

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра электротехники и авиационного электрооборудования

И.Е. Старостин

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ

*для студентов II курса
направления 25.03.03
всех форм обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2021

УДК 621.3.01+621.38
ББК 6П2.1
С77

Рецензент:

Халютин С.П. – д-р техн. наук, профессор

Старостин И.Е.

С77

Электротехника и электроника [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ / И.Е. Старостин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 32 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с требованиями рабочей программы по дисциплине Б1.ОД.20 «Электротехника и электроника» по учебному плану для студентов II курса направления 25.03.03 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 23.09.2021 г. и методического совета 29.09.2021 г.

УДК 621.3.01+621.38
ББК 6П2.1

В авторской редакции

Подписано в печать 25.10.2021 г.
Формат 60x84/16 Печ. л. 2 Усл. печ. л. 1,86
Заказ № 840/1004-УМП08 Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2021

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

Лабораторные работы проводятся на компьютерах и на стендах в лаборатории «Электротехники» с использованием реального оборудования, а также системы компьютерной математики Scilab 6.1.0, установленной на компьютерах лаборатории. Использование системы компьютерной математики Scilab призвано автоматизировать расчеты электрических цепей, а также симулировать электрические цепи, в том числе и симулировать динамику величин, не поддающихся непосредственному измерению.

Перед проведением работы обучающиеся должны ознакомиться с её описанием и заданиями, изучить соответствующий раздел теоретического курса. Допуск обучающихся к лабораторной работе осуществляется на основе индивидуальной беседы преподавателя с обучающимся.

Удобное графическое представление решений, возможность менять физические параметры и мгновенно наблюдать динамику изменения решений позволяют глубже разобраться в физическом явлении, стимулирует у обучающихся творческий подход к выполнению лабораторной работы.

В настоящее время нельзя себе представить будущего специалиста, который бы не смог воспользоваться современными мощными математическими программными продуктами для решения производственных задач.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ЗАЩИТА

Лабораторные работы выполняются и оформляются на листах стандартного формата А4, которые должны быть обязательно скреплены.

Графики выполняются с использованием системы компьютерной математики Scilab 6.1.0 и должны быть выполнены также на стандартных листах и вложены в работу.

Условия задачи необходимо приводить полностью в том виде, как они сформулированы в задании, с учетом особенностей своего варианта. В решение включать необходимый минимум промежуточных расчетов, а также ли-

стинги Scilab 6.1.0. Окончательный результат расчета привести с указанием единицы измерения соответствующей величины.

Работа должна быть выполнена собственноручно, датирована и подписана обучающимся. Выполненная работа представляется на кафедру преподавателю для проверки. Все замечания, отмеченные преподавателем, устраняются обучающимся в установленные сроки, после чего он защищает свою работу.

Студент обязан предоставить файлы Scilab 6.1.0 на электронном носителе, а сам отчет в программе WORD.

Студенты, не выполнившие лабораторные работы в назначенный срок, к зачёту по дисциплине «Электротехника и электроника» не допускаются.

УКАЗАНИЯ К ВЫБОРУ ВАРИАНТА

Вариант задания каждому студенту назначается преподавателем индивидуально.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2007.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. –М.: Физматлит, 2006.
3. Калашников С.Г. Электричество. –М.: Физматлит, 2003.

По программе Scilab рекомендуется использовать доступные интернет – ресурсы, а также встроенную справку Scilab.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: проверить экспериментально правила Кирхгофа и закон Ома в электрических цепях постоянного тока.

1.1. Основные положения

Для математического описания электрических цепей постоянного тока необходимы закон Ома и правила Кирхгофа. Закон Ома может быть сформулирован как для участка цепи с ЭДС (неоднородного участка цепи), так и для участка цепи без ЭДС (однородного участка цепи) (рисунок 1).

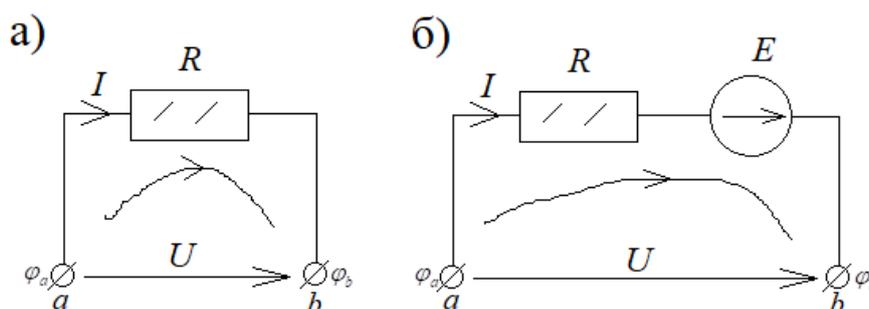


Рисунок 1. Однородные а) и неоднородные б) участки электрической цепи

Для однородного участка цепи (рисунок 1а) закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}; \quad (1.1)$$

для неоднородного участка цепи (рисунок 1б) закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{E + U}{R} = \frac{E + (\varphi_a - \varphi_b)}{R}. \quad (1.2)$$

Напряжения и токи в законе Ома для однородного участка цепи (1.1) и для неоднородного участка цепи (1.2) берутся с учетом правила знаков:

1. Если направление тока на участке цепи совпадает с выбранным положительным направлением (рисунки 1а и 1б), то ток в законе Ома для однородного участка цепи (1.1) и для неоднородного участка

цепи (1.8) берем со знаком «+»; в противном случае ток в законе Ома берем со знаком «-».

2. Если направление напряжения на участке цепи совпадает с выбранным положительным направлением (рисунки 1а и 1б), то напряжение в законе Ома для однородного участка цепи (1.7) и для неоднородного участка цепи (1.8) берем со знаком «+»; в противном случае напряжение в законе Ома берем со знаком «-».
3. Если направление ЭДС на участке цепи совпадает с выбранным положительным направлением (рисунок 1б), то ЭДС в законе Ома для неоднородного участка цепи (1.8) берем со знаком «+»; в противном случае ЭДС в законе Ома берем со знаком «-».

Первое правило Кирхгофа вытекает из ненакапливаемости электрического заряда в узлах электрической цепи – сколько электрического заряда втекло в узел, столько же его и вытекло. Отсюда, формулировка первого правила Кирхгофа:

Для любого узла произвольной электрической цепи алгебраическая сумма токов, втекающих в этот узел и вытекающих из этого узла, равна нулю:

$$\sum_{k=0}^n I_k = 0. \quad (1.3)$$

Входящие в первое правило Кирхгофа токи необходимо брать со знаками в соответствии с **правилом знаков**:

1. если втекающие в некоторый узел токи берем со знаком «+», то вытекающие из этого узла токи мы берем со знаком «-»;
2. если втекающие в некоторый узел токи берем со знаком «-», то вытекающие из этого узла токи мы берем со знаком «+»;

Эквивалентность двух приведенных правил знаков нетрудно показать, умножив выражение первого правила Кирхгофа слева и справа на -1. Как нетруд-

но видеть, для любого из узлов электрической цепи можно произвольно взять одно из двух приведенных правил знаков.

Для анализа электрических цепей, имеющей N узлов, достаточно записать первое правило Кирхгофа для $N - 1$ узлов.

Второе правило Кирхгофа вытекает из равенства нулю суммы разностей потенциалов всех элементов цепи, входящих в замкнутый контур; отсюда, формулировка второго правила Кирхгофа:

Для любого замкнутого контура электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на элементах в этом контуре равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:

$$\sum_{k=0}^{n-1} I_k R_k = \sum_{r=0}^{\tilde{n}-1} E_r. \quad (1.4)$$

Токи и ЭДС во второе правило Кирхгофа входят с учетом **правила знаков** (вытекающих из правила знаков закона Ома):

1. если произвольно выбранное положительное направление тока совпадает с направлением обхода контура, то такой ток берется со знаком «+»; в противном случае этот ток берется со знаком «-»;
2. если произвольно выбранное положительное направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то такая ЭДС берется со знаком «+»; в противном случае эта ЭДС берется со знаком «-».

