

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ**

УДК 621.3  
ББК ̑21я73-5  
Т338

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент  
Доктор технических наук, профессор  
*В.Н. Чернышов*

Составители:  
*Е.Б. Винокуров,*  
*В.М. Иванов,*  
*Е.А. Печагин*

Т338 Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : лабораторные работы / сост. : Е.Б. Винокуров, В.М. Иванов, Е.А. Печагин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 44 с. – 100 экз.

Даны сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники» по разделу «Электрические цепи». Предназначены для студентов 2 курса специальностей 140211, 110302 всех форм обучения.

УДК 621.3  
ББК ̑21я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2008  
Министерство образования и науки Российской Федерации  
**ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ**

Лабораторные работы  
для студентов 2 курса  
специальностей 140211, 110302  
всех форм обучения



---

Тамбов  
◆ Издательство ТГТУ ◆  
2008

Учебное издание

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ**

Лабораторные работы

Составители:  
ВИНОКУРОВ Евгений Борисович,  
ИВАНОВ Владимир Михайлович,  
ПЕЧАГИН Евгений Александрович

Редактор Ю.В. Ш и м а н о в а  
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 5.11.2008  
Формат 60 × 84/16. 2,56 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 480.

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** Экспериментальная проверка основных законов и методов расчёта линейных цепей постоянного тока: наложения, двух узлов; эквивалентного генератора.

**Оборудование и приборы:**

1. Источники постоянного тока.
2. Амперметр постоянного тока 0...1 А.
3. Вольтметр постоянного тока 0...15 В.

### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: закон Ома для участка цепи; обобщённый закон Ома; законы Кирхгофа; метод контурных токов; принцип наложения и метод наложения; метод узловых потенциалов (двух узлов); метод эквивалентного генератора.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить величину ЭДС источника  $E_1$  вольтметром и внести результат в табл. 1.
2. Определить сопротивления резисторов  $R_1, R_2, R_3$  методом амперметра-вольтметра, для чего собрать схему (рис. 1) и, подключая поочередно резисторы, измерить токи и напряжения. Данные измерений внести в табл. 1.

Таблица 1

Измерения							Вычисления		
$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_1$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
мА			В				Ом		

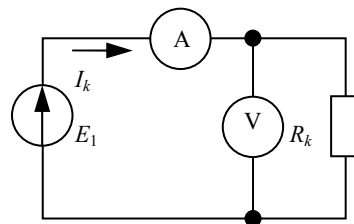


Рис. 1. Схема измерения сопротивления

3. Проверить экспериментально первый закон Кирхгофа. Собрать цепь согласно рис. 2. Измерить токи ветвей  $I_1, I_2, I_3$ , внести результат измерений в первую строку табл. 2. Проверить справедливость формулы  $\sum I_k = 0$ .

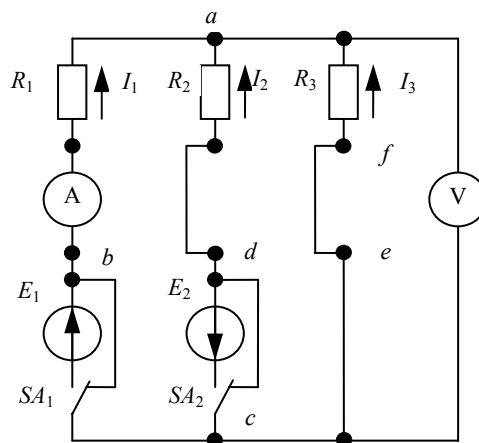


Рис. 2. Схема исследуемой цепи

4. Провести экспериментальную проверку (рис. 2) метода наложения, для чего:
  - а) измерить токи в ветвях  $I_1, I_2, I_3$  от действия двух источников  $E_1$  и  $E_2$ ; внести результат измерений в первую строку табл. 2;
  - б) измерить токи ветвей цепи  $I_1, I_2, I_3$  от действия одного источника ЭДС  $E_1$ ; внести результат измерений во вторую строку табл. 2;
  - в) измерить токи во всех ветвях цепи  $I_1, I_2, I_3$  от действия другого источника ЭДС  $E_2$ ; внести результат измерений в третью строку табл. 2;

- г) рассчитать токи во всех ветвях исследуемой цепи  $I_1, I_2, I_3$  методом наложения; внести результат расчётов в табл. 2;
- д) сравнить измеренные и рассчитанные значения токов ветвей; объяснить расхождения результатов.

Таблица 2

№ опыта		Измерения			Вычисления		
		$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
		мА					
1	$E_1, E_2$						
2	$E_1$						
3	$E_2$						

5. Провести экспериментальную проверку метода эквивалентного генератора относительно ветви  $R_3$  исследуемой цепи (см. рис. 2), для чего:

- замкнуть амперметром клеммы  $a$  и  $e$  и измерить ток  $I_{3кз}$  в короткозамкнутой ветви;
- отключить переключку  $f-e$  и измерить напряжение холостого хода  $U_{xx}$  на клеммах  $a-c$ ;
- рассчитать ток  $I_3$  методом эквивалентного генератора:

$$R_3 = \frac{U_{xx}}{I_{2кз}}; \quad I_3 = \frac{U_{xx}}{(R_2 + R_3)}.$$

Данные измерений и расчета внести в табл. 3.

