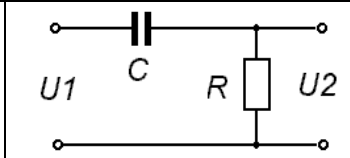
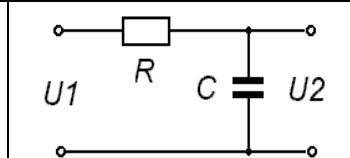
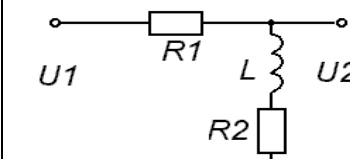
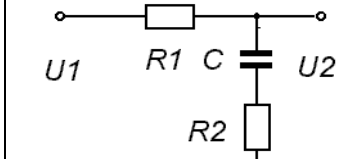
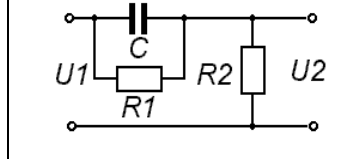
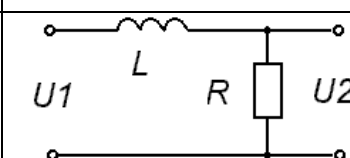
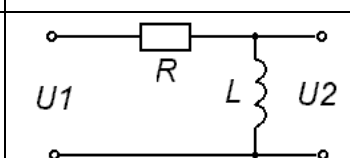
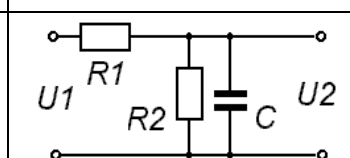
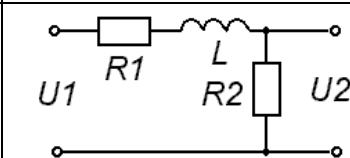
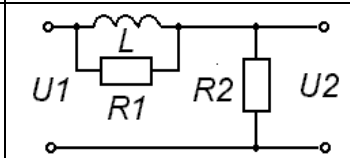
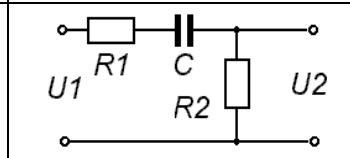


Вари ант	E	X_L	R	X_C			Вари ант	E	X_L	R	X_C		
	B	Ом	Ом	Ом	ω_1	ω_2		B	Ом	Ом	Ом	ω_1	ω_2
1	150	4	10	5	$\omega/2$	ω	20	274	7	6	2	ω	2ω
2	150	3	8	2	ω	2ω	21	275	3	7	7	$\omega/2$	ω
3	150	3	7	7	$\omega/2$	ω	22	275	3	10	5	$\omega/2$	ω
4	150	6	6	4	ω	2ω	23	275	4	7	7	$\omega/2$	ω
5	150	4	6	3	ω	2ω	24	286	6	10	10	$\omega/2$	ω
6	150	3	4	4	$\omega/2$	ω	25	290	9	10	5	ω	2ω
7	218	6	10	2	ω	2ω	26	292	6	8	2	ω	2ω
8	222	3	6	10	$\omega/2$	ω	27	292	8	9	6	ω	2ω
9	232	2	7	6	$\omega/2$	ω	28	296	10	6	3	ω	2ω
10	232	6	7	2	ω	ω	29	298	2	4	7	$\omega/2$	ω
11	255	6	7	3	ω	ω	30	298	7	4	2	$\omega/2$	ω
12	260	10	10	6	ω	2ω	31	300	3	10	5	ω	2ω
13	272	2	5	6	$\omega/2$	2ω	32	300	4	7	7	$\omega/2$	ω
14	272	6	5	2	ω	2ω	33	300	6	8	8	$\omega/2$	ω
15	272	10	9	6	ω	ω	34	300	6	4	4	ω	2ω
16	273	3	4	6	$\omega/2$	2ω	35	300	4	8	2	$\omega/2$	ω
17	273	3	9	2	ω	ω	36	300	2	10	5	ω	2ω
18	273	3	9	6	$\omega/2$	ω	37	300	2	8	8	$\omega/2$	ω
19	273	6	9	3	ω	2ω	38	300	2	5	10	$\omega/2$	ω

Таблица 3.6.

Ва- ри- ант	Виды элементов				Значения параметров элементов		
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	R , кОм	L , мГн	C , нФ
1	R	<i>L</i>	0	<i>C</i>	1	2	0,05
2	<i>L</i>	<i>R</i>	0	<i>C</i>	2	4	0,04
3	<i>C</i>	<i>L</i>	0	<i>R</i>	3	6	0,03
4	0	<i>R</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	4	8	0,02
5	0	<i>R</i>	<i>C</i>	<i>L</i>	5	10	0,01
6	0	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	6	12	0,009
7	R	0	<i>C</i>	<i>L</i>	7	14	0,008
8	<i>L</i>	0	<i>C</i>	<i>R</i>	8	16	0,007
9	<i>C</i>	0	<i>L</i>	<i>R</i>	9	18	0,006
10	0	<i>L</i>	<i>R</i>	<i>C</i>	2	2	0,005
11	0	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>L</i>	2	1	0,04
12	0	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	3	3	0,03
13	R	<i>L</i>	0	<i>C</i>	4	5	0,02
14	<i>L</i>	<i>C</i>	0	<i>R</i>	5	7	0,01
15	<i>C</i>	<i>L</i>	0	<i>R</i>	6	9	0,009
16	0	<i>R</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	7	11	0,008
17	0	<i>R</i>	<i>C</i>	<i>L</i>	8	13	0,007
18	0	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	9	15	0,006
19	R	0	<i>L</i>	<i>C</i>	10	17	0,005
20	<i>L</i>	0	<i>R</i>	<i>C</i>	5	19	0,004
21	<i>C</i>	0	<i>L</i>	<i>R</i>	2	1	0,05
22	<i>R</i>	<i>L</i>	0	<i>C</i>	3	2	0,04
23	<i>L</i>	<i>R</i>	0	<i>C</i>	4	3	0,03
24	<i>C</i>	<i>R</i>	0	<i>L</i>	5	4	0,025
25	0	<i>R</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	6	5	0,02
26	0	<i>C</i>	<i>R</i>	<i>L</i>	7	6	0,015
27	0	<i>C</i>	<i>L</i>	<i>R</i>	8	7	0,012
28	R	0	<i>C</i>	<i>L</i>	9	8	0,010
29	<i>L</i>	0	<i>C</i>	<i>R</i>	10	9	0,008
30	<i>C</i>	0	<i>L</i>	<i>R</i>	5	10	0,045
$\omega = 10^6 \text{ c}^{-1}$							

Таблица 3.7.

Электрические схемы					
1 13 25		5 17 29		9 21 33	
2 14 26		6 18 30		10 22 34	
3 5 17		7 19 31		11 23 35	
4 16 28		8 20 32		12 24 36	

Тема 4. Спектральное представление токов и напряжений в электрических цепях

4.1. Практическое занятие № 4

Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов спектров электрических сигналов и визуализации полученных результатов

4.1.1. Общие сведения

Для понимания того, что представляет собой электрический сигнал, очень важно уметь находить и, затем, анализировать, для получения информации о сигнале, спектральную плотность сигнала.

Спектр произвольного апериодического сигнала (спектральная плотность сигнала) определяется *интегралом Фурье*

$$\dot{S}(\omega) = S(\omega)e^{-j\psi(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (4.1)$$

Спектральная плотность сигнала, являясь комплексной величиной, на конкретной частоте может быть представлена в показательной форме $\dot{S}(\omega) = S(\omega)e^{-j\psi(\omega)}$. Соответственно, для частоты f ее можно определять модулем (амплитудно-частотный спектр) $S(f) = |\dot{S}(f)|$ и аргументом $\psi(f) = \arg|\dot{S}(f)|$ (фазочастотным спектром).

Модуль спектральной функции $S(f)$ характеризует плотность распределения амплитуд спектра непериодического сигнала по частоте (закон распределения плотности амплитуд).

Аргумент спектральной функции $\psi(f) = \arg|\dot{S}(f)|$ характеризует плотность распределения фаз спектра непериодического сигнала по частоте (закон распределения плотности фаз).

По заданной спектральной плотности сигнала $\dot{S}(\omega)$ всегда можно восстановить сигнал $u(t)$

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (4.2)$$

Эта формула называется *обратным преобразованием Фурье* для сигнала .

Преобразования Фурье позволяют определить, как влияют те или иные действия над сигналом во временной области на его представление в частотной области (на его спектр), и наоборот.

Как отмечалось в лекциях спектральную плотность аperiodического сигнала можно определять двумя способами.

Первый способ основывается на аналитических выкладках, позволяющих получить спектр в виде формул. MATLAB используется в этом случае для получения графиков модуля и аргумента спектральной плотности.

Второй способ опирается на дискретизацию сигнала бесконечно короткими импульсами S_n , и использует специальные алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ), которые сокращают количество вычислительных операций и тем самым ускоряют счет на ЭВМ. Использование дискретизации позволяет, работая с MATLAB, без предварительного получения формул, сразу численно вычислять спектры сигналов, в том числе и для случаев, когда аналитические расчеты затруднены.

Рассмотрим решение задач по нахождению спектров электрических сигналов этими двумя способами.

4.1.2. Задачи

Задача 1. Определить спектральную плотность треугольного импульса, расположенного симметрично относительно оси ординат (рис. 4.1), если его амплитуда U_m равна 10 В, а длительность $t_M = 1$ мс.

Решение задачи 1 первым способом.

Сначала получим формулу для расчета комплексной спектральной плотности сигнала.

Для облегчения процесса нахождения спектральной плотности импульсного сигнала, представленного отрезками прямых, и упрощения математических выкладок будем использовать прием, заключающийся в

дифференцировании исходного сигнала необходимое число раз, чтобы он предстал в виде нескольких δ -функций.

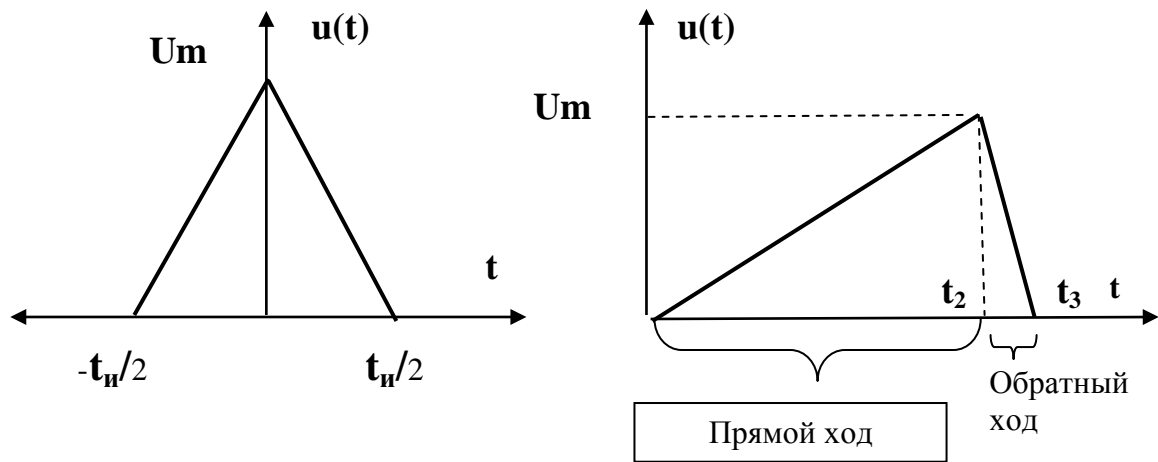


Рис. 4.1. Треугольный импульс, расположенный симметрично относительно оси ординат, и пилообразный импульс

После первого дифференцирования сигнала получаем два разнополярных прямоугольных импульса (рис. 4.2). Вторая производная имеет вид трех δ -функций, умноженных на величину скачка (рис. 4.2).

Математическая модель второй производной треугольного импульсного сигнала такова:

$$u''(t) = \frac{2U_m}{t_{И}} \left[\delta\left(t + \frac{t_{И}}{2}\right) + \delta\left(t - \frac{t_{И}}{2}\right) \right] - \frac{4U_m}{t_{И}} \delta(t). \quad (4.3)$$

Спектральная плотность второй производной, на основании свойств линейности, сдвига во времени

$$\dot{S}_{(2)}(\omega) = \frac{2U_m}{t_{И}} \left[\ell^{j\left(\frac{\omega t_{И}}{2}\right)} + \ell^{-j\left(\frac{\omega t_{И}}{2}\right)} - 2 \right]. \quad (4.4)$$

Используя связь между спектрами сигналов и их производными, окончательно получаем

$$S(\omega) = \frac{\dot{S}_{(2)}(\omega)}{j\omega j\omega} = \dot{S}_{(2)}(\omega) = \frac{-2U_m}{\omega^2 t_H} \left[e^{j(\frac{\omega t_u}{2})} + e^{-j(\frac{\omega t_u}{2})} - 2 \right]. \quad (4.5)$$

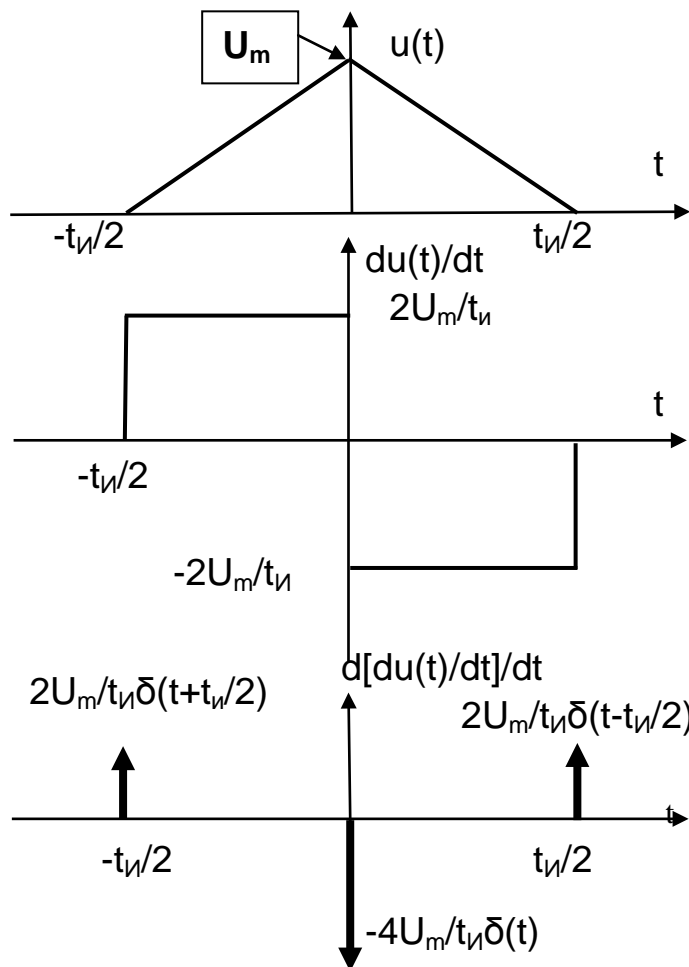


Рис. 4.2. Треугольный импульс и его математические модели после дифференцирования

MATLAB-выражения для вычисления комплексной спектральной плотности будут иметь вид.