Полученные правила Кирхгофа в случае цепей постоянного тока наряду с законом Ома представляют собой замкнутую систему уравнений для токов и напряжений в электрической цепи (1.1) – (1.4), позволяющей однозначно определить эти токи и напряжения.

1.2. Рабочее задание

Для представленных ниже электрических цепей (задания 1 и 2) необходимо:

- 1) записать уравнения для токов и напряжений в соответствии с законом Ома и правилами Кирхгофа;
- 2) полученные уравнения для токов и напряжений реализовать программно на базе СКМ Scilab;
- 3) свести в таблицу выданные преподавателем исходные данные;
- 4) для заданных исходных данных выполнить расчеты токов и напряжений заданной электрической цепи и свести результаты расчетов в таблицу;
- 5) в соответствии с заданными исходными данными собрать заданную электрическую цепь в симуляторе Xcos/Scilab и выполнить симуляцию электрической цепи и свести результаты симуляции токов и напряжений в таблицу;
- 6) в соответствии с заданными исходными данными собрать заданную электрическую цепь на учебной экспериментальной установке;
- 7) выполнить измерения напряжений и токов и свести результаты измерений в таблицу;
- 8) рассчитать абсолютные погрешности расчетов относительно экспериментальных данных и симуляции по формуле:

$$\Delta = |a_u - a_p|,$$

где a_u - результаты измерений или симуляции, а a_p - результаты расчетов; результаты расчетов свести в таблицу; допустимость полученной погрешности оценивается преподавателем.

Задание 1. Для приведенной на рисунке 2 электрической цепи выполнить расчеты и измерения токов и напряжений, используя заданные преподавателем данные. Выполнить симуляцию этой электрической цепи в Xcos/Scilab, собрав в этом симуляторе схему, показанную на рисунке 3. Эти исходные данные свести в таблицу 1. Результаты измерений, расчетов и симуляции свести в таблицу 2. Затем вычислить погрешности, сведя результаты расчетов в таблицу 2.

Внутренне сопротивления источников электропитания полагаем равными нулю.

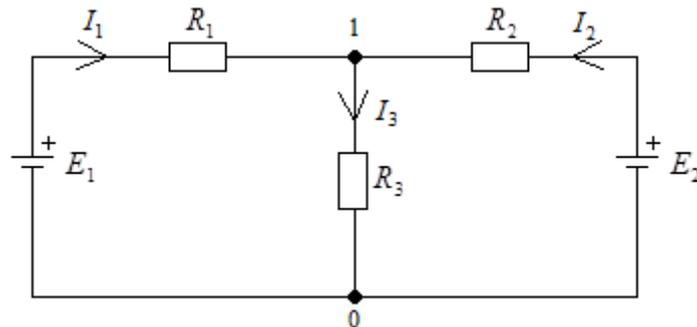


Рисунок 2. Исследуемая электрическая цепь

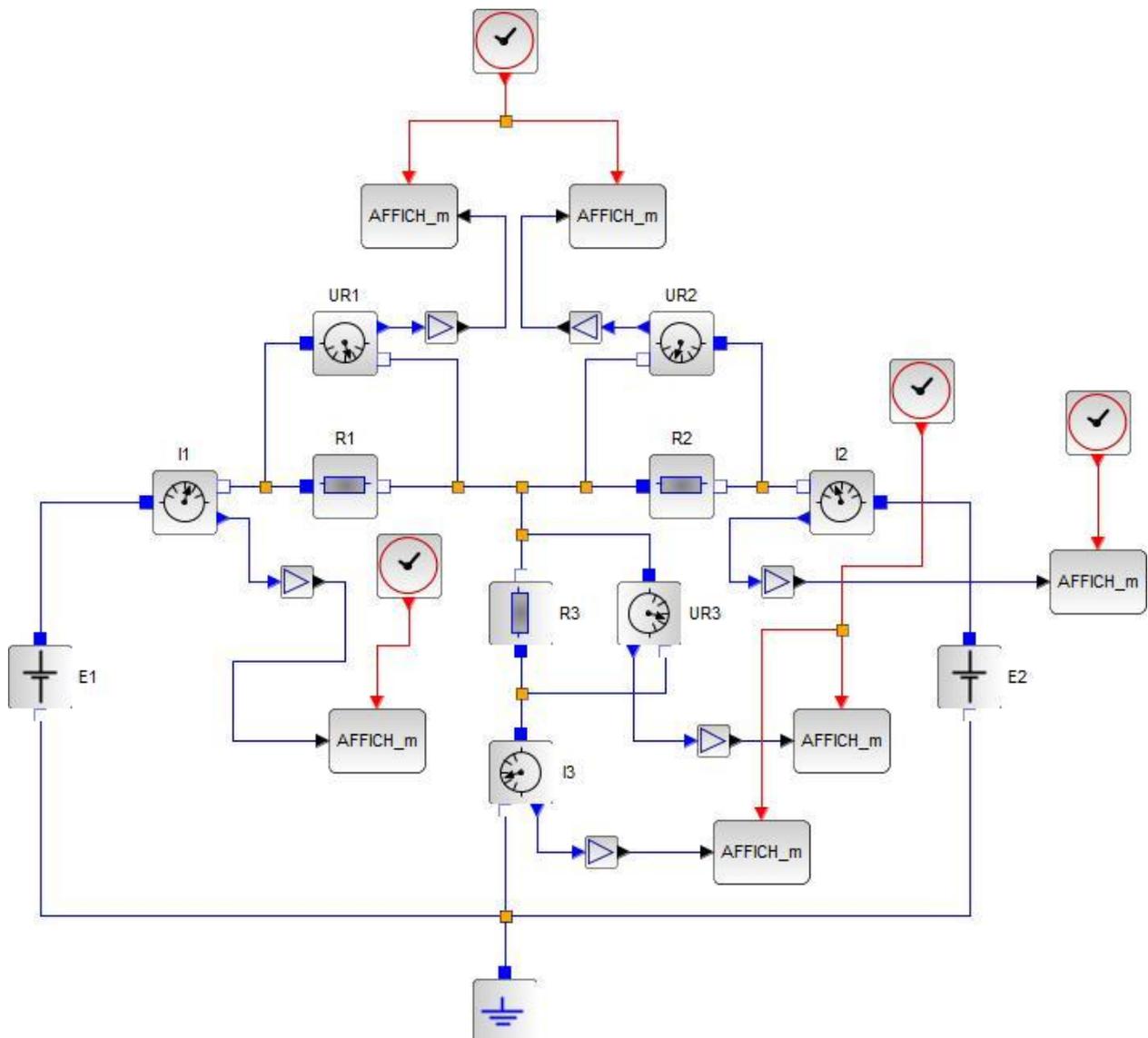


Рисунок 3. Симуляция исследуемой электрической цепи в Xcos/Scilab

Таблица 1. Исходные данные для расчета и экспериментального исследования электрической цепи

Величина	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	E_1 , В	E_2 , В
Значения					

Таблица 2. Результаты расчетов, измерения и симуляции

Величина	Результаты расчетов	Результаты симуляции	Результаты измерений	Ошибка расчетов	Ошибка симуляции
Ток I_1 через резистор R_1 , мА					
Ток I_2 через резистор R_2 , мА					
Ток I_3 через резистор R_3 , мА					
Напряжение U_{R_1} на резисторе R_1 , В					
Напряжение U_{R_2} на резисторе R_2 , В					
Напряжение					