Таблица 3

Измерения			Вычисления		
$I_{3кз}, A$	$U_{xx}, B$	$I_3, A$	$U_{xx}, B$	$R_3, Ом$	$I_3, A$

6. Снять потенциальную диаграмму внешнего контура исследуемой цепи (см. рис. 2), для чего:

- одну клемму вольтметра соединить с узлом  $c$ ;
- измерить потенциалы точек  $b, a, e, d$ , последовательно присоединяя к ним вторую клемму вольтметра;
- рассчитать потенциалы точек  $b, a, e, d$ , используя результаты опытов п. 3. Данные измерения и расчёта внести в табл. 4. Построить потенциальную диаграмму внешнего контура.

Таблица 4

Измерения, В					Вычисления, В				
$\varphi_b$	$\varphi_a$	$\varphi_e$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_b$	$\varphi_a$	$\varphi_e$	$\varphi_c$	$\varphi_d$

7. Выполнить эксперименты в программе **EWB**. Открыть файл `lab1_01.ewb`. Схема цепи соответствует рис. 3. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда. Установить переключатели  $S_1 \dots S_4$  с помощью клавиш «1», «2», «3», «4» в следующие положения:

$S_1 \dots S_3$  – «ВКЛ»;  $S_4$  – «ВЫКЛ».

Включить питание. Провести измерения токов  $I_1 \dots I_3$ . Заполнить первую строку табл. 5. Выключить питание.

8. Проверить выполнение первого закона Кирхгофа для верхнего узла цепи.

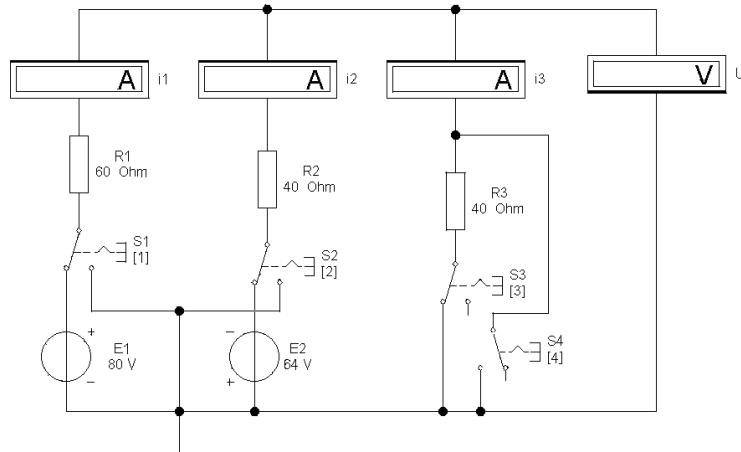


Рис. 3. Моделирование исследуемой цепи в программе EWB

№ опыта	Измерения, мА			Вычисления, мА		
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
1						
2						
3						

9. Переключатель S2 перевести в положение «ВЫКЛ». Включить питание. Измерить и внести во вторую строку табл. 5 значения токов  $I_1, I_2, I_3$  при действии одного источника ЭДС  $E_1$ . Выключить питание.

10. Переключатель S2 перевести в положение «ВКЛ», переключатель S1 перевести в положение «ВЫКЛ». Включить питание. Измерить и внести в третью строку табл. 5 значения токов  $I_1, I_2, I_3$  при действии другого источника ЭДС  $E_2$ . Выключить питание.

11. Рассчитать токи во всех ветвях исследуемой цепи методом наложения. Внести результат расчётов в табл. 5.

12. Провести экспериментальную проверку метода двух узлов. Установить переключатели в положение, соответствующие п. 7. По имеющимся значениям ЭДС и сопротивлений провести расчёт узлового напряжения  $U_{ab}$ , а также токи ветвей  $I_1, I_2, I_3$ . Результаты занести в табл. 6. Включить питание. Показания вольтметра  $U$  и амперметров занести в табл. 6. Выключить питание. Проверить совпадение расчётов и результатов измерений.

Таблица 6

Измерения				Вычисления			
$U_{ab}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_{ab}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
В	А			В	А		

13. Провести экспериментальную проверку метода эквивалентного генератора. Установить переключатели  $S_1...S_4$  с помощью клавиш «1», «2», «3», «4» в следующие положения:

$$S_1, S_2 - \text{«ВКЛ»}; S_3, S_4 - \text{«ВЫКЛ»}.$$

Включить питание. Измерить и записать в табл. 7 напряжение холостого хода эквивалентного генератора  $U_{xx}$ . Выключить питание. Переключатель  $S_4$  перевести в положение «ВКЛ», включить питание и измерить значение тока короткого замыкания  $I_{3кз}$ . Повторить расчёты п. 5, получив параметры эквивалентного генератора и расчётное значение тока  $I_3$ .