После ввода исходных данных

```
um1=10;
```

```
timp=10e-1;
```

```
wnach=0.001;
```

```
wkon=4.5/timp;
```

и формирования вектор-строки частот

```
f1=linspace(wnach,wkon,1024);
```

вычисляем комплексную спектральную плотность

```

wtiraz2=pi*timp.*f1;
sm=(-2*um1/timp)./((2*pi.*f1).^2);
spkom=sm.*((exp(wtiraz2.*i)+exp(-wtiraz2.*i))-2);
ее модуль и аргумент.
spmod=abs(spkom);
sparg=180/pi.*angle(spkom);
затем, строим графики модуля и аргумента спектральной плотности
subplot(211);plot(f1,spmod,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f), B/Gz');
subplot(212);plot(f1,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('arg S(f), grad');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики, как на рис. 4.3.

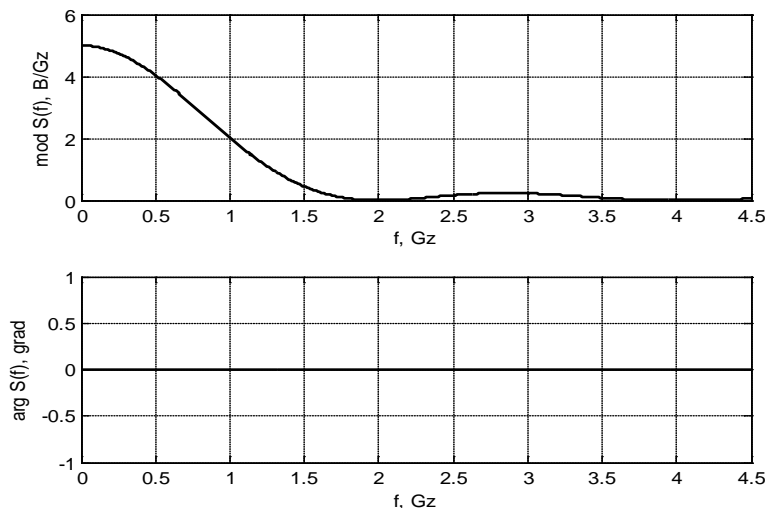


Рис. 4.3. Модуль и аргумент спектральной функции треугольного импульса, симметричного относительно оси ординат

Графики модуля и аргумента спектральной функции строят используя отрезки вертикальных линий, используя команду stem.

МАТЛАБ-выражения для вычисления комплексной спектральной плотности в этом случае будут иметь вид

```

um1=10;
timp=10e-1;
wnach=0.001;
wkon=4.5/timp;
f1=linspace(wnach,wkon,1024);

```

```

wtiraz2=pi*timp.*f1;
sm=(-2*um1/timp)./((2*pi.*f1).^2);
spkom=sm.*(exp(wtiraz2.*i)+exp(-wtiraz2.*i))-2);
spmod=abs(spkom);
sparg=180/pi.*angle(spkom);
subplot(211);stem(f1,spmod,'r','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f), B/Gz');
subplot(212);plot(f1,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('arg S(f), grad');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики, как на рис. 4.4.

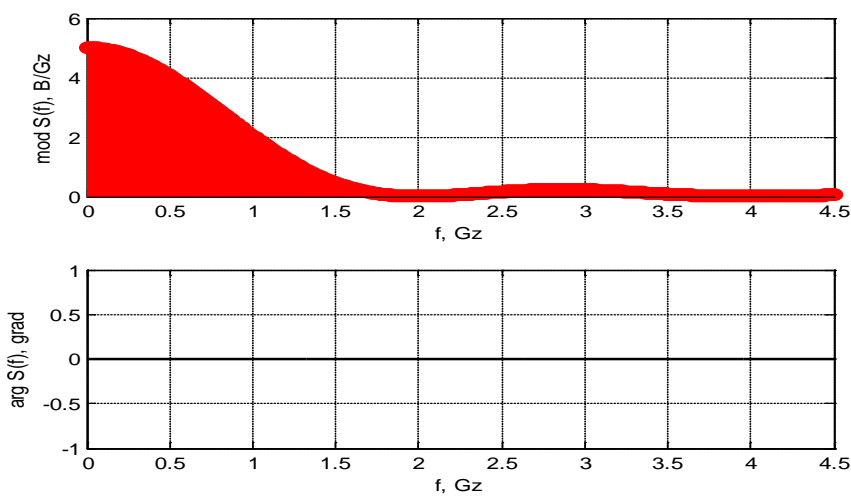


Рис. 4.4. Модуль и аргумент спектральной функции треугольного импульса, построенные с использованием команды stem

Задача 2. Определить спектральную плотность треугольного пилообразного импульса (рис.4.1), если его амплитуда U_m равна 10 В, а длительность фронта $t_\phi = 8$ мс, длительность спада $t_{\text{сп}} = 2$ мс.

Решение:

Решение задачи 2 первым способом.

Сначала получим формулу для расчета комплексной спектральной плотности сигнала. Для облегчения процесса нахождения спектральной плотности импульсного пилообразного сигнала, представленного отрезками прямых, и упрощения математических выкладок используем прием, заключающийся в дифференцировании исходного сигнала необходимое число раз, чтобы он предстал в виде нескольких δ -функций.

После первого дифференцирования исходного сигнала получаем два разнополярных прямоугольных импульса. Вторая производная имеет вид трех δ -функций, умноженных на величину скачка.

Математическая модель второй производной треугольного импульсного сигнала такова:

$$u''(t) = \frac{U_m}{t_2} \delta(t) + \frac{U_m t_3}{t_2(t_3 - t_2)} \delta(t - t_2) + \frac{U_m}{(t_3 - t_2)} \delta(t - t_3). \quad (4.6)$$

Вторая производная имеет вид трех δ -функций, умноженных на величину скачка.

Спектральная плотность второй производной, на основании свойств линейности, сдвига во времени

$$\dot{S}_{(2)}(\omega) = \frac{U_m}{1} \left[\frac{1}{t_2} - \frac{t_3}{(t_3 - t_2)t_2} \ell^{-j(\omega t_2)} + \frac{1}{t_3 - t_2} \ell^{-j(\omega t_3)} \right]. \quad (4.7)$$

Используя связь между спектрами сигналов и их производными, окончательно получаем

$$\dot{S}(\omega) = \frac{\dot{S}_{(2)}(\omega)}{j\omega j\omega} = \frac{-U_m}{\omega^2} \left[\frac{1}{t_2} - \frac{t_3}{(t_3 - t_2)t_2} \ell^{-j(\omega t_2)} + \frac{1}{t_3 - t_2} \ell^{-j(\omega t_3)} \right]. \quad (4.8)$$

MATLAB-выражения для вычисления комплексной спектральной плотности пилообразного импульса будут иметь вид

```
um2=10;
t1=0;
t2=8;
t3=10;
timp=t3;
wnach=0.001;
wkon=10/timp;
f1=linspace(wnach,wkon,1024);
w=2*pi.*f1;
```

```

wt2=2*pi*t2.*f1;
wt3=2*pi*t3.*f1;
mnozhspl=-um2./(w).^2;
spkom=mnozhspl.*(1/t2-(t3/(t2*(t3-t2)))).*exp(-i.*wt2)...
+(1/(t3-t2)).*exp(-i.*wt3);
spmod=abs(spkom);
sparg=180/pi.*unwrap(angle(spkom));
subplot(211);plot(f1,spmod,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f), B/Gz');
subplot(212);plot(f1,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('arg S(f), grad');

```

В итоге модуль и аргумент спектральной функции пилообразного импульса, построенные по аналитическим выражениям, будут иметь вид (рис. 4.5).

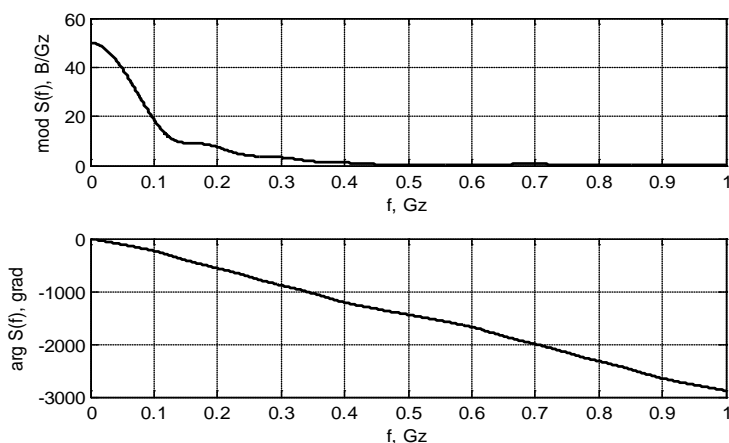


Рис. 4.5. Модуль и аргумент спектральной функции пилообразного импульса, построенные по аналитическим выражениям

Задача 3. Определить, используя быстрое преобразование Фурье, спектральную плотность треугольного пилообразного импульса (рис. 4.1), если его амплитуда U_m равна 10 В, а длительность фронта $t_\phi = 8$ мс, длительность спада $t_{сп} = 2$ мс.

Использование дискретизации позволяет численно вычислять спектры сигналов, в том числе и для случаев, когда аналитические расчеты затруднены. Для этой цели сигнал задается таблицей (вектор-

строкой) численных значений, определенных в точках (узлах) дискретизации. Дискретные отсчеты сигнала делают через одинаковые временные интервалы на протяжении одного периода. Спектральная плотность при этом будет определяться по формуле

$$\dot{S}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k e^{-j2\pi nk/N}. \quad (4.9)$$

Формула определяет последовательность коэффициентов, образующих дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

Следует иметь в виду, что коэффициенты ДПФ, номера которых располагаются симметрично относительно $N/2$, образуют сопряженные пары. Поэтому принято считать, что коэффициенты $C_{N/2+1}, C_{N/2+2}, C_{N/2+3}, \dots$ отвечают отрицательным частотам. При изучении амплитудного спектра они не дают новых сведений. Ясно, что при любом N число гармоник, определяемых с помощью ДПФ, составляет половину числа отсчетов.

MATLAB-выражения для вычисления комплексной спектральной плотности пилообразного импульса с помощью БПФ будут иметь вид.

Сначала вводим исходные данные

```
um1=10;
timp=10;
tmax=55*timp;
fnach=0;
nn=1024;
```

```
Зная время наблюдения сигнала tmax, определяем длительность
шага дискретизации deltt, максимальную частоту спектра сигнала fmax и
интервал между частотными составляющими вычисляемого спектра df
deltt=tmax/(nn);
fmax=1/deltt;
df=1/tmax;
```

Формируем вектор-строку значений частот, в которых будет вычислено Фурье-преобразование

```
f21=(fnach:df:fmax);
f2=f21(1:end-1);
```

Используя линейную интерполяцию, формируем вектор-строки времен и мгновенных значений сигнала

```

t4=linspace(0,tmax,nn+1);
ti=[0 timp*0.8 timp tmax];
uti=[0 um1 0 0];
utint=interp1(ti,uti,t4);
tt=t4(1:end-1);
ut=utint(1:end-1);

```

Применяем команду `fft` для вычисления, с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье, комплексной спектральной плотности

```
spkom=fft(ut).*deltt;
```

Находим модуль и аргумент спектральной плотности

```

spmod=abs(spkom);
sparg=180/pi.*unwrap(angle(spkom));

```

Строим графики сигнала, модуля и аргумента спектральной плотности

```

subplot(311);plot(tt,ut,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, sec');ylabel(' U(t),B');
subplot(312);plot(f2,spmod,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f),B/Gz');
subplot(313);plot(f2,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f,Gz');ylabel('arg S(f),grad');

```

После нажатия клавиши `ENTER` получаем графики, показанные на рис. 4.6. Как следует из рисунка, правее частоты 1 Гц (коэффициенты ДПФ, номера которых больше $N/2$) спектр содержит сопряженные копии начальных членов в обратном порядке. По этой причине спектральные компоненты, близкие к нулевой частоте, группируются по краям спектральной диаграммы. Это не всегда удобно с точки зрения физического восприятия спектра. Есть специальные алгоритмы, которые обеспечивают перегруппировку элементов выходного массива преобразования Фурье таким образом, что компоненты, близкие к нулевым частотам, оказываются в центре графика. Для построения графика спектральной плотности того же пилообразного импульса, но уже с перегруппировкой, необходимо ввести следующие MATLAB-выражения. Перегруппировку частотных компонент осуществляет команда `fftshift`.

```

um1=10;
timp=10;

```

```

tmax=55*timp;
fnach=0;
nn=1024;
deltt=tmax/(nn);
fmax=1/deltt;
df=1/tmax;

```

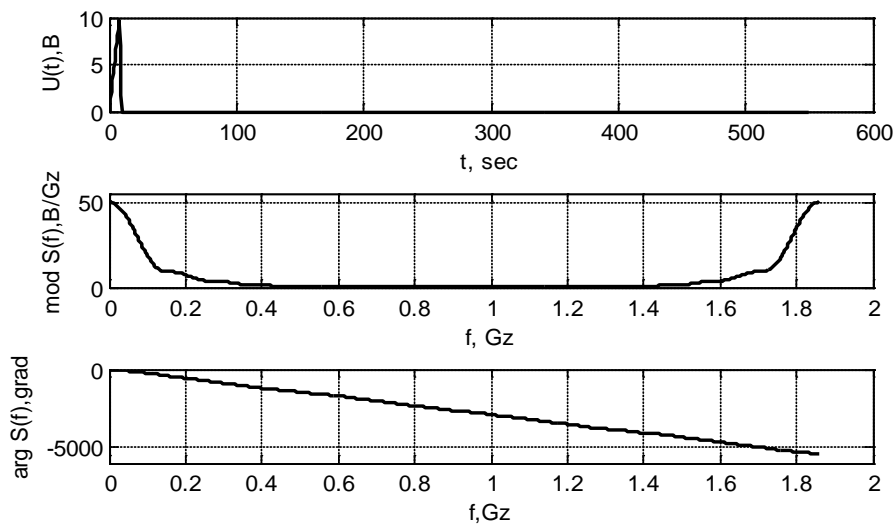


Рис.4.6. Импульс, модуль и аргумент спектральной функции пилообразного импульса, построенные с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье

```

f21=(fnach:df:fmax);
f2=f21(1:end-1);
t4=linspace(0,tmax,nn+1);
ti=[0 timp*0.8 timp tmax];
uti=[0 um1 0 0];
utint=interp1(ti,uti,t4);
tt=t4(1:end-1);
ut=utint(1:end-1);
spkomnp=fft(ut).*deltt;
spkom=fftshift(spkomnp);
spmod=abs(spkom);
sparg=180/pi.*unwrap(angle(spkom));
f3=f2-fmax/2;
subplot(311);plot(tt,ut,'k','linewidth',2);grid on

```

```

xlabel('t, sec');ylabel(' U(t),B');
subplot(312);plot(f3,spmod,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f),B/Gz');
subplot(313);plot(f3,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f,Gz');ylabel('arg S(f),grad');

```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики, как на рис. 4.7.