U_{R_3} на резисторе R_3 , В					
----------------------------------	--	--	--	--	--

В соответствие с первым правилом Кирхгофа получим для узла 1 (рисунок 2):

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (1.5)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа для контуров $E_1 - R_1 - R_3 - E_1$ и $E_2 - R_2 - R_3 - E_2$ имеем соответственно:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1, \quad I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2. \quad (1.6)$$

В матричном виде система уравнений (1.5) и (1.6) примет вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ R_1 & 0 & R_3 \\ 0 & R_2 & R_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 \\ E_2 \end{pmatrix};$$

отсюда решение этой системы (1.5) – (1.7) в матричном виде примет вид:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ R_1 & 0 & R_3 \\ 0 & R_2 & R_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

Соотношение (1.7) непосредственно реализуется в Scilab для расчета токов через резисторы. Определив в соответствие с (1.7) токи через резисторы, мы согласно закону Ома получим напряжения на резисторах:

$$U_{R_1} = I_1 R_1, \quad U_{R_2} = I_2 R_2, \quad U_{R_3} = I_3 R_3. \quad (1.8)$$

Соотношения (1.8) также реализовываются в Scilab для расчета напряжений.

Погрешности $\Delta_{I,1}^u, \Delta_{I,2}^u, \Delta_{I,3}^u$ расчета токов I_1, I_2, I_3 относительно измеренных значений токов I_1^u, I_2^u, I_3^u соответственно:

$$\Delta_{I,1}^u = |I_1^u - I_1|, \quad \Delta_{I,2}^u = |I_2^u - I_2|, \quad \Delta_{I,3}^u = |I_3^u - I_3|; \quad (1.9)$$

погрешности $\Delta_{I,1}^c, \Delta_{I,2}^c, \Delta_{I,3}^c$ расчета токов I_1, I_2, I_3 относительно симулированных значений токов I_1^c, I_2^c, I_3^c соответственно:

$$\Delta_{I,1}^c = |I_1^c - I_1|, \quad \Delta_{I,2}^c = |I_2^c - I_2|, \quad \Delta_{I,3}^c = |I_3^c - I_3|; \quad (1.10)$$

погрешности $\Delta_{U,1}^u, \Delta_{U,2}^u, \Delta_{U,3}^u$ расчета напряжений $U_{R_1}, U_{R_2}, U_{R_3}$ относительно измеренных значений напряжений $U_{R_1}^u, U_{R_2}^u, U_{R_3}^u$ соответственно:

$$\Delta_{U,1}^u = |U_{R_1}^u - U_{R_1}|, \Delta_{U,2}^u = |U_{R_2}^u - U_{R_2}|, \Delta_{U,3}^u = |U_{R_3}^u - U_{R_3}|; \quad (1.11)$$

погрешности $\Delta_{U,1}^c, \Delta_{U,2}^c, \Delta_{U,3}^c$ расчета напряжений $U_{R_1}, U_{R_2}, U_{R_3}$ относительно симулированных значений напряжений $U_{R_1}^c, U_{R_2}^c, U_{R_3}^c$ соответственно:

$$\Delta_{U,1}^c = |U_{R_1}^c - U_{R_1}|, \Delta_{U,2}^c = |U_{R_2}^c - U_{R_2}|, \Delta_{U,3}^c = |U_{R_3}^c - U_{R_3}|. \quad (1.12)$$

Выражения (1.9) – (1.12) также реализовываются в листинге Scilab.

Итак, с учетом (1.7) – (1.12) код в Scilab примет вид:

```
//Исходные данные
R1 = <Сюда вводится значение>;//Ом
R2 = <Сюда вводится значение>;//Ом
R3 = <Сюда вводится значение>;//Ом
E1 = <Сюда вводится значение>;//В
E2 = <Сюда вводится значение>;//В

//Измеренные значения токов
eI1 = <Сюда вводится значение>;//мА
eI2 = <Сюда вводится значение>;//мА
eI3 = <Сюда вводится значение>;//мА

//Симулированные значения токов
cI1 = <Сюда вводится значение>;//мА
cI2 = <Сюда вводится значение>;//мА
cI3 = <Сюда вводится значение>;//мА

//Измеренные значения напряжений на сопротивлениях
eUR1 = <Сюда вводится значение>;//В
eUR2 = <Сюда вводится значение>;//В
eUR3 = <Сюда вводится значение>;//В

//Симулированные значения напряжений на сопротивлениях
cUR1 = <Сюда вводится значение>;//В
cUR2 = <Сюда вводится значение>;//В
cUR3 = <Сюда вводится значение>;//В

//Определяем токи
A = [ 1, 1, -1;..
      R1, 0, R3;..
      0, R2, R3];//Матрица системы
B = [0.0;..
      E1;..
      E2];//Матрица правой части
```

```

mI = inv(A)*B;//Матрица-столбец токов
I1 = mI(1);//Ток I1, А
I2 = mI(2);//Ток I2, А
I3 = mI(3);//Ток I3, А

//Переводим рассчитанные токи в миллиамперы
I1m = I1*1000;//Ток I1, мА
I2m = I2*1000;//Ток I2, мА
I3m = I3*1000;//Ток I3, мА

//Выводим токи на экран
disp("Ток I1 = " + string(I1m) + "мА");//Выводим ток I1, мА
disp("Ток I2 = " + string(I2m) + "мА");//Выводим ток I2, мА
disp("Ток I3 = " + string(I3m) + "мА");//Выводим ток I3, мА

//Определяем напряжения на сопротивлениях
UR1 = I1*R1;//В
UR2 = I2*R2;//В
UR3 = I3*R3;//В

//Выводим напряжения на сопротивлениях на экран
disp("Напряжение UR1 = " + string(UR1) + "В");//Выводим напряжение UR1, В
disp("Напряжение UR2 = " + string(UR2) + "В");//Выводим напряжение UR2, В
disp("Напряжение UR3 = " + string(UR3) + "В");//Выводим напряжение UR3, В

//Определяем погрешности измерения токов
errI1e = abs(eI1 - I1m);//мА
errI2e = abs(eI2 - I2m);//мА
errI3e = abs(eI3 - I3m);//мА

//Выводим погрешности измерения токов
disp("Погрешность измерения тока I1: " + string(errI1e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I2: " + string(errI2e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I3: " + string(errI3e) + "мА");

//Определяем погрешности симуляции токов
errI1c = abs(cI1 - I1m);//мА
errI2c = abs(cI2 - I2m);//мА
errI3c = abs(cI3 - I3m);//мА

//Выводим погрешности симуляции токов
disp("Погрешность симуляции тока I1: " + string(errI1c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I2: " + string(errI2c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I3: " + string(errI3c) + "мА");

//Определяем погрешности измерения напряжений на сопротивлениях
errUR1e = abs(eUR1 - UR1);//В
errUR2e = abs(eUR2 - UR2);//В
errUR3e = abs(eUR3 - UR3);//В

//Выводим погрешности измерения напряжений на сопротивлениях

```

```

disp("Погрешность измерения напряжения UR1: " + string(errUR1e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR2: " + string(errUR2e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR3: " + string(errUR3e) + "В");

//Определяем погрешности симуляции измерения напряжений на сопротивлениях
errUR1c = abs(cUR1 - UR1);//В
errUR2c = abs(cUR2 - UR2);//В
errUR3c = abs(cUR3 - UR3);//В

//Выводим погрешности симуляции напряжений на сопротивлениях
disp("Погрешность симуляции напряжения UR1: " + string(errUR1c) + "В");
disp("Погрешность симуляции напряжения UR2: " + string(errUR2c) + "В");
disp("Погрешность симуляции напряжения UR3: " + string(errUR3c) + "В");

```

Выполнив соответствующие измерения, симуляцию и расчет токов и напряжений для заданных преподавателем исходных данных, сведенных в таблицу 1, мы получим соответствующие результаты, которые сведем в таблицу 2.