Таблица 7

$U_{eq}$	$R_{eq}$	$I_3$	
		Измерения	Вычисления

14. Собрать в рабочем окне программы EWB схему эквивалентного генератора согласно рис. 4. Установить значения  $U_{eq} = U_{xx}$  и  $R_{eq} = R_3$ .

Включить питание. Измерить и записать в табл. 7 величину тока ветви  $I_3$ . Выключить питание. Сравнить результат измерений с расчётным значением.

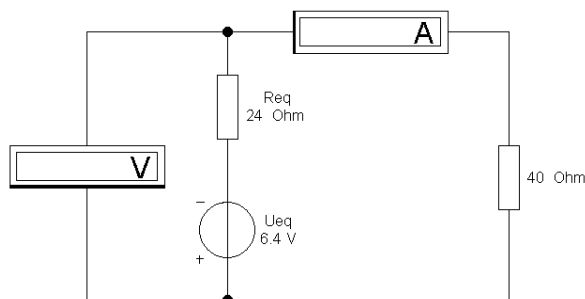


Рис. 4. Моделирование эквивалентного генератора в программе EWB  
Содержание отчёта

1. Схемы исследуемых электрических цепей.
2. Заполненные таблицы с результатами измерений.
3. Результаты расчётов.
4. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрической цепи.
  2. Дайте определения основных топологических элементов электрической цепи.
  3. Сформулируйте основные законы линейных электрических цепей постоянного тока.
  4. На каких законах основан классический метод расчёта электрических цепей?
  5. В чём заключается сущность метода наложения (суперпозиции)?
  6. В каких случаях наиболее рационален метод двух узлов?
  7. В каких случаях обосновано использование метода эквивалентного генератора?
  8. В чём заключается сущность метода контурных токов?
  9. Какие из методов не могут быть проверены экспериментально?
  10. Как строится потенциальная диаграмма контура?
  11. В чём заключается различие между источниками тока и источниками ЭДС?
- Литература: [1], с. 33 – 44, 55 – 60, 64 – 65; [2], с. 9 – 14, 103 – 116.

Лабораторная работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЁННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

*Цель работы:* Исследование физических процессов, происходящих при включении простых цепей, содержащих активное сопротивление  $R$ , ёмкость  $C$  и индуктивность  $L$  на переменное синусоидальное напряжение. Построение векторных диаграмм и треугольников сопротивлений.

*Оборудование и приборы:*

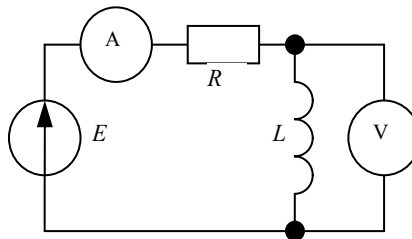
1. Источник постоянного тока.
2. Генератор НЧ ГЗ-103.
3. Миллиамперметр постоянного тока 0...200 мА.
4. Вольтметр постоянного тока 0...15 В.
5. Миллиамперметр переменного тока 0...200 мА.
6. Вольтметр переменного тока 0...15 В.
7. Осциллограф.

#### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: векторные диаграммы; резистивный, индуктивный и ёмкостный элементы в цепи переменного синусоидального тока; треугольник сопротивлений и треугольник проводимостей.

#### Порядок выполнения работы

1. Измерить сопротивление катушки индуктивности постоянному току  $r$ . Для этого собрать схему согласно рис. 1. Резистор  $R_1$  ограничивает ток в катушке до безопасного значения. Ориентировочное значение ЭДС источника  $E = 10$  В, сопротивления  $R_1 = 100$  Ом, вольтметр должен иметь высокое входное сопротивление, тогда его можно не учитывать. Измерить значения  $I_1$ ,  $U_1$ , рассчитать по закону Ома сопротивление катушки  $r = U_1/I_1$ , результаты внести в табл. 1.



**Рис. 1.** Схема цепи для измерения активного сопротивления катушки

Таблица 1

Измерения						Вычисления						
$f$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$r$	$z$	$X_L$	$X_C$	$L$	$C$
Гц	В			А			Ом				Гн	мкФ

2. Определить полное и индуктивное сопротивления катушки, а также её индуктивность  $L$ . Для этого собрать схему согласно рис. 2. В качестве источника переменной ЭДС использовать генератор НЧ, установив частоту  $f = 1$  кГц и выходное напряжение 10 В. Измерить значения  $I_2$ ,  $U_2$ , рассчитать полное сопротивление катушки  $z = U_2/I_2$ , а также индуктивное сопротивление  $X_L$  и индуктивность катушки  $L$ , используя формулы:

$$z = \sqrt{r^2 + X_L^2}; \quad X_L = \sqrt{z^2 - r^2}; \quad L = \frac{X_L}{2\pi f}.$$

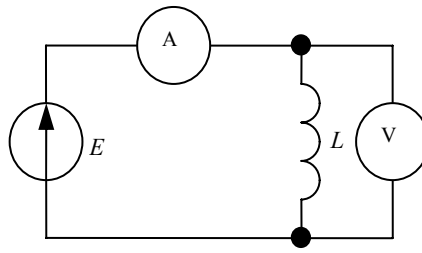


Рис. 2. Схема цепи для измерения полного сопротивления катушки

Результаты внести в табл. 1.