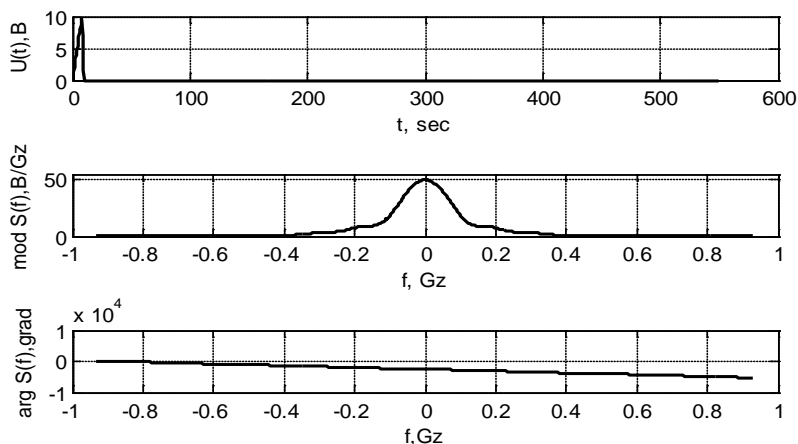


Рис. 4.7. Импульс, модуль и аргумент спектральной функции пилообразного импульса, построенные с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье и перегруппировкой частотных компонент

Фрагменты графиков, представляющие наибольший интерес, при использованном масштабе, получаются мало информативными. Поэтому целесообразно изменить масштабы по осям таким образом, чтобы можно было анализировать наиболее существенные части графиков. Для этого необходимо ввести следующие MATLAB-выражения.

```

um1=10;
timp=10;
tmax=55*timp;
fnach=0;
nn=1024;
deltt=tmax/(nn);
fmax=1/deltt;
df=1/tmax;
f21=(fnach:df:fmax);
f2=f21(1:end-1);

```

```

t4=linspace(0,tmax,nn+1);
ti=[0 timp*0.8 timp tmax];
uti=[0 um1 0 0];
utint=interp1(ti,uti,t4);
tt=t4(1:end-1);
ut=utint(1:end-1);
spkomnp=fft(ut).*deltt;
spkom=fftshift(spkomnp);
spm=abs(spkom);
sparg=180/pi.*unwrap(angle(spkom));
spm=max(spm);
argmax=1.1*max(sparg);
argmin=min(sparg);
f3=f2-fmax/2;
subplot(311);plot(tt,ut,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, sec');ylabel(' U(t),B');axis([0 1.2*timp 0 1.1*um1]);
subplot(312);plot(f3,spm,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f),B/Gz');axis([-fmax/10 fmax/2 0 1.1*spm]);
subplot(313);plot(f3,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f,Gz');ylabel('arg S(f),grad');axis([-fmax/10 fmax/2 argmin argmax]);

```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики как на рис. 4.8.

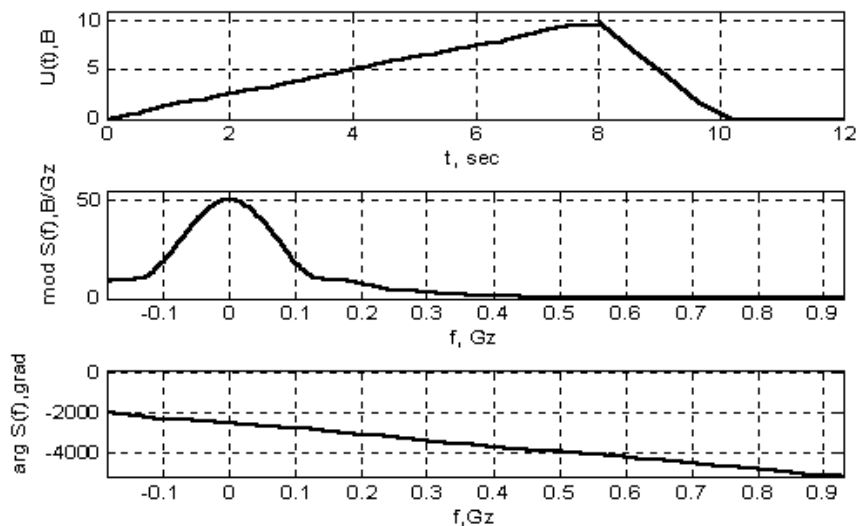


Рис. 4.8. Модуль и аргумент спектральной функции пилообразного импульса, построенные с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье, перегруппировки частотных компонент и установкой требуемых масштабов по осям

Задача 4. Определить, используя быстрое преобразование Фурье, спектральную плотность треугольного импульса, расположенного симметрично относительно оси ординат (рис. 4.1), если его амплитуда U_m равна 10 В, а длительность $t_{и} = 1$ мс.

Решение:

MATLAB-выражения для решения задачи будут следующими:

```

um1=10;
timp=1;
tmax=55*timp;
fnach=0;
nn=1024;
deltt=tmax/(nn);
fmax=1/deltt;
df=1/tmax;
f21=(fnach:df:fmax);
f2=f21(1:end-1);
t4=linspace(0,tmax,nn+1);
ti=[0 timp/2 timp tmax];
uti=[0 um1 0 0];
utint=interp1(ti,uti,t4);
tt=t4(1:end-1);
ut=utint(1:end-1);
spkomnp=fft(ut).*deltt;
spkom=fftshift(spkomnp);
spmod=abs(spkom);
sparg=180/pi.*unwrap(angle(spkom));
spm=max(spmod);
argmax=1.1*max(sparg);
argmin=min(sparg);
f3=f2-fmax/2;
subplot(311);plot(tt,ut,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('t, sec');ylabel(' U(t),B');axis([0 1.2*timp 0 1.1*um1]);
subplot(312);plot(f3,spmod,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f, Gz');ylabel('mod S(f),B/Gz');axis([-fmax/10 fmax/2 0 1.1*spm]);
subplot(313);plot(f3,sparg,'k','linewidth',2);grid on
xlabel('f,Gz');ylabel('arg S(f),grad');axis([-fmax/10 fmax/2 argmin argmax]);

```

В результате графики модуля и аргумента спектральной функции симметричного треугольного импульса будут иметь вид как на рис.

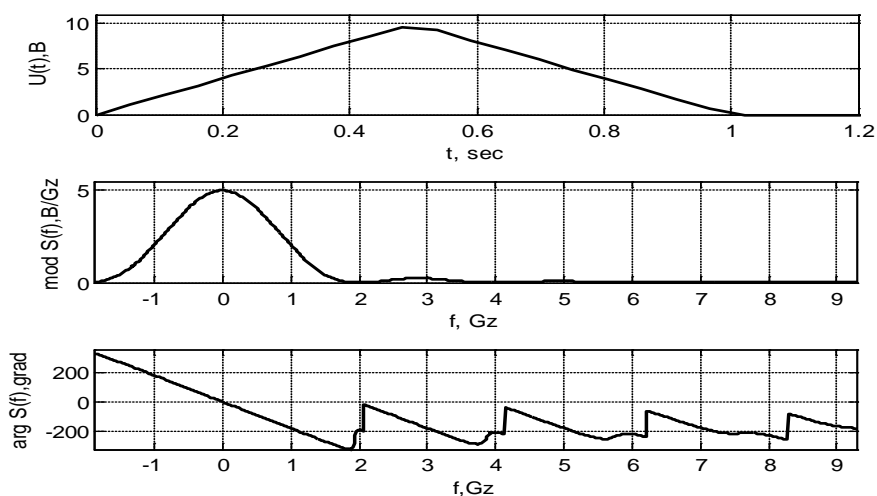


Рис. 4.9. Модуль и аргумент спектральной функции симметричного треугольного импульса, построенные с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье, перегруппировки частотных компонент и установкой требуемых масштабов по осям

Задача 5. Определить какие вейвлеты используются в системе MATLAB.

Решение.

Для просмотра имеющихся в распоряжении вейвлетов воспользуемся вейвлет-менеджером. Для определения семейства вейвлетов, которое нас интересует, будем задавать следующие цифры:

4 – вейвлеты без масштабирующей функции

```
wavemngr('read',4)
```

В результате получаем полное и сокращенное название вейвлетов, отвечающих сформулированному требованию (вейвлеты без масштабирующей функции)

ans =

```
=====
Haar                haar
=====
Daubechies         db
-----
```

db1 db2 db3 db4
db5 db6 db7 db8
db9 db10 db**

=====
Symlets sym

sym2 sym3 sym4 sym5
sym6 sym7 sym8 sym**

=====
Coiflets coif

coif1 coif2 coif3 coif4
coif5

=====
BiorSplines bior

bior1.1 bior1.3 bior1.5 bior2.2
bior2.4 bior2.6 bior2.8 bior3.1
bior3.3 bior3.5 bior3.7 bior3.9
bior4.4 bior5.5 bior6.8

=====
ReverseBior rbio

rbio1.1 rbio1.3 rbio1.5 rbio2.2
rbio2.4 rbio2.6 rbio2.8 rbio3.1
rbio3.3 rbio3.5 rbio3.7 rbio3.9
rbio4.4 rbio5.5 rbio6.8

=====
Meyer meyr

=====
DMeyer dmey

=====
Gaussian gaus

gaus1 gaus2 gaus3 gaus4
gaus5 gaus6 gaus7 gaus8
gaus**

=====
Mexican_hat mexh

=====
Morlet morl

=====
Complex Gaussian cgau


```

-----
cgau1 cgau2 cgau3 cgau4
cgau5 cgau**
=====
Shannon                shan
-----
shan1-1.5  shan1-1    shan1-0.5  shan1-0.1
shan2-3    shan**
=====
Frequency B-Spline    fbsp
-----
fbsp1-1-1.5 fbsp1-1-1    fbsp1-1-0.5 fbsp2-1-1
fbsp2-1-0.5 fbsp2-1-0.1 fbsp**
=====
Complex Morlet        cmor
-----
cmor1-1.5  cmor1-1    cmor1-0.5  cmor1-1
cmor1-0.5  cmor1-0.1  cmor**
=====

```

Задавая цифры в `wavemngr('read',4)` получим: 3 – вейвлеты с масштабирующей функцией; 1 – ортогональные вейвлеты; 2 – биортогональные вейвлеты; 5 – комплексные вейвлеты без масштабирующей функции.

Задача 6. Определить центральную частоту вейвлета.

Решение.

Центральная частота определяет положение пика спектральной плотности вейвлета на оси частот. Для ее вычисления воспользуемся следующими MATLAB-выражениями

```

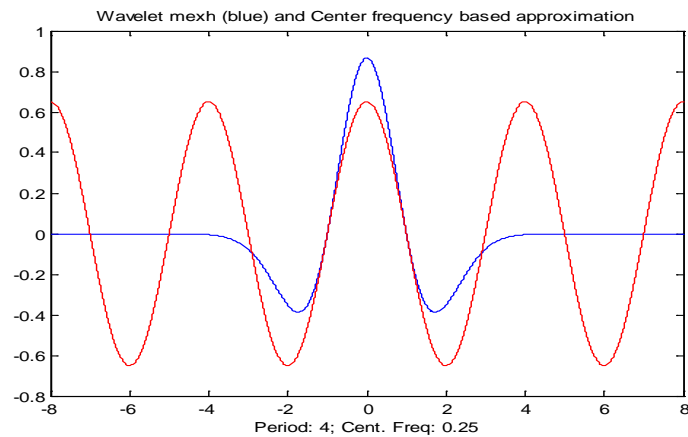
wname='mexh';
cfreq=centfrq(wname,16,'plot')
```

Графики вейвлета типа «мексиканская шляпа» и синусоиды, равной средней частоте вейвлета, будут иметь вид, показанный на рис. 4.10. Здесь же указывается средняя частота и период.

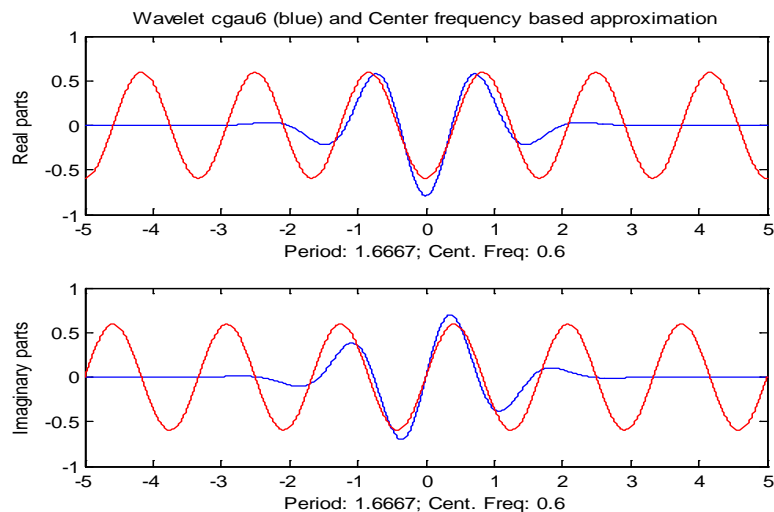
Для комплексного Гаусового вейвлета результаты будут иметь вид (рис. 4.11)

```

wname='cgau6';cfreq=centfrq(wname,16,'plot').
```



4.10. Графики вейвлета типа «мексиканская шляпа» и синусоиды



4.11. Графики комплексного Гаусового вейвлета и синусоиды

Задача 7. Найти разложение сигнала (вычислить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования) используя заданные вейвлеты.

Решение.

Найдем разложение сигнала типа «лестница» первого уровня дискретного вейвлет преобразования используя вейвлеты Хаара и Добеши.

MATLAB-выражения для вычисления аппроксимирующих и детализирующих коэффициенты первого уровня будут иметь следующий вид.

Формируем сигнал «лестница»

```
rand('seed',123456789);
s=2+kron(ones(1,8),[1 -1])+((1:16).^2)/16+0.3*rand(1,16);
```

Находим аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования

```
[ca1,cd1]=dwt(s,'haar');
```

```
[ca2,cd2]=dwt(s,'db4');
```

Строим графики

```
subplot(311);plot(s);title('Signal');grid on
```

```
subplot(323);plot(ca1);title('Coef.approx haar');grid on
```

```
subplot(325);plot(ca2);title('Coef.approx db4');grid on
```

```
subplot(324);plot(cd1);title('Coef.detail haar');grid on
```

```
subplot(326);plot(cd2);title('Coef.detail db4');grid on
```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики как на рис. 4.12.