Задание 2. Для приведенной на рисунке 4 электрической цепи выполнить расчеты и измерения токов и напряжений, используя заданные преподавателем данные. Выполнить симуляцию этой электрической цепи в Xcos/Scilab, собрав в этом симуляторе схему, показанную на рисунке 5. Эти исходные данные свести в таблицу 3. Результаты измерений, расчетов и симуляции свести в таблицу 4. Затем вычислить погрешности, сведя результаты расчетов в таблицу 4.

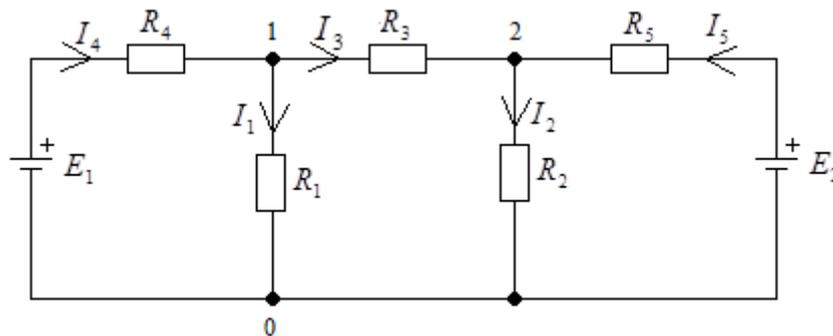


Рисунок 4. Исследуемая электрическая цепь

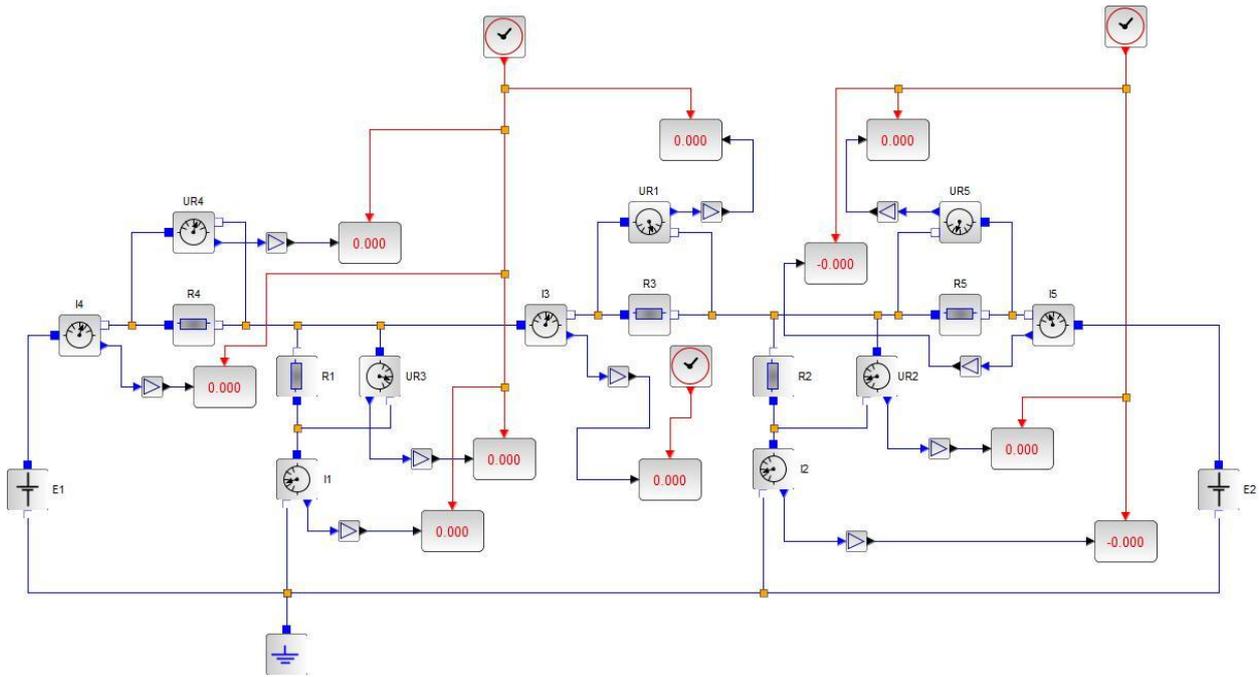


Рисунок 5. Симуляция исследуемой электрической цепи в Xcos/Scilab

Таблица 3. Исходные данные для расчета и экспериментального исследования электрической цепи

Величина	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	E_1 , В	E_2 , В
Значения							

Таблица 4. Результаты расчетов, измерения и симуляции

Величина	Результаты расчетов	Результаты симуляции	Результаты измерений	Ошибка расчетов	Ошибка симуляции
Ток I_1 через резистор R_1 , мА					
Ток I_2 через резистор R_2 , мА					

Ток I_3 через резистор R_3 , мА					
Ток I_4 через резистор R_4 , мА					
Ток I_5 через резистор R_5 , мА					
Напряжение U_{R_1} на резисторе R_1 , В					
Напряжение U_{R_2} на резисторе R_2 , В					
Напряжение U_{R_3} на резисторе R_3 , В					
Напряжение U_{R_4} на резисторе R_4 , В					
Напряжение U_{R_5} на резисторе R_5 , В					

Согласно первому правилу Кирхгофа для узлов 1 и 2 соответственно:

$$I_4 - I_3 - I_1 = 0, \quad I_3 + I_5 - I_2 = 0. \quad (1.13)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа для контуров $E_1 - R_4 - R_1 - E_1$, $E_2 - R_5 - R_2 - E_2$, $R_3 - R_2 - R_1 - R_3$ соответственно:

$$I_1 R_1 + I_4 R_4 = E_1, \quad I_2 R_2 + I_5 R_5 = E_2, \quad I_3 R_3 + I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0. \quad (1.14)$$

Система уравнений (1.13) и (1.14) в матричном виде запишется:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ R_1 & 0 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & R_5 \\ -R_1 & R_2 & R_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{pmatrix};$$

отсюда токи через резисторы будем искать в соответствие с соотношением:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ R_1 & 0 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & R_5 \\ -R_1 & R_2 & R_3 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1.15)$$

Соотношение (1.15) непосредственно реализуется в Scilab для расчета токов через резисторы. Определив в соответствие с (1.15) токи через резисторы, мы согласно закону Ома получим напряжения на резисторах:

$$U_{R_1} = I_1 R_1, \quad U_{R_2} = I_2 R_2, \quad U_{R_3} = I_3 R_3, \quad U_{R_4} = I_4 R_4, \quad U_{R_5} = I_5 R_5. \quad (1.16)$$

Соотношения (1.16) также реализовываются в Scilab для расчета напряжений.