3. Построить векторную диаграмму тока  $I$  и напряжений  $U_2$ ,  $U_r$ ,  $U_L$  для катушки индуктивности (рис. 3), для этого вычислить угол сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi_k = \arccos \frac{r}{z}$ , а также

$$\cos \varphi_k = \frac{r}{z}; \sin \varphi_k = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k}; U_r = U_2 \cos \varphi_k; U_L = U_2 \sin \varphi_k.$$

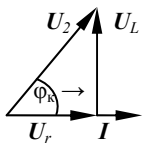


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений катушки индуктивности

4. Измерить ёмкость конденсатора. Для этого в схеме рис. 2 вместо катушки  $L$  включить конденсатор  $C$ . Измерить значения  $I_3$ ,  $U_3$ , вычислить  $X_C = U_3/I_3$ ,  $C = 1/2\pi f X_C$ , результаты внести в табл. 1.

5. Измерить угол сдвига фаз между напряжением и током в конденсаторе. Для этого собрать схему рис. 4. В качестве датчика тока  $R_T$  использовать низкоомный резистор с известным сопротивлением, например,  $R_T = 1$  Ом;  $z_x$  – исследуемый реактивный элемент (конденсатор). Параметры источника переменной ЭДС прежние.

К точке 1 цепи подключить вход канала  $A$  двухлучевого осциллографа, к точке 4 цепи – вход канала  $B$ , к точке 2 – корпус осциллографа. В качестве  $z_x$  включить исследуемый конденсатор, точки 1 и 3 замкнуть накоротко. С помощью органов управления осциллографом получить устойчивые осциллограммы напряжения на цепи

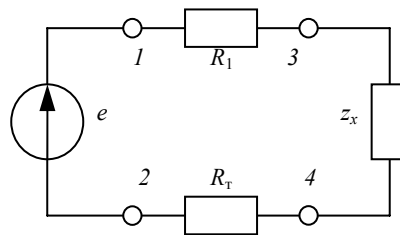


Рис. 4. Схема цепи для измерения  $\varphi$

(канал  $A$ ) и тока (канал  $B$ ). Синхронизация – по каналу  $A$ .

По осциллограммам определить период переменной ЭДС  $T$ , а также временной сдвиг между напряжением и током  $\Delta t$  с учётом знака. Вычислить угол сдвига фаз между напряжением и током по формуле:

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ \text{ или } \varphi = \frac{\Delta t}{T} 2\pi \text{ рад.}$$

Результаты внести в строку 1 табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	$T$	$\Delta t$	$\varphi$	$U_{13}$	$U_{34}$
	мс	мс	град/рад	В	В
1					
2					
3					
4					

6. Измерить угол сдвига фаз между напряжением и током в неразветвлённой  $RC$ -цепи. Для этого разомкнуть точки 1 и 3 исследуемой цепи и повторить измерения п. 5. Измерить вольтметром напряжения  $U_{13}$  между точками 1 и 3 (на резисторе  $R_1$ ) и  $U_{34}$  между точками 3 и 4 (на конденсаторе  $C$ ).

Результаты внести в строку 2 табл. 2.



7. Измерить угол сдвига фаз между напряжением и током в катушке индуктивности  $\varphi_k$  (см. рис. 4,  $z_x$  – катушка индуктивности). Повторить действия п. 5, результаты измерений внести в 3 строку табл. 2. Сравнить результат измерений с результатом расчёта в п. 3, объяснить полученные расхождения.

8. Измерить угол сдвига фаз между напряжением и током в неразветвлённой  $RL$ -цепи. Для этого повторить действия п. 6, результаты измерений внести в 4 строку табл. 2.

9. Построить векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений для цепей с элементами  $L$ ,  $C$ ,  $LC$ ,  $RC$ .

10. Выполнить эксперименты в программе EWB. Открыть файл lab2\_01.ewb. Схема цепи соответствует рис. 5. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда. Установить переключатели «R», «C», «L» в следующие положения:

«R» – «ВКЛ»; «C», «L» – «ВЫКЛ».

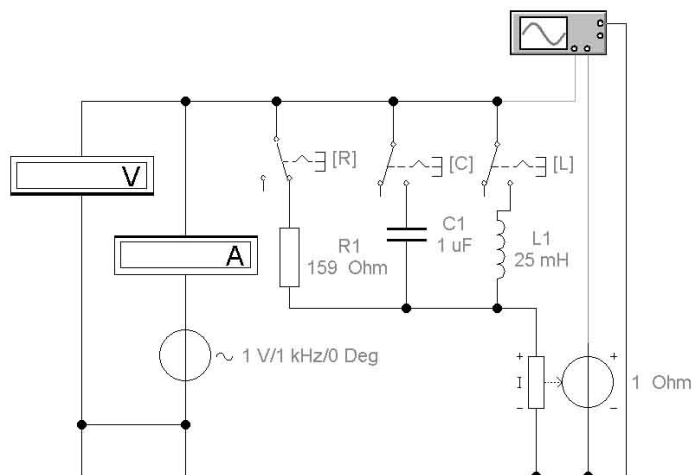


Рис. 5. Моделирование цепи с одним элементом в программе EWB

Включить питание. На экране осциллографа получить две осциллограммы, соответствующие напряжению на резисторе  $R_1$  (канал A) и сигналу датчика тока в масштабе 1 А в 1 В (канал B). Выключить питание.