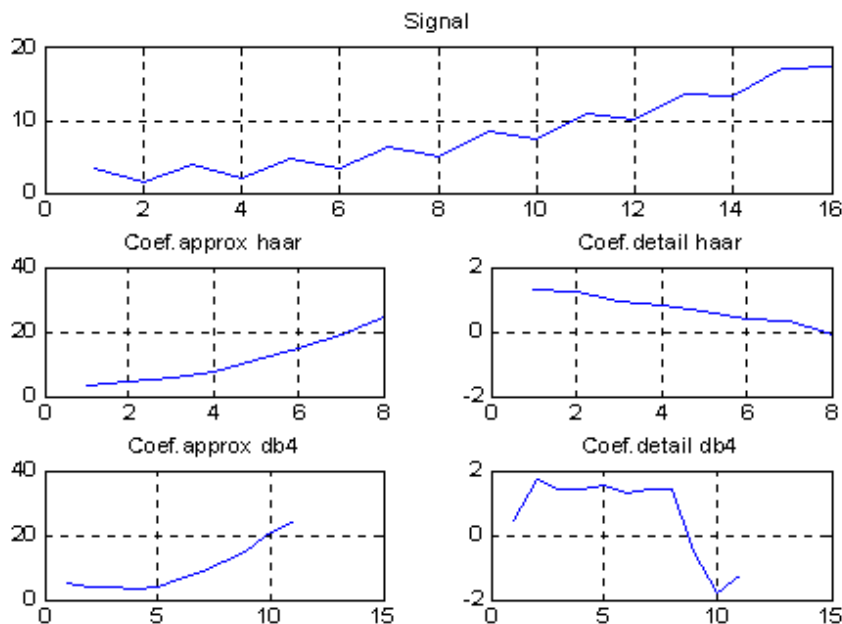


Рис. 4.12. Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования сигнала типа «лестница» первого уровня дискретного вейвлет-преобразования с использованием вейвлетов Хаара и Добеши

Задача 8. Построить для сигнала «лестница» «дерево» пакетного вейвлет-разложения до уровня N.

Решение.

MATLAB-выражения для вычисления аппроксимирующих и детализирующих коэффициенты будут иметь вид

```
rand('seed',123456789);
```

```
s=2+kron(ones(1,8),[1 -1])+((1:16).^2)/16+0.3*rand(1,16);
```

```
t=wpdec(s,3,'db4');
fig=drawtree(t);
```

После нажатия клавиши ENTER получаем специальную панель с окнами для просмотра в интерактивном режиме сигнала, дерева вейвлет-преобразования, аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, показанную на рис. 4.13. Активизируя тот или иной узел дерева снизу можно наблюдать временную зависимость коэффициента вейвлет-разложения на этом уровне.

Следует обратить внимание на наличие кнопки Best Tree – наилучшее дерево пакетного вейвлет-разложения (поддерево оптимальной величины в смысле числа коэффициентов и их информативности). При нажатии на данную кнопку появится наилучшее дерево пакетного вейвлет-разложения, вычисленное на основе применения критерия энтропии. Подробности этого изложены в теоретической части.

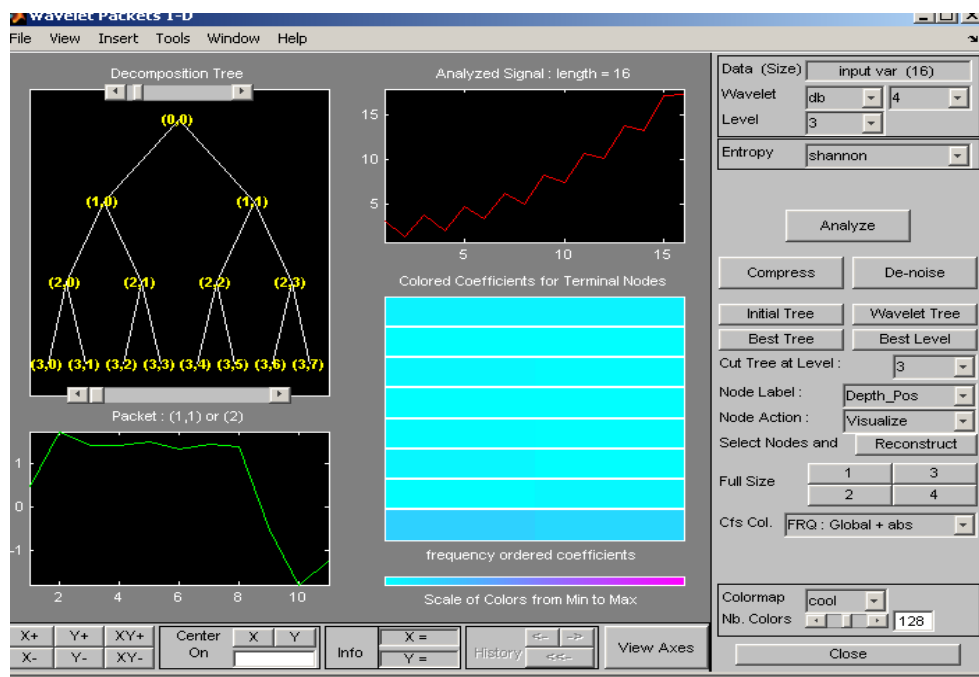


Рис. 4.13. **Дерево вейвлет-преобразования, аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов**

Задача 9. Для заданных вейвлетов найти разложение сигнала (вычислить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования), затем из одномерных аппроксими-

рующих и детализирующих коэффициентов восстановить исходный сигнал.

Решение.

Восстановление (реконструкция) сигнала сводится к объединению грубой (аппроксимирующей) и детальных компонент, то есть, попросту говоря, к сложению аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов первого уровня вейвлет-преобразования.

MATLAB-выражения для решения задачи будут иметь вид

```
rand('seed',123456789);
s=2+kron(ones(1,8),[1 -1])+((1:16).^2)/16+0.3*rand(1,16);
[ca1,cd1]=dwt(s,'db4');
subplot(221);plot(ca1);title('Coef.approx db4');grid on
subplot(222);plot(cd1);title('Coef.detail db4');grid on
srecon=idwt(ca1,cd1,'db4');
err1=norm(s-srecon);
subplot(212);plot([s;srecon-0.1]);title('Signal and reconstruir.signal');grid on
xlabel(['Error norm=',num2str(err1)])
```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики как на рис. 4.14.

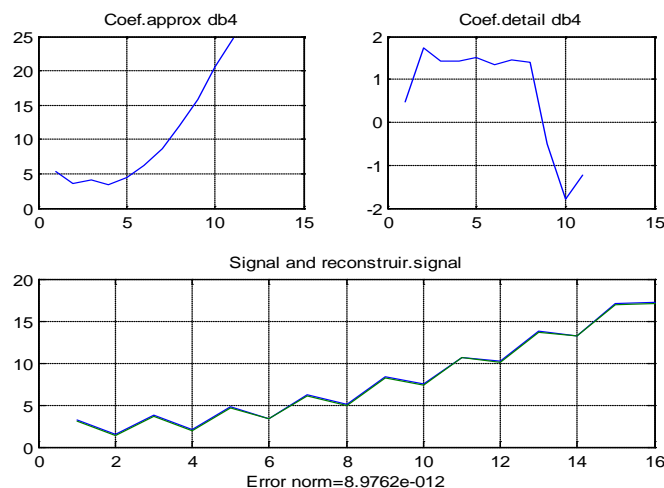


Рис. 4. 14. Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования и коэффициенты реконструкции

Следует обратить внимание на оценку погрешности вычисления Error norm (метрики, расстояния между сигналами в линейном простран-

стве сигналов). Как следует из результата, она ничтожно мала. Из-за этого, чтобы хоть как то разделить исходный и восстановленный сигнал мы искусственно сместили на графике сигнал вниз на величину 0,1.

Задача 10. Используя пороговую обработку коэффициентов вейвлет-преобразования очистить сигнал от «шума» и осуществить его компрессию.

Решение.

MATLAB-выражения для решения задачи будут иметь вид.

Вводим сигнал с шумом

```
load noismima;
```

```
x=noismima;
```

Определяем коэффициенты

```
wname='db8';lev=6;
```

```
[c,l] = wavedec(x,lev,wname);
```

Задаем параметры компрессии и осуществляем «сжатие» сигнала

```
alpha = 2; m = l(1);
```

```
[thr,nkeep] = wdcbm(c,l,alpha,m);
```

```
[xd,cxd,lxd,perf0,perf12] = wdencmp('lvd',c,l,wname,lev,thr,'h');
```

Строим графики и вычисляем параметры того, как была осуществлено «сжатие» сигнала

```
subplot (211); plot(x); title ('Original signal');
```

```
axis([0,1000,-10,10]);
```

```
subplot (212); plot(xd); title('Compressed signal');
```

```
axis ([0,1000,-10,10]);
```

```
xlab1 = ['2-norm rec: ',num2str(perf12)];
```

```
xlab2 = [' %-- zero cfs: ',num2str(perf0), ' %'];
```

```
xlabel([xlab1 xlab2]);
```

После нажатия клавиши ENTER получаем графики, показанные на рис. 4.15.

В нижней части графика приведены результаты вычислений параметров, характеризующих операции сжатия сигнала. Параметр «2-norm. rec.» показывает выраженное в процентах отношение энергий (квадратов нормы) сигнала, очищенного от шума и сжатого, и исходного сигнала. То есть, от исходного сигнала при операции очищения и сжатия ос-

талось примерно 21% энергии. Параметр «zero cfs» характеризует выраженное в процентах число обнуленных коэффициентов. То есть в исходном сигнале было обнулено примерно 96% коэффициентов, а осталось для анализа примерно 4%. Следовательно, сохранение всего 4 процентов коэффициентов привело к компрессии (к сжатию) сигнала в 25 раз $\{(1/0.04) = 25 \text{ раз}\}$.

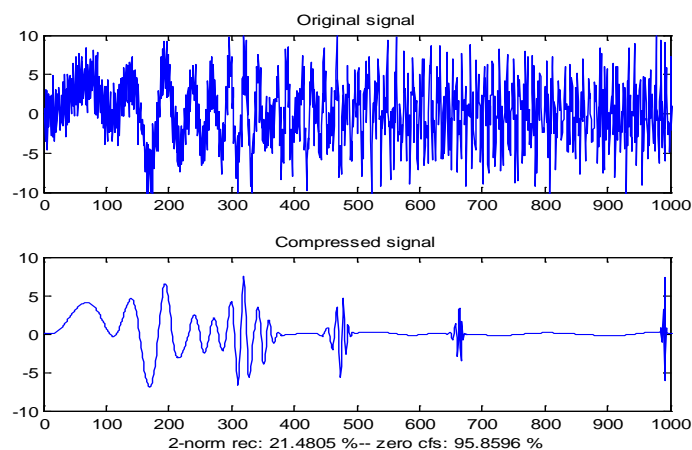


Рис. 4.15. Результаты вычислений параметров, характеризующих операции сжатия сигнала.

Задача 11. Используя обработку коэффициентов вейвлет-преобразования, осуществить компрессию изображения отпечатка пальца, полученного в результате сканирования и представленного графическим файлом большой размерности (примерно 800 кбайт).

Решение.

MATLAB – выражения для решения задачи будут иметь вид

```
load detfingr;
nbc=size(map,1);
wname='sym4';
lev=3;
[c,s]=wavedec2(X,lev,wname);
alpha=1.5;
m=2.7*prod(s(1,:));
[thr,nkeep]=wdbc2(c,s,alpha,m);
[xd,cxd,sxd,perf0,perf12]=wdencmp('lvd',c,s,wname,lev,thr,'h');
```

```

colormap(pink(nbc));
subplot(221),image(wcodemat(X,nbc)),
title('Original image');
subplot(222),image(wcodemat(xd,nbc)),
title('Compressed image');
xlab1=['2-norm rec.: ',num2str(perf12)];
xlab2=['% - zero cfs.: ',num2str(perf0),' %'];
xlabel([xlab1 xlab2])

```

После нажатия клавиши ENTER получаем два изображения отпечатков пальца, исходного и сжатого, показанные на рис. 4.16.

Анализ рисунка показывает, что имеет место при сжатии некоторая потеря точности изображения. Однако, качество сжатого изображения вполне пригодно для идентификации отпечатков пальцев, поскольку потеря точности минимальна для линий, по которым производится идентификация.

Но при этом, как мы видим из характеризующих процесс сжатия параметров, получена отличная компрессия изображения.

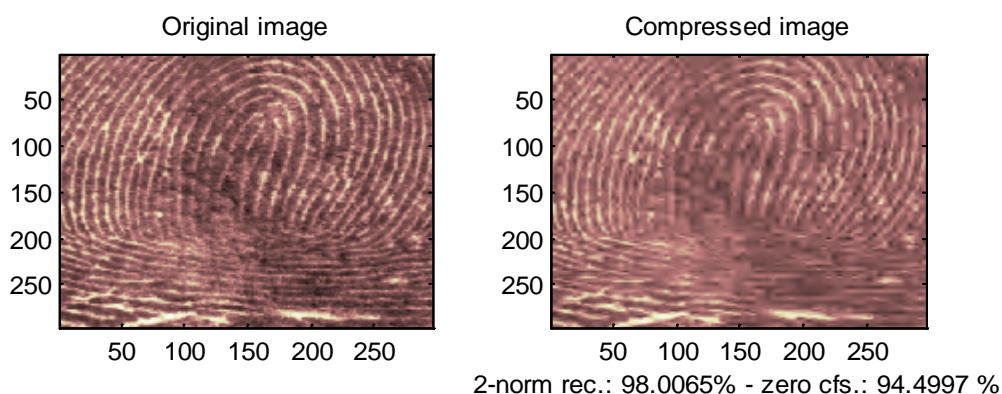


Рис. 4.16. Изображения отпечатков пальца: исходного и после компрессии

От исходного сигнала изображения при операции сжатия, как следует из параметра «2-norm. rec.» осталось примерно 98 % энергии. В исходном сигнале, как свидетельствует параметр «zero cfs», было обнулено примерно 95% коэффициентов, а осталось для анализа примерно 5%. Следовательно, сохранение всего 5 процентов коэффициентов привело к компрессии (к сжатию) сигнала в 20 раз $\{(1/0.05)=20 \text{ раз}\}$. Объем графического файла будет составлять $800/20=4$ кбайта

Контрольные вопросы

1. Как определен спектр произвольного апериодического сигнала (спектральная плотностью сигнала)?
2. Определите понятия: амплитудно-частотный спектр и фазочастотный спектр.
3. Что называется *обратным преобразованием Фурье* для сигнала?
4. Определите спектральную плотность треугольного импульса, расположенного симметрично относительно оси ординат.
5. Приведите формулу для расчета комплексной спектральной плотности треугольного пилообразного импульса.
6. Приведите формулу для расчета спектральной плотности дискретных сигналов. Проанализируйте ее.
7. Какая команда в MATLAB используется для построения графика спектральной плотности, например, пилообразного импульса с перегруппировкой частотных компонент?
8. Назовите какие основные вейвлеты используются в системе MATLAB. Как их можно просмотреть?
9. Как определить центральную частоту вейвлета? Приведите соответствующие MATLAB-выражения.
10. Охарактеризуйте понятия: аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования.
11. В чем заключается восстановление (реконструкция) сигнала с помощью вейвлет-преобразования?

4.2. Лабораторная работа № 4

Измерение характеристик и параметров спектрального представления сигналов

4.2.1. Цели работы

1. Углубить и закрепить знания о понятиях, характеристиках и параметрах спектрального представления электрических сигналов, способах визуализации спектров и спектрограмм.