Погрешности $\Delta_{I,1}^u$, $\Delta_{I,2}^u$, $\Delta_{I,3}^u$, $\Delta_{I,4}^u$, $\Delta_{I,5}^u$ расчета токов I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 относительно измеренных значений токов I_1^u , I_2^u , I_3^u , I_4^u , I_5^u соответственно:

$$\Delta_{I,1}^u = |I_1^u - I_1|, \quad \Delta_{I,2}^u = |I_2^u - I_2|, \quad \Delta_{I,3}^u = |I_3^u - I_3|, \quad \Delta_{I,4}^u = |I_4^u - I_4|, \quad \Delta_{I,5}^u = |I_5^u - I_5|; \quad (1.17)$$

погрешности $\Delta_{I,1}^c$, $\Delta_{I,2}^c$, $\Delta_{I,3}^c$, $\Delta_{I,4}^c$, $\Delta_{I,5}^c$ расчета токов I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 относительно симулированных значений токов I_1^c , I_2^c , I_3^c , I_4^c , I_5^c соответственно:

$$\Delta_{I,1}^c = |I_1^c - I_1|, \quad \Delta_{I,2}^c = |I_2^c - I_2|, \quad \Delta_{I,3}^c = |I_3^c - I_3|, \quad \Delta_{I,4}^c = |I_4^c - I_4|, \quad \Delta_{I,5}^c = |I_5^c - I_5|; \quad (1.18)$$

погрешности $\Delta_{U,1}^u$, $\Delta_{U,2}^u$, $\Delta_{U,3}^u$, $\Delta_{U,4}^u$, $\Delta_{U,5}^u$ расчета напряжений U_{R_1} , U_{R_2} , U_{R_3} , U_{R_4} , U_{R_5} относительно измеренных значений напряжений $U_{R_1}^u$, $U_{R_2}^u$, $U_{R_3}^u$, $U_{R_4}^u$, $U_{R_5}^u$ соответственно:

соответственно:

$$\Delta_{U,1}^u = |U_{R_1}^u - U_{R_1}|, \Delta_{U,2}^u = |U_{R_2}^u - U_{R_2}|, \Delta_{U,3}^u = |U_{R_3}^u - U_{R_3}|, \Delta_{U,4}^u = |U_{R_4}^u - U_{R_4}|, \Delta_{U,5}^u = |U_{R_5}^u - U_{R_5}|;$$
(1.19)

погрешности $\Delta_{U,1}^c, \Delta_{U,2}^c, \Delta_{U,3}^c, \Delta_{U,4}^c, \Delta_{U,5}^c$ расчета напряжений $U_{R_1}, U_{R_2}, U_{R_3}, U_{R_4}, U_{R_5}$ относительно симулированных значений напряжений $U_{R_1}^c, U_{R_2}^c, U_{R_3}^c, U_{R_4}^c, U_{R_5}^c$ соответственно:

$$\Delta_{U,1}^c = |U_{R_1}^c - U_{R_1}|, \Delta_{U,2}^c = |U_{R_2}^c - U_{R_2}|, \Delta_{U,3}^c = |U_{R_3}^c - U_{R_3}|, \Delta_{U,4}^c = |U_{R_4}^c - U_{R_4}|, \Delta_{U,5}^c = |U_{R_5}^c - U_{R_5}|.$$
(1.20)

Выражения (1.16) – (1.20) также реализовываются в листинге Scilab.

Итак, с учетом (1.15) – (1.20) код в Scilab примет вид:

//Исходные данные

R1 = <Сюда вводится значение>;//Ом

R2 = <Сюда вводится значение>;//Ом

R3 = <Сюда вводится значение>;//Ом

R4 = <Сюда вводится значение>;//Ом

R5 = <Сюда вводится значение>;//Ом

E1 = <Сюда вводится значение>;//В

E2 = <Сюда вводится значение>;//В

//Измеренные значения токов

eI1 = <Сюда вводится значение>;//мА

eI2 = <Сюда вводится значение>;//мА

eI3 = <Сюда вводится значение>;//мА

eI4 = <Сюда вводится значение>;//мА

eI5 = <Сюда вводится значение>;//мА

//Симулированные значения токов

cI1 = <Сюда вводится значение>;//мА

cI2 = <Сюда вводится значение>;//мА

cI3 = <Сюда вводится значение>;//мА

cI4 = <Сюда вводится значение>;//мА

cI5 = <Сюда вводится значение>;//мА

//Измеренные значения напряжений на сопротивлениях

eUR1 = <Сюда вводится значение>;//мА

eUR2 = <Сюда вводится значение>;//мА

eUR3 = <Сюда вводится значение>;//мА

eUR4 = <Сюда вводится значение>;//мА

eUR5 = <Сюда вводится значение>;//мА

//Симулированные значения напряжений на сопротивлениях

cUR1 = <Сюда вводится значение>;//мА

```

сUR2 = <Сюда вводится значение>;//мА
сUR3 = <Сюда вводится значение>;//мА
сUR4 = <Сюда вводится значение>;//мА
сUR5 = <Сюда вводится значение>;//мА

//Определяем токи
A = [-1, 0, -1, 1, 0;..
      0, -1, 1, 0, 1;..
      R1, 0, 0, R4, 0;..
      0, R2, 0, 0, R5;..
      -R1, R2, R3, 0, 0];//Матрица системы
B = [0.0;..
      0.0;..
      E1;..
      E2;..
      0.0];//Матрица правой части
mI = inv(A)*B;//Матрица-столбец токов
I1 = mI(1);//Ток I1, А
I2 = mI(2);//Ток I2, А
I3 = mI(3);//Ток I3, А
I4 = mI(4);//Ток I4, А
I5 = mI(5);//Ток I5, А

//Переводим рассчитанные токи в миллиамперы
I1m = I1*1000;//Ток I1, мА
I2m = I2*1000;//Ток I2, мА
I3m = I3*1000;//Ток I3, мА
I4m = I4*1000;//Ток I4, мА
I5m = I5*1000;//Ток I5, мА

//Выводим токи на экран
disp("Ток I1 = " + string(I1m) + "мА");//Выводим ток I1, мА
disp("Ток I2 = " + string(I2m) + "мА");//Выводим ток I2, мА
disp("Ток I3 = " + string(I3m) + "мА");//Выводим ток I3, мА
disp("Ток I4 = " + string(I4m) + "мА");//Выводим ток I4, мА
disp("Ток I5 = " + string(I5m) + "мА");//Выводим ток I5, мА

//Определяем напряжения на сопротивлениях
UR1 = I1*R1;//В
UR2 = I2*R2;//В
UR3 = I3*R3;//В
UR4 = I4*R4;//В
UR5 = I5*R5;//В

//Выводим напряжения на сопротивлениях на экран
disp("Напряжение UR1 = " + string(UR1) + "В");//Выводим напряжение UR1
disp("Напряжение UR2 = " + string(UR2) + "В");//Выводим напряжение UR2
disp("Напряжение UR3 = " + string(UR3) + "В");//Выводим напряжение UR3
disp("Напряжение UR4 = " + string(UR4) + "В");//Выводим напряжение UR4
disp("Напряжение UR5 = " + string(UR5) + "В");//Выводим напряжение UR5

//Определяем погрешности погрешности измерения токов

```

```

errI1e = abs(eI1 - I1m);
errI2e = abs(eI2 - I2m);
errI3e = abs(eI3 - I3m);
errI4e = abs(eI4 - I4m);
errI5e = abs(eI5 - I5m);

```

//Выводим погрешности измерения токов

```

disp("Погрешность измерения тока I1: " + string(errI1e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I2: " + string(errI2e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I3: " + string(errI3e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I4: " + string(errI4e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I5: " + string(errI5e) + "мА");

```

//Определяем погрешности погрешности симуляции токов

```

errI1c = abs(cI1 - I1m);
errI2c = abs(cI2 - I2m);
errI3c = abs(cI3 - I3m);
errI4c = abs(cI4 - I4m);
errI5c = abs(cI5 - I5m);

```

//Выводим погрешности симуляции токов

```

disp("Погрешность симуляции тока I1: " + string(errI1c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I2: " + string(errI2c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I3: " + string(errI3c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I4: " + string(errI4c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I5: " + string(errI5c) + "мА");