По показаниям осциллографа определить период сигнала генератора  $T$ , разность фаз между напряжением и током  $\varphi$ .

Установить визир 1 в точку канала A, удобную для считывания показаний, например, в точку  $U_A = 0$  В. Установить визир 2 в точку канала B, соответствующую по фазе точке A. На панели осциллографа в крайнем правом окне снять значение величины  $T_2 - T_1$  (разность фаз между напряжением и током, выраженная в миллисекундах или микросекундах) с учётом знака.

Показания внести в табл. 3.

Таблица 3

Элемент	$T$ , мкс	$U$ , В	$I$ , мА	$T_2 - T_1$ , мкс	$\varphi$ , рад
R					
C					
L					

11. Повторить действия п. 10 при следующих положениях переключателей: «C» – «ВКЛ»; «R», «L» – «ВЫКЛ».

12. Повторить действия п. 10 при следующих положениях переключателей: «L» – «ВКЛ»; «R», «C» – «ВЫКЛ».

Построить векторные диаграммы напряжений и токов для элементов  $R$ ,  $C$ ,  $L$ .

13. Исследовать неразветвлённую цепь, содержащую элементы  $RR$ ,  $RC$ ,  $RL$ . Открыть файл lab2\_02.ewb. Схема цепи соответствует рис. 6. Установить новые значения элементов цепи, соответствующие значениям элементов цепи лабораторного стенда.

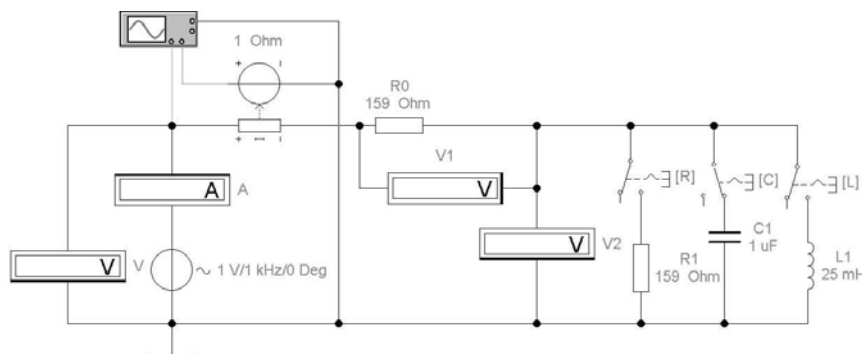


Рис. 6. Моделирование неразветвленной цепи в программе EWB

Установить переключатели «R», «C», «L» в следующие положения:

«R» – «ВКЛ.»; «C», «L» – «ВЫКЛ.».

Включить питание. Снять показания всех измерительных приборов, внести их в соответствующие ячейки табл. 4. Выключить питание.

Таблица 4

ПОЛОЖЕНИЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ «R», «C», «L»					
«R» – «ВКЛ.» «C», «L» – «ВЫКЛ.»		«C» – «ВКЛ.» «R», «L» – «ВЫКЛ.»		«L» – «ВКЛ.» «R», «C» – «ВЫКЛ.»	
$U, В$		$U, В$		$U, В$	
$U_1, В$		$U_1, В$		$U_1, В$	
$U_2, В$		$U_2, В$		$U_2, В$	
$I, А$		$I, А$		$I, А$	

14. Повторить действия п. 13 при следующих положениях переключателей: «C» – «ВКЛ.»; «R», «L» – «ВЫКЛ.».

15. Повторить действия п. 13 при следующих положениях переключателей: «L» – «ВКЛ.»; «R», «C» – «ВЫКЛ.».

Убедиться расчётным путём в том, что для цепи п. 13 выполняется равенство:  $U = U_1 + U_2$ , а для цепей пп. 14 и 15 выполняется равенство:  $U^2 = U_1^2 + U_2^2$ . Объяснить отличия в значениях напряжений на элементах и токов цепей.

16. Провести измерения угла сдвига фаз между напряжением и током в элементах цепи рис. 6 с использованием двухлучевого осциллографа. Установить переключатели «R», «C», «L» согласно п. 13. На экране осциллографа получить две осциллограммы, соответствующие напряжению на резисторе  $R_1$  (канал А) и сигналу датчика тока в масштабе 1 А в 1 В (канал В).

Показания внести в табл. 5.

17. Установить переключатели «R», «C», «L» согласно п. 14. Провести измерения величины  $T_2 - T_1$ . Показания внести в табл. 5.