2. Сформировать практические умения математической записи выражений для спектрального представления одиночных и периодических сигналов, построения для них графиков спектров, численной оценки и измерений с помощью контрольно – измерительной аппаратуры параметров спектров.

3. Выработать умения практической работы с моделирующей программой (программным эмулятором) ELECTRONICS WORKBENCH, необходимые для визуализации спектров и оценки параметров.

4. Выработать умения практической работы с средствами MATLAB, позволяющими проводить быстрые преобразования Фурье, визуализировать спектр, демонстрировать методы спектрального оценивания.

5. Выработать умения практической работы с средствами MATLAB, позволяющими осуществлять вейвлет-преобразования, удалять шумы и осуществлять сжатие сигналов и изображений.

4.2.2. Самостоятельная работа студентов

Перед выполнением лабораторной работы студенту необходимо.

1. Изучить теорию, которой пользуются в электротехнике и электронике для спектрального представления электрических сигналов.

2. Провести самопроверку эффективности своей теоретической подготовки, ответив на вопросы, приведенные в разделе «Контрольные вопросы».

3. Изучить средства и способы проведения экспериментов, краткие описания измерительных приборов и методов измерений, используемых в работе. В результате исполнения этого пункта студент должен уметь объяснять порядок выполнения работы и то, какие результаты он ожидает получить.

4. Подготовить отчет о лабораторной работе.

В тетради изобразить принципиальные схемы экспериментов.

В тетради подготовить таблицы, в которые будут записываться данные, полученные в результате проведения экспериментов.

Подготовить оси координат графиков, необходимых для изображения исследуемых сигналов.

Выполняя предыдущее надо помнить, что схемы, таблицы, результаты исследований помещаются в рабочей тетради отдельно по каждому пункту задания, желательно на отдельных страницах отчета.

Для заданного преподавателем прямоугольного импульса записать математическое выражение для расчета комплексной спектральной плотности сигнала и построить график спектральной плотности.

Для заданных преподавателем параметров периодической последовательности прямоугольных импульсов (амплитуды, частоты или периода следования импульсов, и длительности импульсов), предварительно вычислив частоты на которых располагаются дискретные компоненты спектра, построить график амплитудного спектра (3 лепестка спектральной плотности). Построить графики амплитудного спектра для случая, если, сначала, частота следования импульсов уменьшилась в 2 раза, а затем к тому же, длительность импульса увеличилась.

Для заданного преподавателем электрического сигнала записать математическое выражение для расчета комплексной спектральной плотности сигнала.

Используя средства MATLAB и записанное математическое выражение, определить спектральную плотность сигнала, построить графики модуля и аргумента спектральной функции.

Для заданного преподавателем электрического сигнала средствами MATLAB, используя алгоритмы быстрое преобразование Фурье и перегруппировку частотных компонент, построить графики модуля и аргумента его спектральной функции.

Определить и записать в отчет, какие вейвлеты используются в системе MATLAB и для заданного преподавателем вейвлета определить его центральную частоту.

Для заданного преподавателем электрического сигнала вычислить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования, а, затем, из одномерных аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов восстановить исходный сигнал.

Для заданного преподавателем электрического сигнала построить «дерево» пакетного вейвлет-разложения до уровня N . Получить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты в узлах «дерева»

Для заданного преподавателем электрического сигнала, используя пороговую обработку коэффициентов вейвлет-преобразования, очи-

стить сигнал от «шума» и осуществить его компрессию. Оценить параметры компрессии.

Для заданного преподавателем графического файла, используя обработку коэффициентов вейвлет-преобразования, осуществить компрессию изображения. Оценить параметры компрессии.

4.2.3. Средства и способы проведения эксперимента

Лабораторная работа выполняется на IBM PC с использованием моделирующей элементной базы и устройства электрической цепи программы (программного эмулятора) ELECTRONICS WORKBENCH и системы MATLAB с ее различными расширениями.

В первой части данной лабораторной работы для визуального наблюдения графика амплитудно-частотного спектра используется система моделирования, которая запускается при обращении к меню ANALYSIS/ FOURIER программы EWB. После запуска процесса моделирования данные моделируемой схемы и сигнала считываются программой с приборов и компонент, затем составляются математические модели и рассчитывается спектр. Амплитудно-частотный спектр представляется в виде графика.

В второй части данной лабораторной работы используется большой пакет графических сред, предназначенный для вейвлет-анализа электрических сигналов, который называется Графический Интерфейс Пользователя – Graphical User Interface (GUI).

4.2.4. Порядок выполнения работы

Эксперимент 1. Исследование спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Открыть диалоговое окно программы «Electronics Workbench». При появлении сообщения «Could not open file» нажмите кнопку «ОК».

2. Откройте необходимый файл, нажав кнопку «открыть», и, выбрав необходимое в контекстном меню, открыть файл lbr4-1.

3. На экране монитора появится схема установки для эксперимента (рис. 4.17). Она содержит два контрольно измерительных прибора: функциональный генератор, предназначенный для создания требуемого сигнала и осциллограф. В качестве нагрузки используется резистор.

4. Дважды щелкнув по иконке генератора, установить на генераторе (рис. 4.18) параметры импульсного сигнала, спектр которого предстоит исследовать (согласно индивидуальному заданию): амплитуду, частоту следования импульсов и параметр, называемый коэффициентом заполнения DUTY CYCLE. Последний параметр это выраженное в процентах отношение длительности импульса к периоду повторения следования импульсов (величина обратная скважности). Нажав на кнопку выбрать также форму выходного сигнала – прямоугольные импульсы.

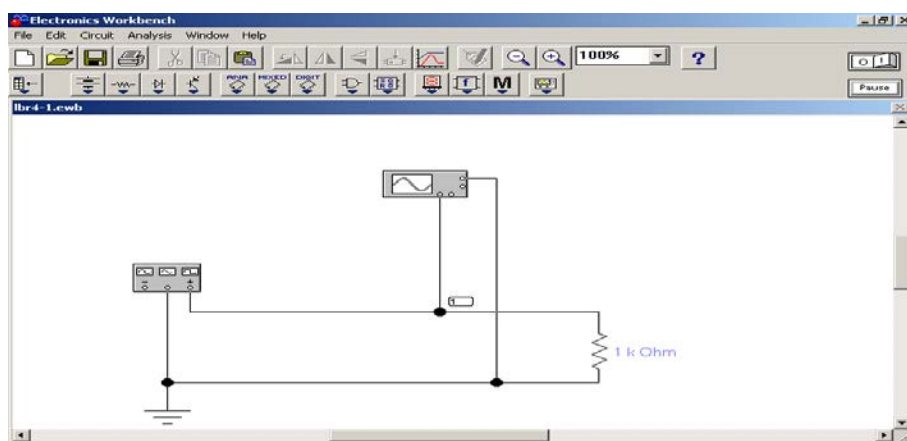


Рис. 4.17. Схема установки для исследования спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов

5. Дважды щелкнув по иконке осциллографа, отобразить панель осциллографа в виде удобном для анализа.

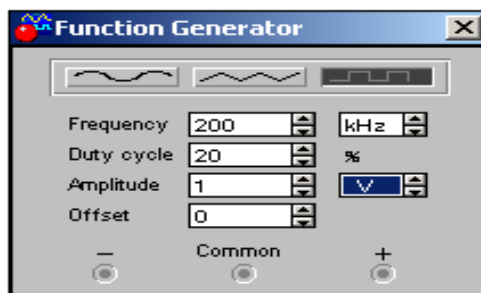


Рис. 4.18. Задание параметров периодической последовательности прямоугольных импульсов на функциональном генераторе

6. Запустить моделирующую программу, щелкнув левой кнопкой мыши на пиктограмме включателя/выключателя I/O. Нажав кнопку «Expand» понаблюдать вид осциллограммы импульсного сигнала. Выбрав подходящий момент процесса развертки щелкнуть по расположенной под выключателем I/O иконке «Pause». Если требуется, то произвести настройку осциллографа, подбирая параметры канала вертикального отклонения (CHANNEL A) установкой чувствительности (V/DIV) и параметры развертки (TIME BASE), установкой требуемого значения (S/DIV) (рис. 4.19).

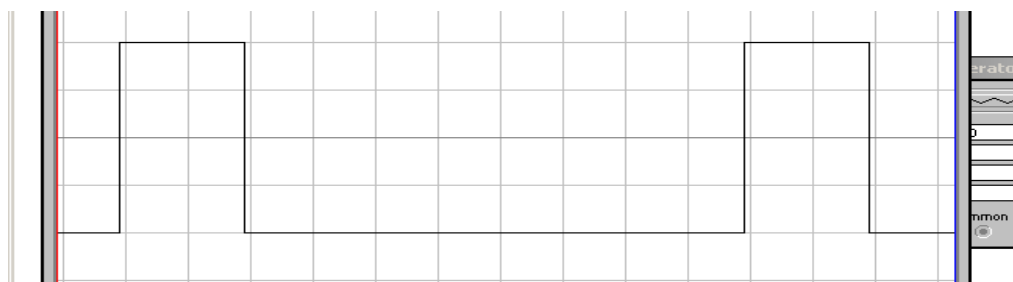


Рис. 4.19. Осциллограмма импульсного сигнала после настройки

7. Используя визирные линейки с помощью осциллографа измерить период следования импульсов (рис. 4.20), их амплитуду, длительность импульса (рис. 4.21). Результаты записать в таблицу 4.1. Сверить полученные результаты с параметрами импульса, указанного в индивидуальном задании.

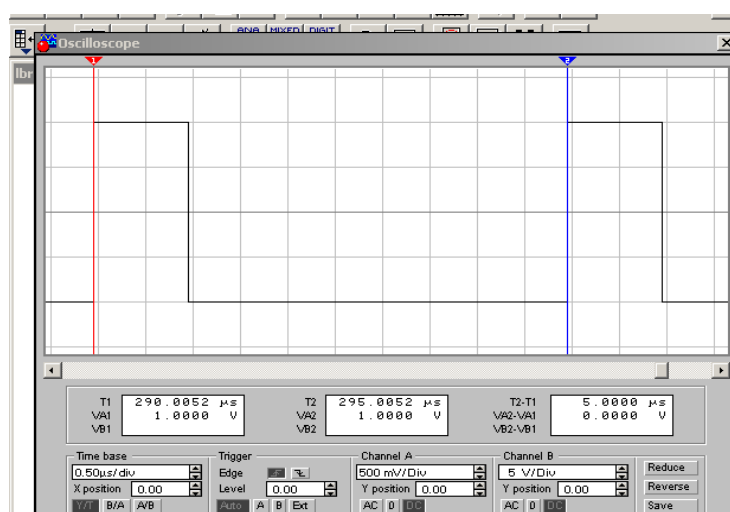


Рис. 4.20. Схема измерения периода импульсного сигнала

Результаты измерений

U_m	$T=T_2-T_1$	$t_u=T_2-T_1$	$Q=T/t_u$	$f=1/T$

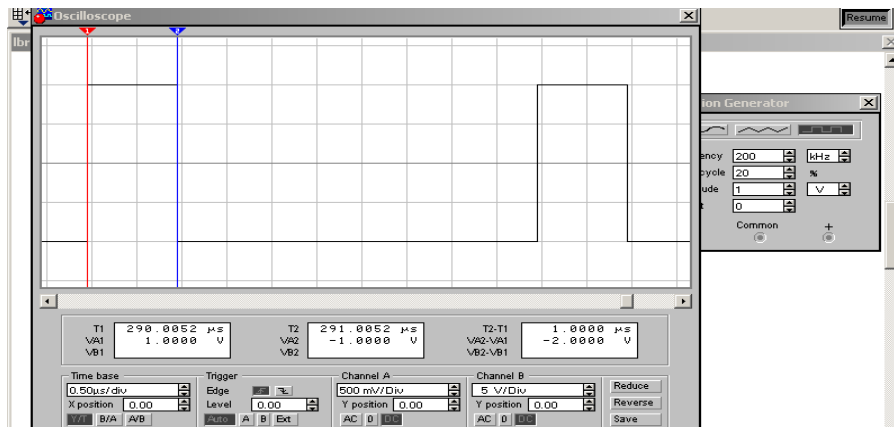


Рис. 4.21. Схема измерения длительности импульса сигнала прямоугольной формы

8. Используя меню ANALYSIS и подменю FOURIER открыть окно установки параметров проведения Фурье-анализа (спектрального анализа). В окне установить частоту следования импульсов (частоту первой гармоники) FUNDAMENTAL FREQUENCY (рис. 4.22).

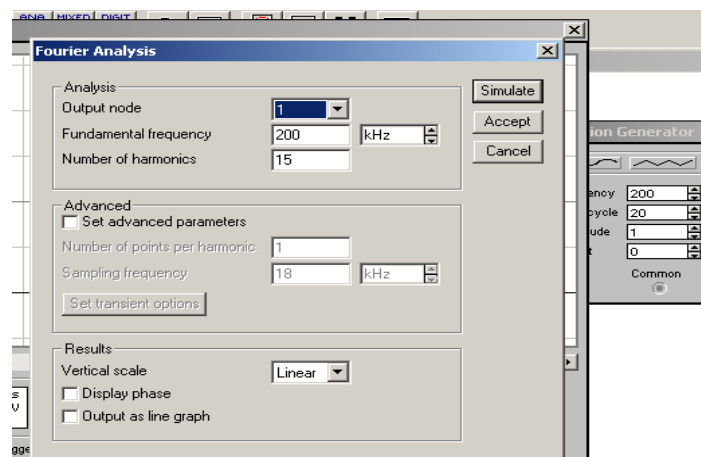


Рис. 4.22. Окно установки параметров спектрального анализа

Нажав кнопку SIMULATE, расположенную в правом верхнем углу получить амплитудно-частотный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов (рис. 4.23).

9. Нажав третью справа кнопку, получить визирные линейки. С их помощью получить точные значения частот и амплитуд гармоник (рис. 4.24). Результаты записать в таблицу 4.2.