```

//Определяем погрешности погрешности измерения напряжений на сопротивлениях

```

errUR1e = abs(eUR1 - UR1);
errUR2e = abs(eUR2 - UR2);
errUR3e = abs(eUR3 - UR3);
errUR4e = abs(eUR4 - UR4);
errUR5e = abs(eUR5 - UR5);

```

//Выводим погрешности измерения напряжений на сопротивлениях

```

disp("Погрешность измерения напряжения UR1: " + string(errUR1e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR2: " + string(errUR2e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR3: " + string(errUR3e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR4: " + string(errUR4e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR5: " + string(errUR5e) + "В");

```

//Определяем погрешности симуляции измерения напряжений на сопротивлениях

```

errUR1c = abs(cUR1 - UR1);
errUR2c = abs(cUR2 - UR2);
errUR3c = abs(cUR3 - UR3);
errUR4c = abs(cUR4 - UR4);
errUR5c = abs(cUR5 - UR5);

```

//Выводим погрешности симуляции напряжений на сопротивлениях

```

disp("Погрешность симуляции напряжения UR1: " + string(errUR1c) + "В");
disp("Погрешность симуляции напряжения UR2: " + string(errUR2c) + "В");
disp("Погрешность симуляции напряжения UR3: " + string(errUR3c) + "В");

```

```
disp("Погрешность симуляции напряжения UR4: " + string(errUR4c) + "B");  
disp("Погрешность симуляции напряжения UR5: " + string(errUR5c) + "B");
```

1.3. Содержание отчёта

1. Титульный лист, оформленный согласно установленным требованиям.
2. Наименование и цель работы.
3. Задание (вместе с таблицей исходных данных).
4. Систему расчетных уравнений.
5. Схему электрической цепи в симуляторе (в том числе и в электронном варианте).
6. Листинг программы (в том числе и в электронном варианте).
7. Результаты расчетов.
8. Выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: проверить экспериментально правила Кирхгофа и закон Ома в комплексном виде в линейных электрических цепях синусоидального переменного тока.

2.1. Основные положения

В линейных электрических цепях синусоидальные колебания возникают в случае, если в этих цепях действуют синусоидальные источники тока и ЭДС (идеальные) и частоты этих источников равны.

Для описания линейных электрических цепей переменного тока необходимы законы Ома и Кирхгофа в комплексном виде. Закон Ома в комплексном виде дает связь напряжения и тока на различных элементах цепей синусоидального переменного тока:

$$\dot{U} = \dot{Z}i, \quad (2.1)$$

где \dot{Z} - комплексное сопротивление (см. таблицу 5).

Таблица 5. Комплексные сопротивления различных элементов цепей переменного тока (кроме обмоток трансформатора)

Элемент	Выражение для комплексного сопротивления \dot{Z}
Резистивный	$\dot{Z} = R$
Емкостной	$\dot{Z} = -\frac{j}{\omega C}$
Индуктивный (идеальный)	$\dot{Z} = j\omega L$
Индуктивный (реальный)	$\dot{Z} = R + j\omega L$

В случае обмоток трансформатора мы помимо комплексных сопротивлений их обмоток учитываем также и перекрестные составляющие напряжений. Отсюда, в общем случае закон Ома для обмоток трансформаторов записывается в виде:

$$\dot{U}_k = \dot{Z}_k \dot{I}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n_{обм}} j\omega M_{k,j} \dot{I}_j, \quad k = 1, n_{обм}, \quad (2.2)$$

где $\dot{Z}_k, k = 1, n_{обм}$ - комплексные сопротивления каждой обмотки трансформатора (см. таблица 6).

Таблица 6. Комплексные сопротивления обмоток трансформатора

Обмотка трансформатора	Комплексное сопротивление обмотки трансформатора
Идеальная	$\dot{Z}_k = j\omega L_k, \quad k = 1, n_{обм}$
Реальная	$\dot{Z}_k = R_k + j\omega L_k, \quad k = 1, n_{обм}$

Для узлов линейных электрических цепей формулируется **первое правило Кирхгофа в комплексном виде**:

Для любого узла линейной электрической цепи синусоидального переменного тока алгебраическая сумма комплексных токов, втекающих в этот узел и вытекающих из этого узла, равна нулю:

$$\sum_k \dot{I}_k = 0. \quad (2.3)$$

Токи, втекающие в произвольный узел и вытекающие из этого узла, берем с учетом **правила знаков**:

- если комплексные токи, втекающие в некоторый произвольный узел произвольной линейной электрической цепи синусоидального переменного тока, мы берем со знаком «+», то вытекающие из этого узла комплексные токи мы берем со знаком «-»;
- если комплексные токи, втекающие в некоторый произвольный узел произвольной линейной электрической цепи синусоидального переменного тока, мы берем со знаком «-», то вытекающие из этого узла комплексные токи мы берем со знаком «+».

Для любых независимых контуров линейной электрической цепи синусоидального переменного тока формулируется **второе правило Кирхгофа в комплексном виде**:

Для любого замкнутого контура линейной электрической цепи синусоидального переменного тока алгебраическая сумма комплексных ЭДС вдоль этого контура равна алгебраической сумме комплексных падений напряжений вдоль этого контура:

$$\sum_i \dot{E}_i = \sum_i \dot{U}_i. \quad (2.4)$$

ЭДС и падения напряжений в контурах берутся с учетом **правил знаков**:

- **правила знаков для ЭДС**: если направление комплексной ЭДС $\varepsilon_i(t)$ совпадает с направлением обхода контура, то эту комплексную ЭДС $\varepsilon_i(t)$ мы берем со знаком «+»; в противном случае – со знаком «-»;
- **правила знаков для падений напряжений**: если комплексные токи (через которые в соответствии с (2.1) и таблицей 1 и (2.2) и таблицей 2 определяем соответствующие комплексные падения напряжений) совпадают с направлением обхода контура, то соответствующие комплексные падения напряжения мы берем со знаком «+»; в противном случае – со знаком «-».

Для произвольной линейной электрической цепи синусоидального переменного тока выражения (2.1) – (2.4) дают полную систему уравнений для токов и напряжений.

2.2. Рабочее задание

Для электрической цепи, показанной на рисунке 6, необходимо выполнить следующие действия:

- 1) записать уравнения для токов и напряжений в соответствии с законом Ома и правилами Кирхгофа в комплексном виде;
- 2) полученные уравнения для токов и напряжений реализовать программно на базе СКМ Scilab;
- 3) свести в таблицу 7 выданные преподавателем исходные данные;
- 4) для заданных исходных данных выполнить расчеты действующих значений токов и напряжений заданной электрической цепи (рисунок 6) при разных частотах и свести результаты расчетов в таблицу 8;
- 5) в соответствии с заданными исходными данными собрать заданную электрическую цепь в симуляторе Xcos/Scilab и выполнить симуляцию электрической цепи, определить из результатов симу-

ляции действующие значения токов и напряжений при разных частотах и свести результаты симуляции токов и напряжений в таблицу 8;

- б) в соответствие с заданными исходными данными собрать заданную электрическую цепь на учебной экспериментальной установке;
- 7) выполнить измерения напряжений и токов (действующих значений) при разных частотах и свести результаты измерений в таблицу 8;
- 8) рассчитать абсолютные погрешности расчетов относительно экспериментальных данных и симуляции по формуле:

$$\Delta = |a_u - a_p|,$$

где a_u - результаты измерений или симуляции, а a_p - результаты расчетов; результаты расчетов свести в таблицу 8; допустимость полученной погрешности оценивается преподавателем.