18. Установить переключатели «R», «C», «L» согласно п. 15. Провести измерения величины  $T_2 - T_1$ . Показания внести в табл. 5.

Таблица 5

$f, кГц$	$T, мкс$	$T_2 - T_1$ п. 16		$T_2 - T_1$ п. 17		$T_2 - T_1$ п. 18	
		мкс	рад	мкс	рад	мкс	рад

Вычислить разность фаз между напряжением и током в радианах и заполнить соответствующие ячейки табл. 5.

19. Построить векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений для  $RR$ -,  $RC$ -, и  $RL$ -цепей, исследованных в пп. 13 – 18.

### Содержание отчёта

1. Схемы исследуемых электрических цепей.
2. Заполненные таблицы с результатами измерений.
3. Результаты расчётов.
4. Векторные диаграммы напряжений и треугольники сопротивлений.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какую величину называют индуктивным сопротивлением и в каких единицах его измеряют?
2. Какие существуют методы измерения индуктивного сопротивления?
3. Какую величину называют ёмкостным сопротивлением и в каких единицах его измеряют?
4. Какие существуют методы измерения ёмкостного сопротивления?
5. Как записываются законы Ома и Кирхгофа для цепей переменного синусоидального тока?
6. Для чего применяют векторные диаграммы?
7. Что такое треугольники напряжений, сопротивлений, мощностей?

Литература: [1], с. 33 – 44, 55 – 60, 64 – 65; [2], с. 9 – 14, 103 – 116.

Лабораторная работа 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

*Цель работы:* Изучение и экспериментальное исследование резонанса в цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

Оборудование и приборы:

1. Генератор НЧ ГЗ-103.
2. Вольтметр переменного тока 0...15 В.
3. Миллиамперметр переменного тока 0...200 мА.

### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: резонансный режим работы двухполюсника; резонанс напряжений в неразветвлённой  $RLC$ -цепи; частотные характеристики двухполюсников.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, приведённую на рис. 1. В качестве источника переменной ЭДС  $e(t)$  использовать звуковой генератор, работающий в режиме источника напряжения ( $r$  – его внутреннее сопротивление),  $L$  – катушка индуктивности,  $R$  – её омическое сопротивление,  $C$  – конденсатор.

2. Снять зависимости  $I(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$ ,  $U_C(\omega)$ , при  $U = \text{const}$ . При измерении напряжений необходимо применять вольтметр с высоким входным сопротивлением. Рекомендуется сначала определить резонансную частоту по максимуму тока, а затем сделать по 5 измерений на частотах ниже и выше резонансной. Данные внести в табл. 1.

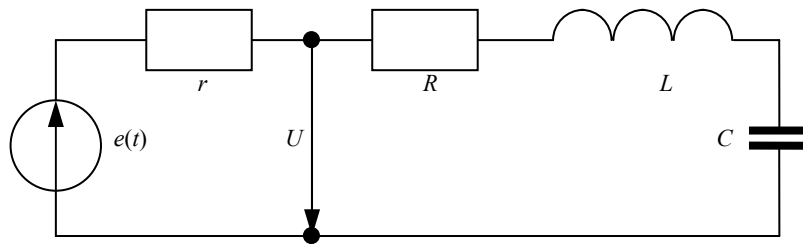


Рис. 1. Схема исследуемой цепи

Таблица 1

№ опыта	Измерения					Вычисления								
	$f, \text{Гц}$	$\omega, \text{с}$	$U_R$	$U_L$	$U_C$	$I, \text{А}$	$Z$	$X_L$	$X_C$	$R$	$L, \text{Гн}$	$C, \text{мкФ}$	$\cos\varphi$	$P, \text{Вт}$
			В				Ом							
1														
2														
...														
11														

3. Определить расчётным путём и внести в таблицу следующие величины:  $Z$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $\cos\varphi$  и  $P$ , используя формулы:  $Z = \frac{U}{I}$ ;  $R = \frac{U}{I_0}$ ;  $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ ;  $X_C = \frac{U_C}{I}$ ;  $L = \frac{X_L}{\omega}$ ;  $C = \frac{1}{\omega X_C}$ ;  $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ , где  $I_0$  – ток в цепи при резонансе.

4. Определить добротность  $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$  и волновое сопротивление  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  контура.

5. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений для трёх частот:  $f = f_0$ ;  $f = 0,8f_0$ ;  $f = 2f_0$ .

6. Построить в масштабе в одной системе координат графики:  $U_C(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$ ,  $I(\omega)$ ,  $X_C(\omega)$ ,  $X_L(\omega)$ ,  $Z(\omega)$ .

7. Запустить программу **EWB**.

8. Загрузить файл resonance\_serial.ewb. Схема цепи соответствует рис. 2. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда.

9. Установить переключатель  $S_0$  с помощью клавиши «L» в верхнее по схеме положение. Переключатели  $S_1$  и  $S_2$  с помощью клавиш «C» и «L» установить в нижнее по схеме положение.

10. Включить питание. Через промежуток времени  $t \geq 5$  с отключить питание.