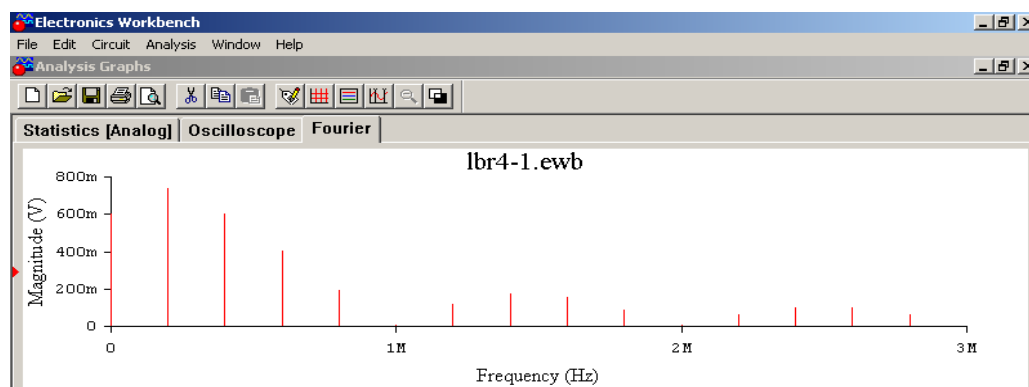


Рис. 4.23. Спектральная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов

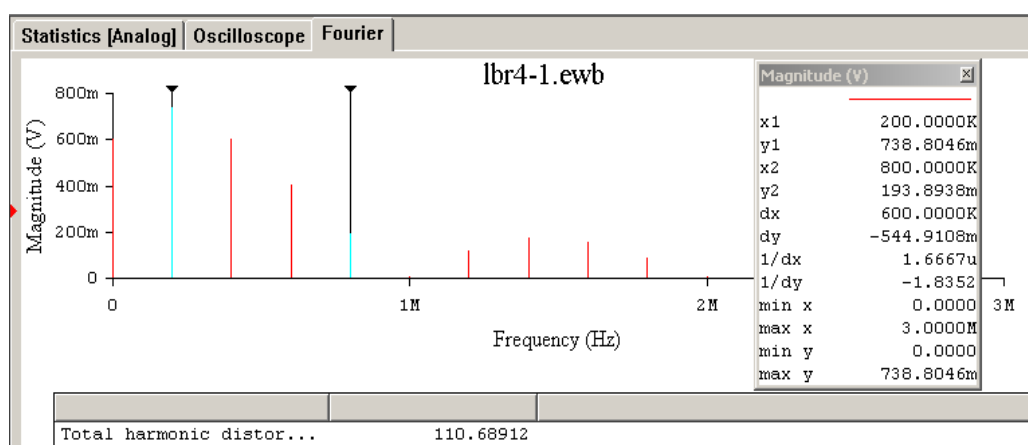


Рис. 4.24. Спектральная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов с визирными линейками для получения точных значений амплитуд и частот гармоник

10. На основании предварительного анализа и результатов экспериментальных измерений сделать выводы о значениях амплитуды спектра на нулевой частоте (равна $U(0) = 2U_m / q$); о частотах нулей спек-

тральной функции прямоугольного импульса (определяются соотношением $f_{0k} = \frac{k}{t_H}, k = 1, 2, 3, \dots$); о количестве гармоник в одном лепестке спектральной функции.

11. Закрыв ненужное, открыть панель функционального генератора. Установить в его окошках новые параметры индивидуального задания – частота и параметр, называемый коэффициентом заполнения DUTY CYCLE уменьшились в 2 раза. Проведя последовательность действий, указанную в пп. 5–8 эксперимента 1, записать параметры нового импульсного сигнала в таблицу 4.3 и получить новую spectrogramму (рис. 4.25).

Таблица 4.2.

Результаты измерений

Номер гармоники	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота гармоники									
Амплитуда гармоники									
Пометки									

Таблица 4.3.

Результаты измерений

U_m	$T = T_2 - T_1$	$t_u = T_2 - T_1$	$Q = T / t_u$	$f = 1/T$

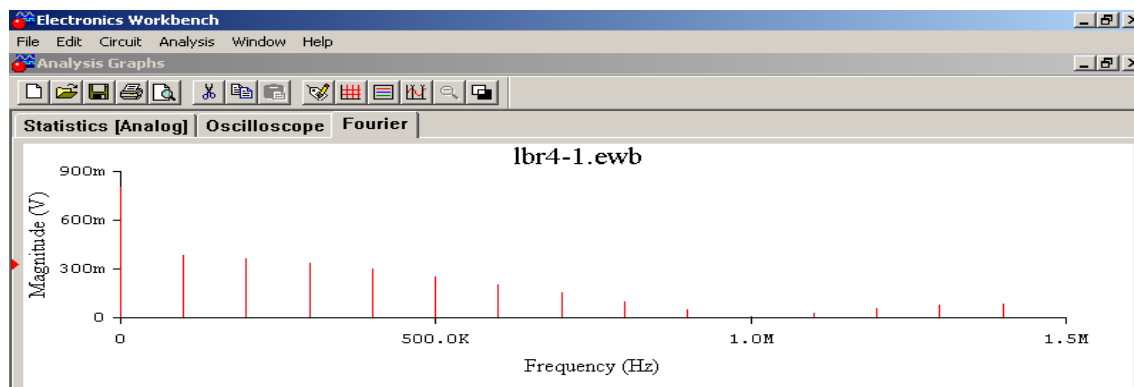


Рис. 4.25. Спектральная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов с параметрами, соответствующими уменьшению частоты в 2 раза

12. Сделать выводы о том, как уменьшение частоты следования импульсов при неизменной длительности импульсов влияет на изменении параметров спектра.

13. Закрыв ненужное, открыть панель функционального генератора. Установить в его окошках новые параметры индивидуального задания – частота что и была, а параметр, называемый коэффициентом заполнения DUTY CYCLE увеличился в N раз. Прделав последовательность действий, указанную в пп.5–8 эксперимента 1, записать параметры нового импульсного сигнала в таблицу 4.4 и получить новую спектрограмму (рис. 4.26).

12. Сделать выводы о том, как при неизменной частоте следования импульсов увеличение длительности импульсов влияет на изменении параметров спектра.

Таблица 4.4.

Результаты измерений

U_m	$T = T_2 - T_1$	$t_u = T_2 - T_1$	$Q = T / t_u$	$f = 1/T$

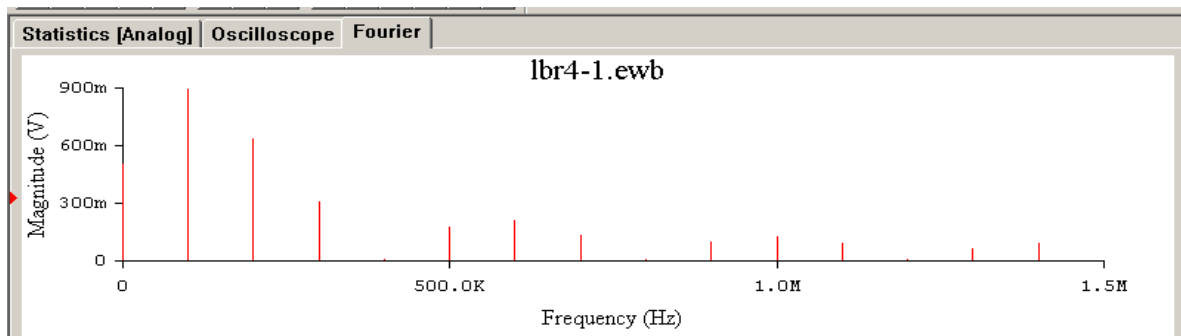


Рис. 4.26. Спектральная диаграмма периодической последовательности прямоугольных импульсов с параметрами, соответствующими увеличению длительности импульса

Эксперимент 2. Исследование характеристик и параметров вейвлетов.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Открыть главное меню пакета Wavelet Toolbox. Для этого, запустив MATLAB, в командной строке набрать **wavemenu**. После нажатия клавиши ENTER откроется панель на которой расположены группы кнопок, показанные на рис. 4.27.

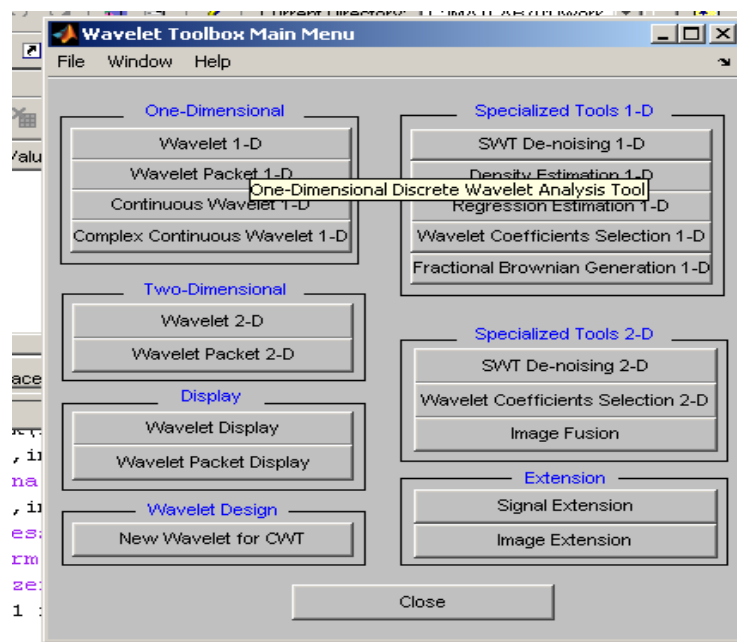


Рис. 4.27. Панель главного меню

2. Нажав кнопку WAVELET DISPLAY – просмотр вейвлетов, расположенную слева внизу, и используя окно, показанное на рис. 4.28 детально изучить параметры и характеристики вейвлетов, заданных преподавателем.

3. В отчете отразить присуща ли и какой вид имеет:

а) Масштабирующая или скейлинг-ФНД («фи») функция $\varphi(t)$, определяющей грубое приближение (аппроксимацию) сигнала и порождающей аппроксимирующие коэффициенты.

Как известно из лекций, масштабирующие ФНД функции $\varphi(t)$ присущи только ортогональным вейвлетам. Для иных они могут не существовать. Масштабирующая функция $\varphi(t)$ должна удовлетворять определенному уравнению, называемому масштабирующим. Кроме того,

должно выполняться $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1$. Масштабирующая функция порождает вейвлет функцию $\psi(t)$.

б) Вейвлет-функция PSI («пси») $\psi(t)$ с нулевым значением интеграла $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$, определяющая детали сигнала и порождающая детализирующие коэффициенты.

Следует проанализировать симметричность функций.

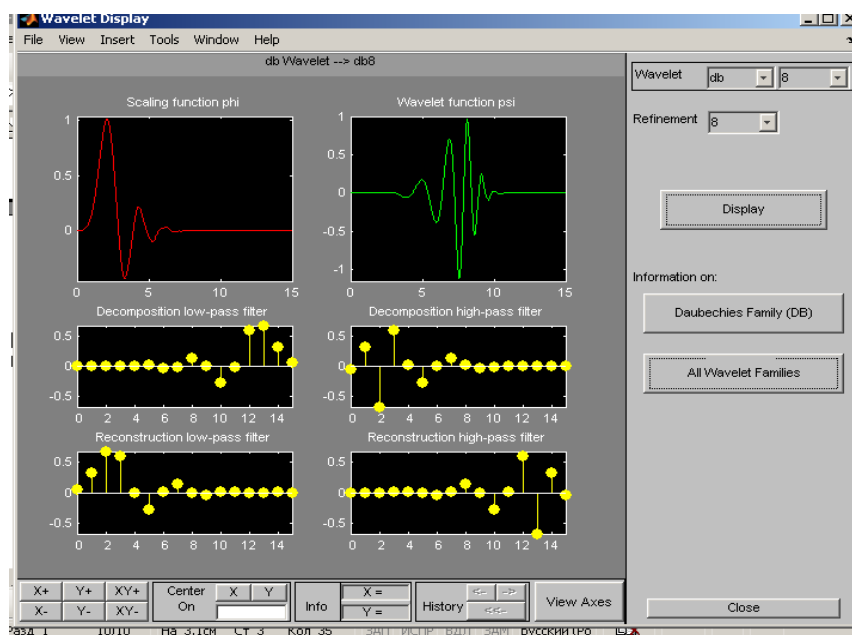


Рис. 4.28. Окно раздела WAVELET DISPLAY – просмотр вейвлетов

Убедиться, что каждому ортогональному вейвлету соответствует в общем случае четыре фильтра:

1. Низкочастотный фильтр разложения сигнала;
2. Высокочастотный фильтр разложения сигнала;
3. Низкочастотный фильтр восстановления сигнала;
4. Высокочастотный фильтр восстановления сигнала.

Изучить как представляют фильтры (помимо изученного ранее комплексного коэффициента передачи) коэффициентами импульсной характеристики. Как известно коэффициенты импульсной характеристики фильтров H_i и L_o есть не что иное как детализирующие коэффициенты вейвлет - декомпозиции сигнала и их коэффициенты аппроксимации.

4. Закрывать окно WAVELET DISPLAY – просмотр вейвлетов

Эксперимент 3. Исследование вейвлет-разложений сигналов.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Нажать кнопку WAVELET 1-D – одномерный дискретный вейвлет - анализ, расположенную слева сверху панели главного меню. Появится предварительное окно, показанное на рис. 4.29.

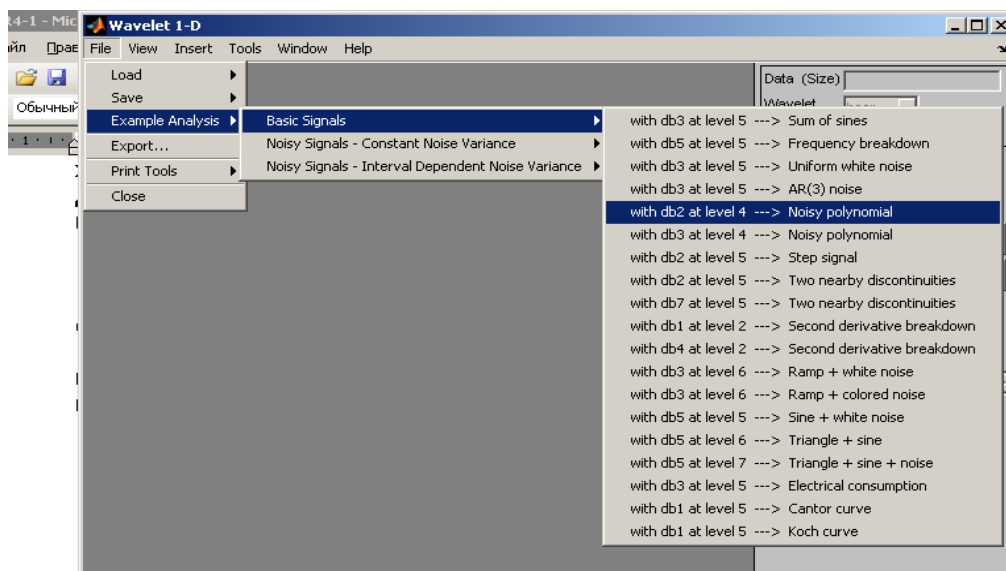


Рис. 4.29. Предварительное окно раздела WAVELET 1-D – одномерный дискретный вейвлет-анализ

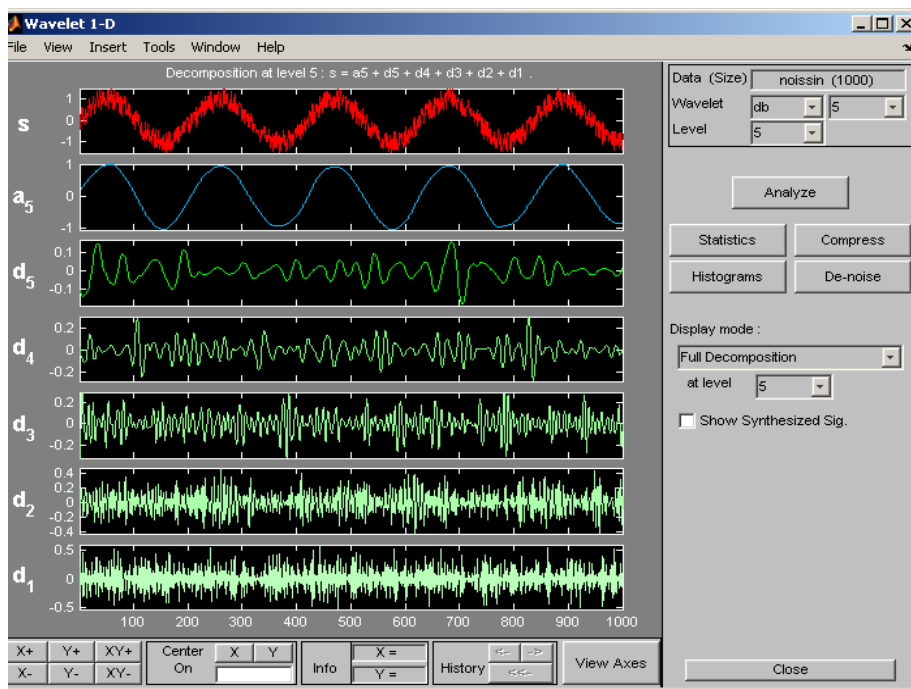


Рис. 4.30. Окно раздела WAVELET 1-D – одномерный дискретный вейвлет-анализ с сигналом

2. Используя меню FILE-EXAMPLE ANALYSYS-BASIC SIGNALS, показанное на рис. 4.29, по заданию преподавателя ввести сигнал, предназначенный для вейвлет-разложения. После этого запускается система и на экране появляется окно WAVELET 1-D – одномерный дискретный вейвлет-анализ с сигналом, показанное на рис. 4.30.