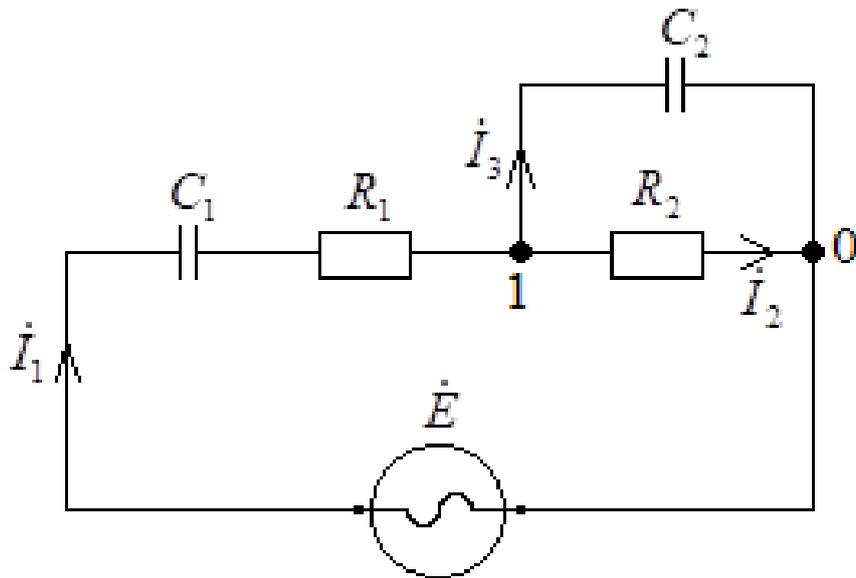


Рисунок 6. Исследуемая электрическая цепь (мост Вина)

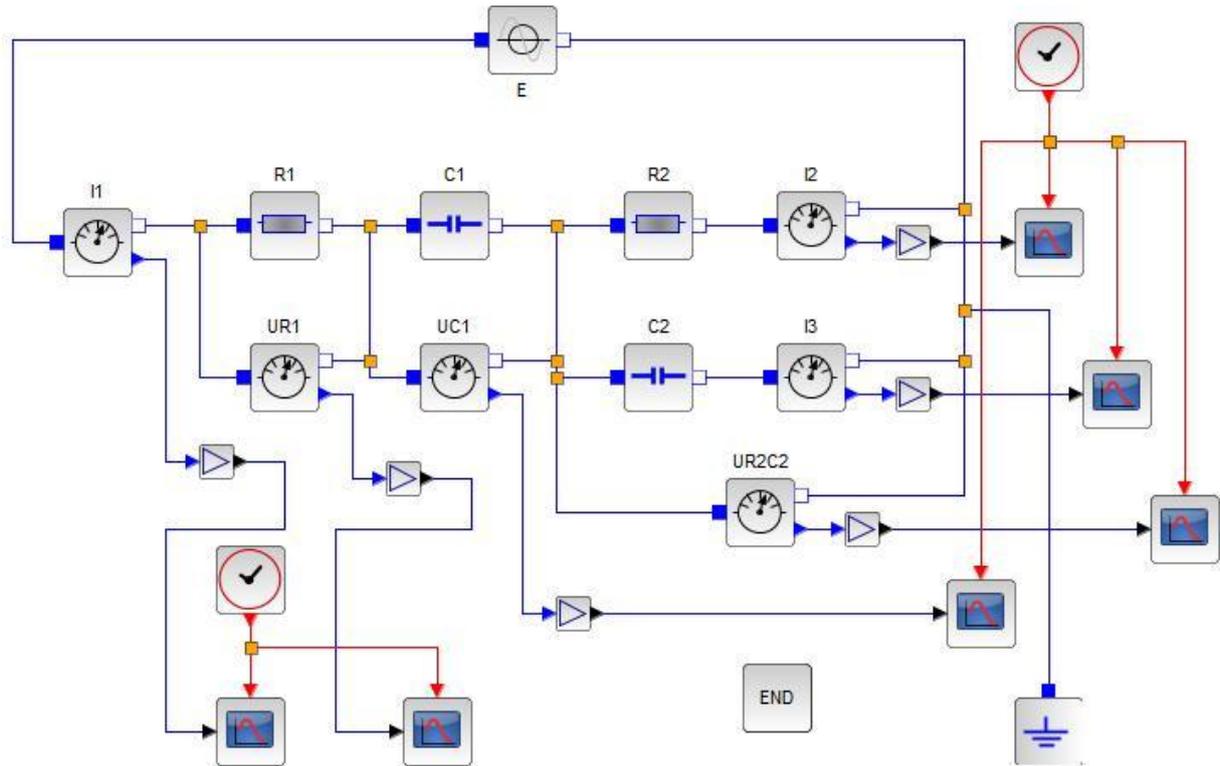


Рисунок 7. Симуляция исследуемой электрической цепи в Xcos/Scilab

Таблица 7. Исходные данные для расчета и экспериментального исследования электрической цепи

Величина	R_1 , Ом	C_1 , мкФ	R_2 , Ом	C_2 , мкФ	ν , Гц
Значения					

Таблица 8. Результаты расчетов, измерения и симуляции

Величина	Результаты расчетов	Результаты симуляции	Результаты измерений	Ошибка расчетов	Ошибка симуляции
Ток I_1 через резистор R_1 и конденсатор C_1 , мА					
Ток I_2 через					

резистор R_2 , мА					
Ток I_3 через конденсатор C_2 , мА					
Напряжение U_{R_1} на резисторе R_1 , В					
Напряжение U_{C_1} на конденсаторе C_1 , В					
Напряжение $U_{R_2-C_2}$ на резисторе R_2 и конденсаторе C_2 , В					

Согласно первому правилу Кирхгофа в комплексном виде, записанном для узла 1, имеем:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0. \quad (5.5)$$

Согласно второму правилу Кирхгофа для контуров $E - C_1 - R_1 - R_2 - E$ и $R_2 - C_2 - R_2$ соответственно:

$$\dot{E} = -\frac{j}{\omega C_1} \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2, \quad R_2 \dot{I}_2 + \frac{j}{\omega C_2} \dot{I}_3 = 0. \quad (5.6)$$

В матричном виде система уравнений (5.5) и (5.6) примет вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 - j/(\omega C_1) & R_2 & 0 \\ 0 & R_2 & j/(\omega C_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{E} \\ 0 \end{pmatrix};$$

отсюда, учитывая, что

$$\dot{E} = E\sqrt{2},$$

имеем:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 - j/(\omega C_1) & R_2 & 0 \\ 0 & R_2 & j/(\omega C_2) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ E\sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

Решив систему уравнений (5.7), определим действующие значения токов:

$$I_1 = \frac{|\dot{I}_1|}{\sqrt{2}}, \quad I_2 = \frac{|\dot{I}_2|}{\sqrt{2}}, \quad I_3 = \frac{|\dot{I}_3|}{\sqrt{2}}. \quad (5.8)$$

Погрешности $\Delta_{I,1}^u$, $\Delta_{I,2}^u$, $\Delta_{I,3}^u$ расчета токов I_1 , I_2 , I_3 относительно измеренных значений токов I_1^u , I_2^u , I_3^u соответственно:

$$\Delta_{I,1}^u = |I_1^u - I_1|, \quad \Delta_{I,2}^u = |I_2^u - I_2|, \quad \Delta_{I,3}^u = |I_3^u - I_3|; \quad (5.9)$$

погрешности $\Delta_{I,1}^c$, $\Delta_{I,2}^c$, $\Delta_{I,3}^c$ расчета токов I_1 , I_2 , I_3 относительно симулированных значений токов I_1^c , I_2^c , I_3^c соответственно:

$$\Delta_{I,1}^c = |I_1^c - I_1|, \quad \Delta_{I,2}^c = |I_2^c - I_2|, \quad \Delta_{I,3}^c = |I_3^c - I_3|; \quad (5.10)$$

погрешности $\Delta_{U,1}^u$, $\Delta_{U,2}^u$, $\Delta_{U,3}^u$ расчета напряжений U_{R_1} , U_{C_1} , $U_{C_2R_2}$ относительно измеренных значений напряжений $U_{R_1}^u$, $U_{C_1}^u$, $U_{C_2R_2}^u$ соответственно:

$$\Delta_{U,1}^u = |U_{R_1}^u - U_{R_1}|, \quad \Delta_{U,2}^u = |U_{C_1}^u - U_{C_1}|, \quad \Delta_{U,3}^u = |U_{C_2R_2}^u - U_{C_2R_2}|; \quad (5.11)$$

погрешности $\Delta_{U,1}^c$, $\Delta_{U,2}^c$, $\Delta_{U,3}^c$ расчета напряжений U_{R_1} , U_{C_1} , $U_{C_2R_2}$ относительно симулированных значений напряжений $U_{R_1}^c$, $U_{C_1}^c$, $U_{C_2R_2}^c$ соответственно:

$$\Delta_{U,1}^c = |U_{R_1}^c - U_{R_1}|, \quad \Delta_{U,2}^c = |U_{C_1}^c - U_{C_1}|, \quad \Delta_{U,3}^c = |U_{C_2R_2}^c - U_{C_2R_2}|. \quad (5.12)$$

Выражения (5.9) – (5.12) также реализовываются в листинге Scilab.

Итак, с учетом (5.7) – (5.12) код в Scilab примет вид:

```
//Исходные данные
R1 = 10;//Ом
R2 = 15;//Ом
C1 = 10;//мкФ
C2 = 20;//мкФ
E = 5;//В
```

$\nu = 1; // \text{кГц}$

//Измеренные значения токов

$eI1 = -190; // \text{мА}$

$eI2 = 528; // \text{мА}$

$eI3 = 350; // \text{мА}$

//Симулированные значения токов

$cI1 = -192.3; // \text{мА}$

$cI2 = 538.46; // \text{мА}$

$cI3 = 346.153; // \text{мА}$

//Измеренные значения напряжений на сопротивлениях

$eUR1 = -1.9; // \text{мА}$

$eUC1 = 8.1; // \text{мА}$

$eUR2C2 = 6.85; // \text{мА}$

//Симулированные значения напряжений на сопротивлениях

$cUR1 = -1.923; // \text{мА}$

$cUC1 = 8.07692; // \text{мА}$

$cUR2C2 = 6.92308; // \text{мА}$

//Переводим микрофарады в фарады

$C1 = C1 * 10^{(-6)}; // \Phi$

$C2 = C2 * 10^{(-6)}; // \Phi$

//Переводим килоггерцы в герцы

$\nu = \nu * 10^3; // \text{Гц}$

//Определяем циклическую частоту

$\omega = 2 * \pi * \nu;$

//Определяем токи

$A = [\begin{matrix} 1, -1, & -1; .. \\ R1 - \frac{i}{\omega * C1}, R2, & 0; .. \\ 0, R2, \frac{i}{\omega * C2} \end{matrix}]; // \text{Матрица системы}$

$B = [\begin{matrix} 0.0; .. \\ E * \sqrt{2}; .. \\ 0.0 \end{matrix}]; // \text{Матрица правой части}$

$mI = \text{inv}(A) * B; // \text{Матрица-столбец токов}$

$I1 = \text{abs}(mI(1)); // \text{Ток } I1, A$

$I2 = \text{abs}(mI(2)); // \text{Ток } I2, A$

$I3 = \text{abs}(mI(3)); // \text{Ток } I3, A$

//Переводим рассчитанные токи в миллиамперы

$I1m = I1 * 1000; // \text{Ток } I1, \text{ мА}$

$I2m = I2 * 1000; // \text{Ток } I2, \text{ мА}$

$I3m = I3 * 1000; // \text{Ток } I3, \text{ мА}$

//Выводим токи на экран

$\text{disp}(\text{"Ток } I1 = " + \text{string}(I1m) + \text{"мА"}); // \text{Выводим ток } I1, \text{ мА}$

$\text{disp}(\text{"Ток } I2 = " + \text{string}(I2m) + \text{"мА"}); // \text{Выводим ток } I2, \text{ мА}$

```

disp("Ток I3 = " + string(I3m) + "мА");//Выводим ток I3, мА

//Определяем напряжения на сопротивлениях и емкостях
UR1 = I1*R1;//В
UC1 = I1/(omega*C1);//В
UR2C2 = I2*R2;//В

//Выводим напряжения на сопротивлениях на экран
disp("Напряжение UR1 = " + string(UR1) + "В");//Выводим напряжение UR1
disp("Напряжение UC1 = " + string(UC1) + "В");//Выводим напряжение UC1
disp("Напряжение UR2C2 = " + string(UR2C2) + "В");//Выводим напряжение UR2C2

//Определяем погрешности измерения токов
errI1e = abs(eI1 - I1m);
errI2e = abs(eI2 - I2m);
errI3e = abs(eI3 - I3m);

//Выводим погрешности измерения токов
disp("Погрешность измерения тока I1: " + string(errI1e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I2: " + string(errI2e) + "мА");
disp("Погрешность измерения тока I3: " + string(errI3e) + "мА");

//Определяем погрешности симуляции токов
errI1c = abs(cI1 - I1m);
errI2c = abs(cI2 - I2m);
errI3c = abs(cI3 - I3m);

//Выводим погрешности симуляции токов
disp("Погрешность симуляции тока I1: " + string(errI1c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I2: " + string(errI2c) + "мА");
disp("Погрешность симуляции тока I3: " + string(errI3c) + "мА");

//Определяем погрешности измерения напряжений на сопротивлениях
errUR1e = abs(eUR1 - UR1);
errUC1e = abs(eUC1 - UC1);
errUR2C2e = abs(eUR2C2 - UR2C2);

//Выводим погрешности измерения напряжений на сопротивлениях
disp("Погрешность измерения напряжения UR1: " + string(errUR1e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UC1: " + string(errUC1e) + "В");
disp("Погрешность измерения напряжения UR2C2: " + string(errUR2C2e) + "В");

//Определяем погрешности симуляции измерения напряжений на сопротивлениях
errUR1c = abs(cUR1 - UR1);
errUC1c = abs(cUC1 - UC1);
errUR2C2c = abs(cUR2C2 - UR2C2);

//Выводим погрешности симуляции напряжений на сопротивлениях
disp("Погрешность симуляции напряжения UR1: " + string(errUR1c) + "В");
disp("Погрешность симуляции напряжения UC1: " + string(errUC1c) + "В");
disp("Погрешность симуляции напряжения UR2C2: " + string(errUR2C2c) + "В");

```

2.3. Содержание отчёта

1. Титульный лист, оформленный согласно установленным требованиям.
2. Наименование и цель работы.
3. Задание.
4. Систему расчетных уравнений.
5. Схему электрической цепи в симуляторе (в том числе и в электронном варианте).
6. Листинг программы (в том числе и в электронном варианте).
7. Результаты расчетов.
8. Выводы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ.....	3
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ЗАЩИТА	3
УКАЗАНИЯ К ВЫБОРУ ВАРИАНТА	4
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	5
1.1. Основные положения.....	5
1.2. Рабочее задание	7
1.3. Содержание отчёта.....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	21
2.1. Основные положения.....	21
2.2. Рабочее задание	24
2.3. Содержание отчёта.....	31