3. Детально изучить, как осуществляется вейвлет-разложение сигнала. В отчете отразить используемый вейвлет, а также, что сигнал представляется грубой аппроксимацией a_5 и пятью детальными коэффициентами от d_1 до d_5 . Указать, насколько грубая аппроксимация подобна исходному сигналу.

Эксперимент 4. Исследование сжатия сигнала.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Нажать кнопку COMPRESS справа. Появится окно, показанное на рис. 4.31, которое содержит ряд органов управления для задания параметров сжатия.

При открытии окна по умолчанию устанавливается метод глобальной пороговой обработки детализирующих коэффициентов (GLOBAL

THRESHOLDING). При этом значение порога устанавливается автоматически. Изучите график, расположенный слева вверху. Синяя кривая есть график количества нулевых коэффициентов (в процентах) в зависимости от значения порога- горизонтальная ось.

2. Запишите величину порога и значение, указанное в средней правой части окна, сколько энергии исходного сигнала сохранилось после удаления детализирующих коэффициентов при данном пороге. Запишите величину, показывающую сколько (в процентах) удалено детализирующих коэффициентов. величину сжатия сигнала.

3. Используя слайдер (ползунок), расположенный справа, либо перемещение вертикальной желтой штриховой линии с помощью левой кнопки мыши, установите новый порог. Нажмите кнопку COMPRESS и запишите новые параметры порога, энергии, количества удаленных коэффициентов и степени сжатия. Вверху в центре окна наряду с оригинальным сигналом (красного цвета) появится сжатый сигнал (желтого цвета). Оцените соответствие исходного сигнала сжатому.

4. Закройте открытые ранее окна пока не появится панель главного меню. На вопросы о сохранении внесенных изменений отвечать No.

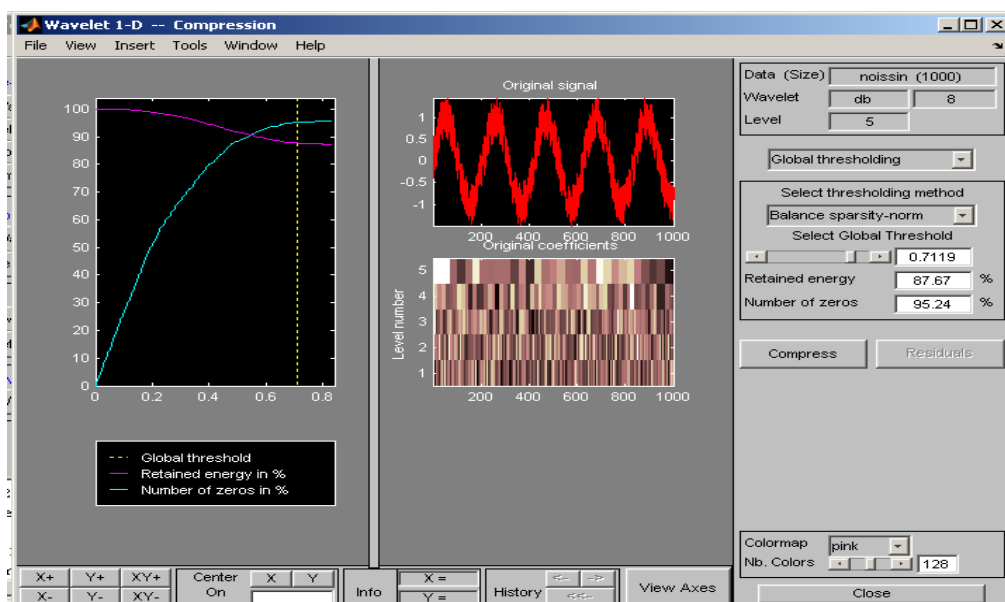


Рис. 4.31. Окно после нажатия кнопки COMPRESS

Эксперимент 5. Исследование сжатия изображений.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

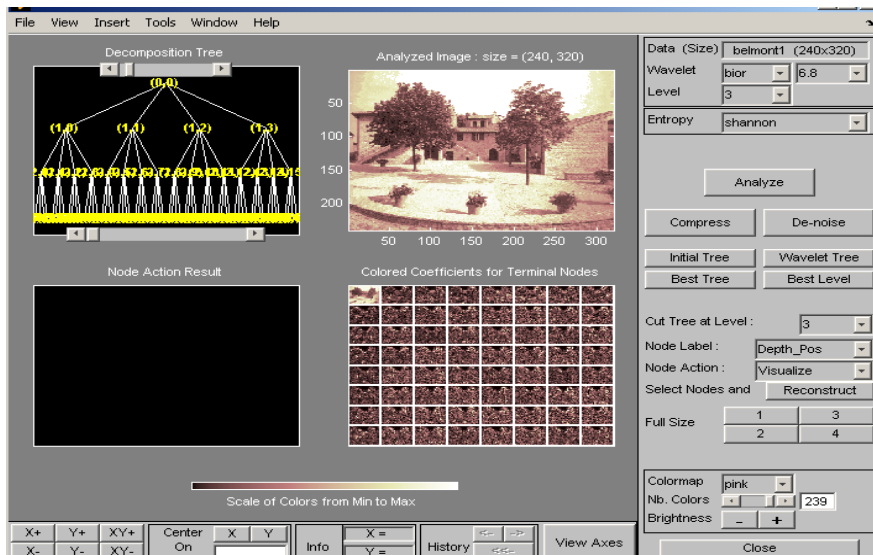


Рис. 4.32. Окно после нажатия **WAVELET PACKET 2-D** – пакетный вейвлет-анализ изображений и загрузки сигнала изображения

1. Нажать кнопку **WAVELET PACKET 2-D** – пакетный вейвлет-анализ изображений, расположенную слева примерно посередине панели главного меню. Появится предварительное окно. 2, Используя меню **FILE-EXAMPLE ANALYSYS**, по заданию преподавателя ввести изображение, предназначенное для анализа. После этого запускается система и на экране появляется окно **WAVELET PACKET 2-D** – пакетный вейвлет-анализ изображений, показанное на рис. 4.32.

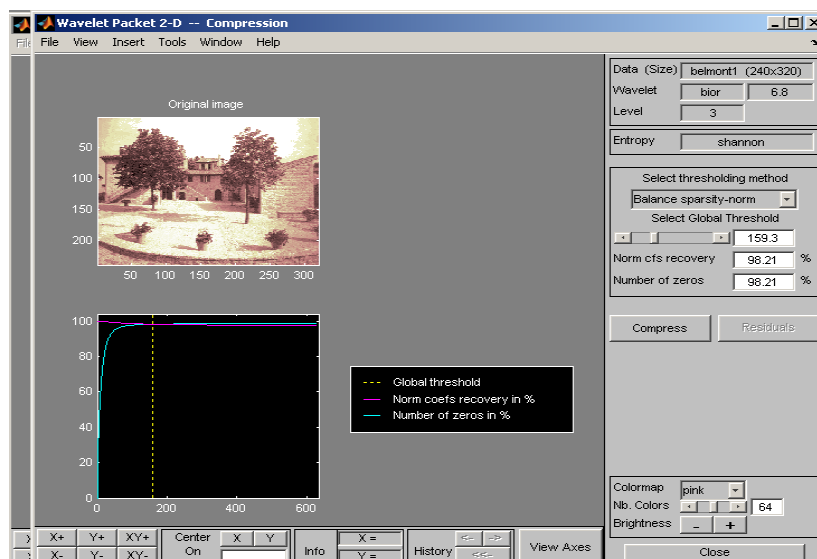


Рис. 4.33. Окно после нажатия кнопки **COMPRESS** пакетного вейвлет-анализ изображений

Слева сверху построено дерево пакетного разложения. Узлы этого дерева становятся активными при выборе их мышкой. Вверху справа изображается исходная «картинка», а ниже – изображения коэффициентов в узлах дерева.

2. Нажать кнопку COMPRESS справа. Появится окно, показанное на рис. 4.33, которое содержит ряд органов управления для задания параметров сжатия.

3. Нажмите кнопку COMPRESS. Запишите величину порога и значение, указанное в средней правой части окна, сколько энергии исходного (оригинального) сигнала сохранилось после удаления детализирующих коэффициентов при данном пороге. Также запишите величину, показывающую сколько (в процентах) удалено детализирующих коэффициентов. Рассчитайте, во сколько раз был сжат сигнал.

4. Используя слайдер (ползунок), расположенный справа, либо перемещение вертикальной желтой штриховой линии с помощью левой кнопки мыши, установите новый порог. Нажмите кнопку COMPRESS и запишите новые параметры порога, энергии, количества удаленных коэффициентов и степени сжатия. Оцените соответствие исходного изображения сжатому.

5. Позакрывать открытые ранее окна пока не появится панель главного меню. На вопросы о сохранении внесенных изменений отвечать No.

Эксперимент 6. Исследование способностей вейвлетов выявлять особенности функций и сигналов.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Нажать кнопку– CONTINUOUS WAVELET 1-D вейвлет-анализ особенностей, расположенную слева сверху панели главного меню. Появится предварительное окно. Используя меню FILE-EXAMPLE ANALYSYS, по заданию преподавателя ввести сигнал, предназначенный для анализа. После этого запускается система и на экране появляется окно – CONTINUOUS WAVELET 1-D вейвлет-анализ особенностей, показанное на рис. 4.34.

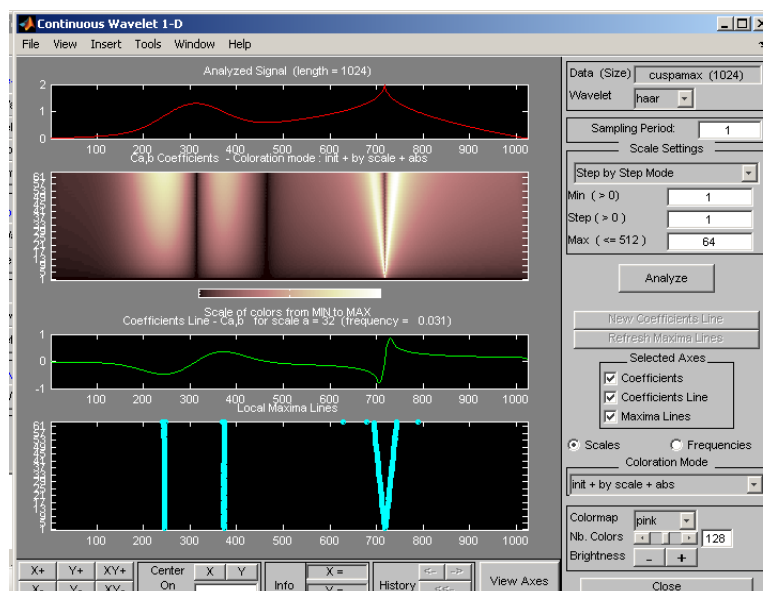


Рис. 4.34. Окно после нажатия кнопки **CONTINUOUS WAVELET 1-D**

В окне представлены график анализируемого сигнала, его спектрограмма, график средней строки коэффициентов разложения на уровне и изображение локальных максимумов на каждом уровне масштаба.

2. Описать, убрав флажки и, соответственно изображения, с окошек линии коэффициентов и локальных максимумов, спектрограмму, используя материал лекции.

3. Позакрывать открытые ранее окна пока не появится панель главного меню. На вопросы о сохранении внесенных изменений отвечать No.

Эксперимент 7. Исследование способностей вейвлетов удалять шумы из сигналов.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Нажать кнопку **SWT DE-NOISING 1-D** удаление шума стационарного одномерного сигнала, расположенную справа сверху панели главного меню. Появится предварительное окно. Используя меню **FILE-EXAMPLE ANALYSIS**, по заданию преподавателя ввести сигнал, предназначенный для анализа. После этого запускается система и на экране появляется окно – **SWT DE – NOISING 1 –D** удаление шума стационарного одномерного сигнала, показанное на рис. 4.35.



Рис. 4.35. Окно после нажатия кнопки SWT DE – NOISING 1 –D удаление шума стационарного одномерного сигнала

4.2.5. Обработка результатов экспериментов

В этой части студент должен привести все необходимые расчеты по лабораторной работе, внести их в соответствующие таблицы, произвести их анализ и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Изобразите и проанализируйте амплитудно-частотный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов.
2. Сделайте выводы о значениях амплитуды спектра на нулевой частоте; о частотах нулей спектральной функции прямоугольного импульса о количестве гармоник в одном лепестке спектральной функции.
3. Сделайте выводы о том, как при неизменной частоте следования импульсов увеличение длительности импульсов влияет на изменение параметров спектра.
4. Каким вейвлетам присущи масштабирующие PNI функции $\varphi(t)$? Какому уравнению должна удовлетворять масштабирующая функция?

5. Какие фильтры соответствуют ортогональному вейвлету?
6. Что означает понятие дерево пакетного вейвлет-разложения?
7. Опишите последовательность действий в системе MATLAB по удалению шума стационарного одномерного сигнала, сжатию сигнала.

Индивидуальные задания № 4 **к самостоятельной работе студентов**

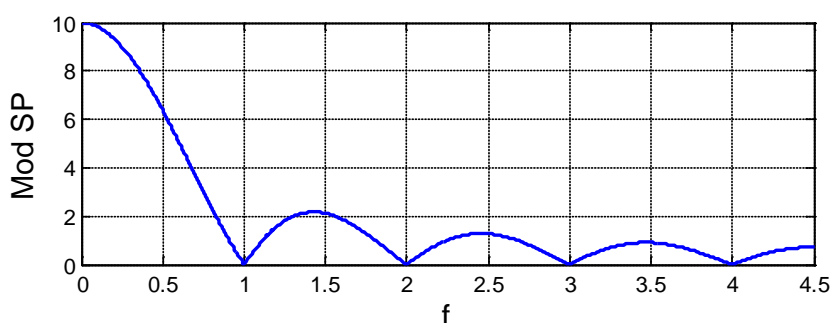
1. Для прямоугольного импульса в рабочую тетрадь записать математическое выражение для расчета комплексной спектральной плотности прямоугольного импульса

$$\dot{S}(f) = U_m t_u \frac{\sin(\pi f t_u)}{\pi f t_u} e^{-j \frac{\omega t_u}{2}},$$

модуля спектральной функции (амплитудно-частотный спектр)

$$S(f) = |\dot{S}(f)| = U_m t_u \frac{|\sin(\pi f t_u)|}{\pi f t_u} = U_m t_u \frac{|\sin(y)|}{y},$$

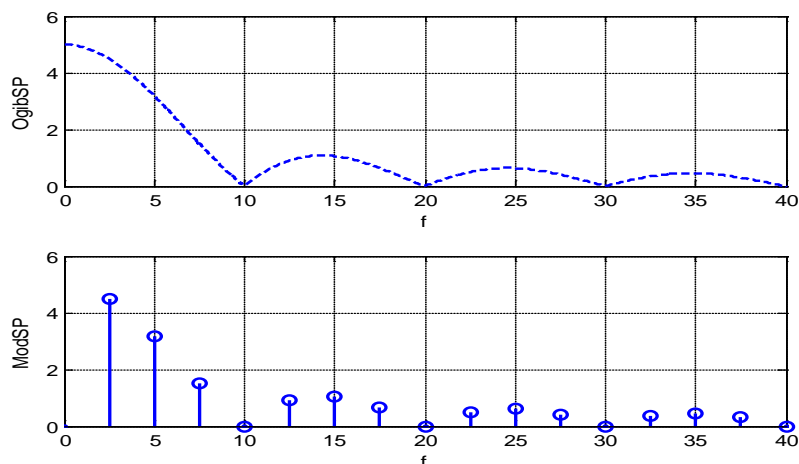
2. Построить график амплитудно-частотного спектра, указав на графике значения в типичных точках: значение спектральной плотности на нулевой частоте (равна площади «прямоугольника сигнала» $S(0) = U_m t_u$); нули спектральной функции прямоугольного импульса (определяются соотношением $f_{0k} = \frac{k}{t_u}, k = 1, 2, 3, \dots$) (смотри график ниже)



3. Для заданных преподавателем в таблице 4.5 параметров периодической последовательности прямоугольных импульсов (амплитуды, частоты следования импульсов и длительности импульсов), предварительно вычислив частоты, на которых располагаются дискретные ком-

поненты спектра, построить график амплитудного спектра (3 лепестка спектральной плотности).

Также построить графики амплитудного спектра для случая, если, сначала, частота следования импульсов уменьшилась в 2 раза, а затем к тому же, длительность импульса увеличилась в N раз.



3. Для заданного в таблице 1.13. (Индивидуальные задания № 1) электрического сигнала записать математическое выражение для расчета комплексной спектральной плотности сигнала. Использовать прием, заключающийся в дифференцировании исходного сигнала необходимое число раз, чтобы он предстал в виде нескольких δ -функций.

Таблица 4.5.

Вариант	Амплитуда, В	Частота следования	Ед. измер.	Длительность импульса	Ед. измер.	Duty cycle	N
1	0,016	4	кГц	0,0625	мс	25	1,6
2	0,32	80	МГц	0,003125	мкс	25	1,6
3	0,08	20	МГц	0,0125	мкс	25	1,6
4	2	400	МГц	0,0005	мкс	20	2,5
5	0,064	16	кГц	0,015625	мс	25	1,6
6	0,4	100	МГц	0,0025	мкс	25	1,6
7	0,02	4	МГц	0,05	мкс	20	2,5
8	0,4	80	МГц	0,0025	мкс	20	2,5
9	0,016	4	МГц	0,0625	мкс	25	1,6
10	0,5	100	МГц	0,002	мкс	20	2,5
11	0,16	40	кГц	0,00625	мс	25	1,6

12	0,5	100	кГц	0,002	мс	20	2,5
13	0,04	8	МГц	0,025	мкс	20	2,5
14	0,8	200	МГц	0,00125	мкс	25	1,6
15	0,32	80	кГц	0,003125	мс	25	1,6
16	0,4	100	кГц	0,0025	мс	25	1,6
17	0,04	10	кГц	0,025	мс	25	1,6
18	0,08	20	кГц	0,0125	мс	25	1,6
19	0,1	20	МГц	0,01	мкс	20	2,5
20	0,01	2	МГц	0,1	мкс	20	2,5
21	0,4	80	кГц	0,0025	мс	20	2,5
22	2	400	кГц	0,0005	мс	20	2,5
23	0,008	2	кГц	0,125	мс	25	1,6
24	0,005	1	МГц	0,2	мкс	20	2,5
25	0,2	40	кГц	0,005	мс	20	2,5
26	0,005	1	кГц	0,2	мс	20	2,5
27	0,008	2	МГц	0,125	мкс	25	1,6
28	0,8	200	кГц	0,00125	мс	25	1,6
29	1	200	МГц	0,001	мкс	20	2,5
30	0,04	10	МГц	0,025	мкс	25	1,6

Используя средства MATLAB и записанное математическое выражение, определить спектральную плотность сигнала, построить графики модуля и аргумента спектральной функции.

4. Для заданного в таблице 1.13. электрического сигнала средствами MATLAB, используя алгоритмы быстрого преобразования Фурье и перегруппировку частотных компонент, построить графики модуля и аргумента его спектральной функции.

5. Используя средства MATLAB определить и записать в отчет, какие вейвлеты используются в системе MATLAB. Для заданного преподавателем вейвлета определить его центральную частоту.

6. Для заданного преподавателем электрического сигнала вычислить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты первого уровня вейвлет-преобразования, а, затем, из одномерных аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов восстановить исходный сигнал.

7. Для заданного преподавателем электрического сигнала построить «дерево» пакетного вейвлет-разложения до уровня N. Получить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты в узлах «дерева»

8. Для заданного преподавателем электрического сигнала, используя пороговую обработку коэффициентов вейвлет - преобразования, очистить сигнал от «шума» и осуществить его компрессию. Оценить параметры компрессии.

9. Для заданного преподавателем графического файла, используя обработку коэффициентов вейвлет-преобразования, осуществить компрессию изображения. Оценить параметры компрессии.

Рекомендуемая литература

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук – 1966. – Т. 166. – № 11. – С. 1145 – 1170.
2. Башарин С.А. Теоретические основы электротехники: теория электрических цепей и электромагнитного поля : Учебное пособие для вузов / С.А. Башарин, В.В. Федоров. – М.: Academia, 2004. – 304 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарика, 2000. – 638 с.
4. Блаттер Н.К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2001. – 338 с.
5. Гультяев А.К. Визуальное моделирование в среде Matlab: Учебный курс. – Санкт-Петербург: КОРОНА-Принт, 2000. – 228 с.
6. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1972. Т.2. – 287 с.
7. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / Пер. с англ. Е.В. Мищенко; Под ред. А.П. Петухова – М.: РХД, 2001. – 151 с.
9. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
10. Жуков А.И. Метод Фурье в вычислительной математике. – М.: Наука. Физматлит, 1992. – 485 с.
11. Иванов И.И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи / И.И. Иванов, А.Ф. Лукин, Г.И. Соловьев. – СПб.: Издательство «Лань», 2002. – 192 с.
12. Иванов И.И. Электротехника: Учебник для вузов / И.И. Иванов, В.С. Равдоник. – М.: Высшая школа, 1984. – 375 с.
13. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 705 с.
14. Киселев Б.М. Matlab. Пакет Simulink // Радиомир. Ваш компьютер – 2005 – №9. – С14 – 18.
15. Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. Сборник задач: учебное пособие для вузов / Н.В. Коровкин, Е.Е. Селина, В.Л. Чечурин. – СПб.; М.; Х.; Минск: Питер, 2004. – 512 с.
16. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

17. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники: Курс лекций: Учеб.пособие для высших и сред.учеб.заведений. – СПб.: Корона-Принт, 2000 . – 366 с.
18. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. – <http://matlab.ru>, раздел «Simulink».
19. Четверухин Б.М. Основы электротехники и электроники: Конспект лекций / Б.М. Четверухин, Г.С. Прокудин. – К.: Изд-во Европейского ун-та, 2002. – 149 с.
20. Чуи К. Введение в вейвлеты / Пер. с англ. Под ред. Я.М. Жилейкина – М.: Мир, 2001. – 318 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Тема 1. Основные понятия и определения электротехники6
1.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1	
<i>Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов параметров электрических сигналов и визуализации полученных результатов</i>	<i>6</i>
1.1.1. Общие сведения	6
1.1.2. Ввод исходных данных при проведение прямых вычислений	7
1.1.3. Решение простейших задач с напряжениями и токами, неизменными во времени	10
1.1.4. Решение задач с напряжениями и токами, изменяющимися во времени по гармоническому закону	10
1.1.5. Построение временных диаграмм токов, напряжений, ЭДС, изменяющихся во времени по гармоническому закону	20
1.1.6. Построение графиков импульсных сигналов	25
Контрольные вопросы	30
1.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	
<i>Измерение характеристик и параметров сигналов электрической цепи</i>	<i>31</i>
1.2.1. Цели работы	31
1.2.2. Самостоятельная работа студентов	31
1.2.3. Средства и способы проведения эксперимента	32
1.2.4. Порядок выполнения работы	39
1.2.5. Обработка результатов экспериментов	53
Контрольные вопросы	55
Индивидуальные задания № 1	
к самостоятельной работе студентов	56
Тема 2. Основные компоненты электрической цепи и их свойства	63
2.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2	
<i>Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов характеристик и параметров</i>	

<i>компонентов электрической цепи и визуализации</i>	
<i>полученных результатов</i>	63
2.1.1. Примеры задач	63
Контрольные вопросы	93
2.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	
<i>Измерение характеристик и параметров</i>	
<i>компонентов электрической цепи</i>	94
2.2.1. Цели работы	94
2.2.2. Самостоятельная работа студентов	94
2.2.3. Средства и способы проведения эксперимента	95
2.2.4. Порядок выполнения работы	97
2.2.5. Обработка результатов экспериментов	102
Контрольные вопросы	112
Индивидуальные задания № 2	
к самостоятельной работе студентов	113
Тема 3. Методы анализа электрических цепей	118
3.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3	
<i>Использование системы MATLAB для автоматизации</i>	
<i>математических расчетов параметров электрических</i>	
<i>цепей и визуализации полученных результатов</i>	120
3.1. 1. Общие сведения	120
3.1.2. Вычисление передаточных характеристик	
Г-образных четырехполюсников	120
3.1.3. Вычисление передаточных характеристик Т и	
П-образных четырехполюсников	125
3.1.4. Графическое построение характеристик	
электрических цепей	127
Контрольные вопросы	134
3.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	
<i>Измерение характеристик и параметров сложных</i>	
<i>электрических цепей</i>	135
3.2.1. Цели работы	135
3.2.2. Самостоятельная работа студентов	135
3.2.3. Средства и способы проведения эксперимента	136
3.2.4. Порядок выполнения работы	138
3.2.5. Обработка результатов экспериментов	147

Контрольные вопросы	148
Индивидуальные задания № 3	
к самостоятельной работе студентов	148
Тема 4. Спектральное представление токов и напряжений в электрических цепях	154
4.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4	
<i>Использование системы MATLAB для автоматизации математических расчетов спектров электрических сигналов и визуализации полученных результатов</i>	<i>154</i>
4.1.1. Общие сведения	154
4.1.2. Задачи	155
Контрольные вопросы	177
4.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	
<i>Измерение характеристик и параметров спектрального представления сигналов</i>	<i>178</i>
4.2.1. Цели работы	178
4.2.2. Самостоятельная работа студентов	178
4.2.3. Средства и способы проведения эксперимента	179
4.2.4. Порядок выполнения работы	179
4.2.5. Обработка результатов экспериментов	195
Контрольные вопросы	195
Индивидуальные задания № 4	
к самостоятельной работе студентов	195
Рекомендуемая литература	199

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Практикум

по учебной дисциплине

**"ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.
ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ"**

Учебно-практическое пособие

Часть 1

Авторы: **Гоков Александр Михайлович**

Жидко Евгений Анатольевич

Ответственный за выпуск **Медведь О. И.**

Ответственный редактор **Седова Л. Н.**

Редактор **Демченко Н. И.**

Корректор **Бриль В. А.**

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Практикум

з навчальної дисципліни

**"ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ.
ЕЛЕМЕНТИ ЗАГАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ"**

Навчально-практичний посібник

Частина 1

Автори: **Гоков Олександр Михайлович**

Жидко Євген Анатолійович

ISBN 966-676-146-7

План 2006 г. Поз. №120-П.

Подп. в печ. 30.05.2006. Формат 60 × 90 1/16. Бумага MultiCopy. Печать Riso.

Усл.-печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. 12,86. Тираж 400 экз. Зак. № 369

Свидетельство о внесении в Государственный реестр субъектов издательского дела Дк №481 от 13.06.2001 г.

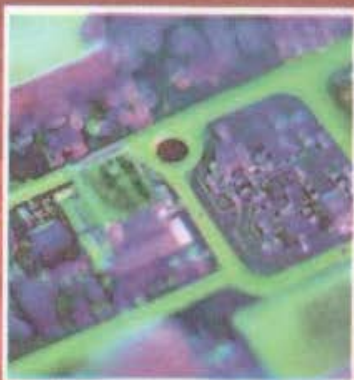
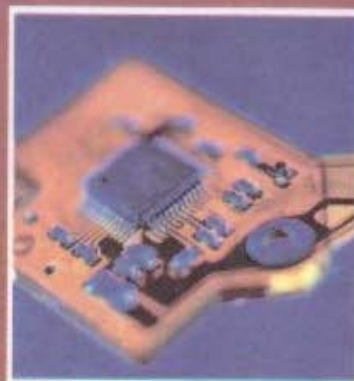
Издатель и изготовитель — издательство ХНЭУ, 61001, г. Харьков, пр. Ленина, 9а

Гоков А.М., Жидко Е.А.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.

УЧЕБНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Представляет собой практическую часть курса «Элементы общей теории электротехники». В нем в краткой форме приведены основные сведения из общей теории электротехники, фундаментальные идеи, термины и определения. Подробно описаны материалы, средства, способы и порядок выполнения практических занятий и лабораторных работ. На практических примерах широко и подробно изучаются входящие в электрическую цепь объекты. На основе применения общей теории рассматривается широкий круг характерных практических задач.



ИЗДАТЕЛЬСТВО **ХНЭУ**
ХАРЬКОВ 2006