11. Включить Боде-плоттер (измеритель АЧХ) в режим измерения АЧХ (**Magnitude**), установить нижнюю и верхнюю частоты анализа (Horizontal F и Horizontal I соответственно), и с помощью кнопок «←» и «→» на его панели определить частоту  $f_0$ , соответствующую резонансу напряжений и, соответственно, максимуму тока в цепи.

12. Включить Боде-плоттер в режим измерения ФЧХ (**Phase**), определить угол сдвига фаз между током и напряжением  $\alpha$  на частоте  $f_0$ , соответствующей максимуму тока в цепи. Угол сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$  имеет такую же величину, взятую с обратным знаком. Рассчитать модуль полного сопротивления цепи  $Z$  (рис. 2).

13. Внести в первую строку табл. 1 значения резонансной частоты  $f_0$  (соответствующей максимуму тока), а также величины напряжений на всей цепи  $U$ , на сопротивлении  $U_R$ , катушке индуктивности  $U_L$ , конденсаторе  $U_C$ , модуль полного сопротивления цепи  $Z$ .

14. Установить переключатели  $S_0$  и  $S_2$  в нижнее по схеме положение. Переключатель  $S_1$  установить в верхнее по схеме положение.

15. Повторить п. 10.

16. Включить Бode-плоттер в режим измерения АЧХ (**Magnitude**), с помощью кнопок «←» и «→» на его панели определить частоту  $f_C$ , соответствующую максимуму напряжения на конденсаторе.

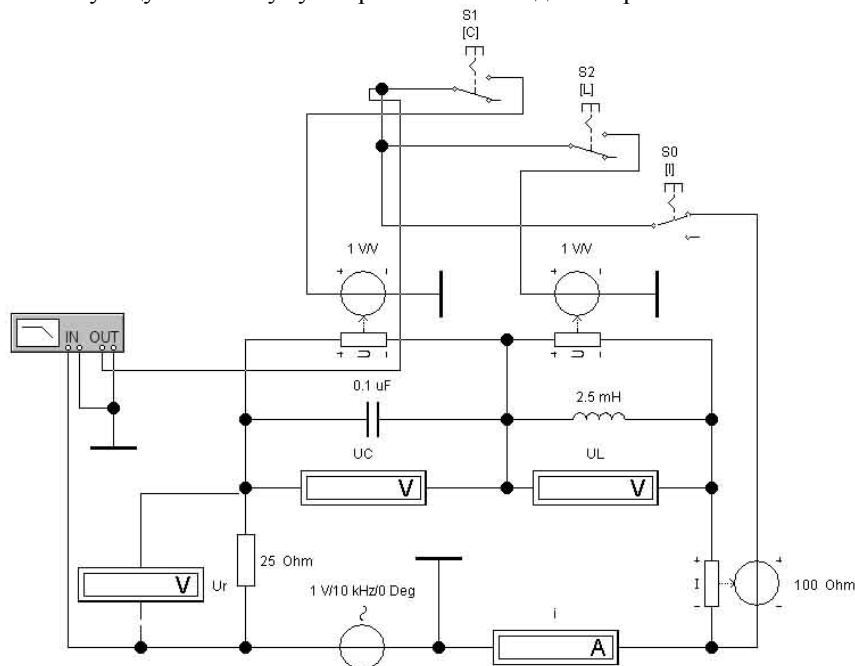


Рис. 2. Моделирование резонанса напряжений в программе EWB

17. Установить переключатели  $S_0$  и  $S_1$  в нижнее по схеме положение. Переключатель  $S_2$  установить в верхнее по схеме положение.

18. Повторить п. 10.

19. Включить Бode-плоттер в режим измерения АЧХ (**Magnitude**), с помощью кнопок «←» и «→» на его панели определить частоту  $f_L$ , соответствующую максимуму напряжения на катушке индуктивности.

20. Установить на генераторе частоту  $f_H = 0,8f_0$ , повторить пп. 10, 12. Рассчитать модуль полного сопротивления цепи  $Z$ . Внести во вторую строку табл. 2 величины напряжений на всей цепи  $U$ , сопротивлении  $U_R$ , катушке индуктивности  $U_L$ , конденсаторе  $U_C$ , модуль полного сопротивления цепи  $Z$ .

21. Установить на генераторе частоту  $f_B = 1,2f_0$ , повторить пп. 10, 12. Рассчитать модуль полного сопротивления цепи  $Z$ . Внести в третью строку табл. 2 величины напряжений на всей цепи  $U$ , сопротивлении  $U_R$ , катушке индуктивности  $U_L$ , конденсаторе  $U_C$ , модуль полного сопротивления цепи  $Z$ .

22. Построить векторные диаграммы напряжений, соответствующие пп. 13, 20, 21.

Таблица 2

№	$R$ , Ом	$L$ , Гн	$C$ , мкФ	$U$	$U_R$	$U_L$	$U_C$	$I$ , А	$f_0$	$f_L$	$f_C$	$\varphi$ , град	$Z$ , Ом
				В					Гц				
1													
2													
3													

### Содержание отчёта

1. Заполненные таблицы результатов измерений и расчётов.
2. Векторные диаграммы напряжений для следующих режимов работы цепи:  $f = f_0$ ;  $f_H = 0,8f_0$ ;  $f_B = 1,2f_0$ .

### Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется резонансный режим работы электрической цепи?
2. Какой режим работы электрической цепи называют резонансом напряжений?
3. Изменением каких параметров цепи или источника питания можно добиться резонанса напряжений?
4. Записать условие резонанса напряжений.
5. Как по величине входного тока установить, что достигнут резонанс напряжений?
6. При каком соотношении параметров цепи напряжения на реактивных элементах могут быть значительно больше входного?
7. Как определить добротность контура?
8. Как меняется знак угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$  при изменении частоты от нуля до бесконечности?
9. Объяснить ход зависимостей  $I(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$ ,  $U_C(\omega)$ ,  $Z(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$ ,  $\cos\varphi(\omega)$ .

Литература: [1], с. 108 – 116; [2], с. 93 – 101.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ

**Цель работы:** Изучение и экспериментальное исследование резонанса в цепи при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.

**Оборудование и приборы:**

1. Генератор НЧ ГЗ-103.
2. Вольтметр переменного тока 0...15 В.
3. Миллиамперметр переменного тока 0...200 мА.

### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: резонансный режим работы двухполюсника; резонанс токов в разветвлённой RLC-цепи; компенсация сдвига фаз.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь согласно схеме, приведённой на рис. 1. В качестве источника переменной ЭДС  $e(t)$  использовать звуковой генератор, работающий в режиме источника напряжения ( $r$  – его внутреннее сопротивление),  $L$  – катушка индуктивности,  $R$  – её омическое сопротивление,  $C$  – конденсатор.

2. Снять зависимости общего тока и токов через катушку индуктивности и конденсатор от частоты, питая цепь от звукового генератора, работающего в режиме источника ЭДС. Для этого необходимо установить  $r = 5$  Ом. При необходимости постоянство выходного напряжения целесообразно поддерживать с помощью регулятора уровня выхода.

При измерении напряжений необходимо применять вольтметр с высоким входным сопротивлением. Рекомендуется сначала определить резонансную частоту по максимуму тока, а затем сделать по пять измерений на частотах ниже резонансной и выше резонансной. Данные внести в табл. 1.

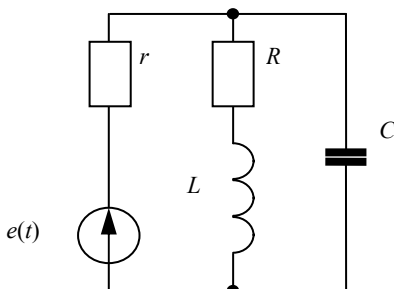


Рис. 1. Схема исследуемой цепи

Таблица 1

№ опыта	Измерения						Вычисления				
	$f$ , Гц	$\omega$ , с	$U$ , В	$I$	$I_L$	$I_C$	$Y$	$g$	$b_L$	$b_C$	$\cos\varphi$
				А			См				
1											
2											
...											
11											

3. Провести расчёт величин:

а) полной проводимости  $Y = \frac{I}{U}$ ;

б) активной проводимости  $g = \frac{I_0}{U}$ ;

в) индуктивной проводимости  $b_L = \sqrt{Y_L^2 - g^2} = \sqrt{\left(\frac{I_L}{U}\right)^2 - \left(\frac{I_0}{U}\right)^2}$ ;

г) ёмкостной проводимости  $b_C = \omega C$ ;

д) коэффициента мощности  $\cos\varphi = \frac{g}{Y}$ . Данные вычислений внести в табл. 1.

4. По данным эксперимента и вычислений построить в масштабе в одной системе координат графики:  $I(\omega)$ ,  $I_L(\omega)$ ,  $I_C(\omega)$ . В другой системе координат – в том же масштабе по частоте и строго под первой – зависимости:  $Y(\omega)$ ,  $\cos\varphi(\omega)$ .

5. Построить в масштабе векторные диаграммы для трёх случаев:

а) для частоты резонанса  $f_0$ ;

б) для частоты  $f = 0,8f_0$ ;

в) для частоты  $f = 1,2f_0$ .

6. Запустить программу **EWB**.

7. Загрузить файл `resonance_parall.ewb`. Схема цепи соответствует рис. 2. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда.

8. Установить переключатель  $S_0$  с помощью клавиши «0» в левое по схеме положение. Переключатели  $S_1$  и  $S_2$  с помощью клавиш «L» и «C» установить в правое по схеме положение.

9. Включить питание. Через промежуток времени  $t \geq 5$  с отключить питание.

10. Включить Бode-плоттер (измеритель АЧХ) в режим измерения АЧХ (**Magnitude**), установить нижнюю и верхнюю частоты анализа (Horizontal F и Horizontal I соответственно) и сравнить полученную характеристику с теоретической, с помощью кнопок «←» и «→» на его панели определить частоту  $f_0$ , соответствующую резонансу токов и, соответственно, минимуму тока в цепи.

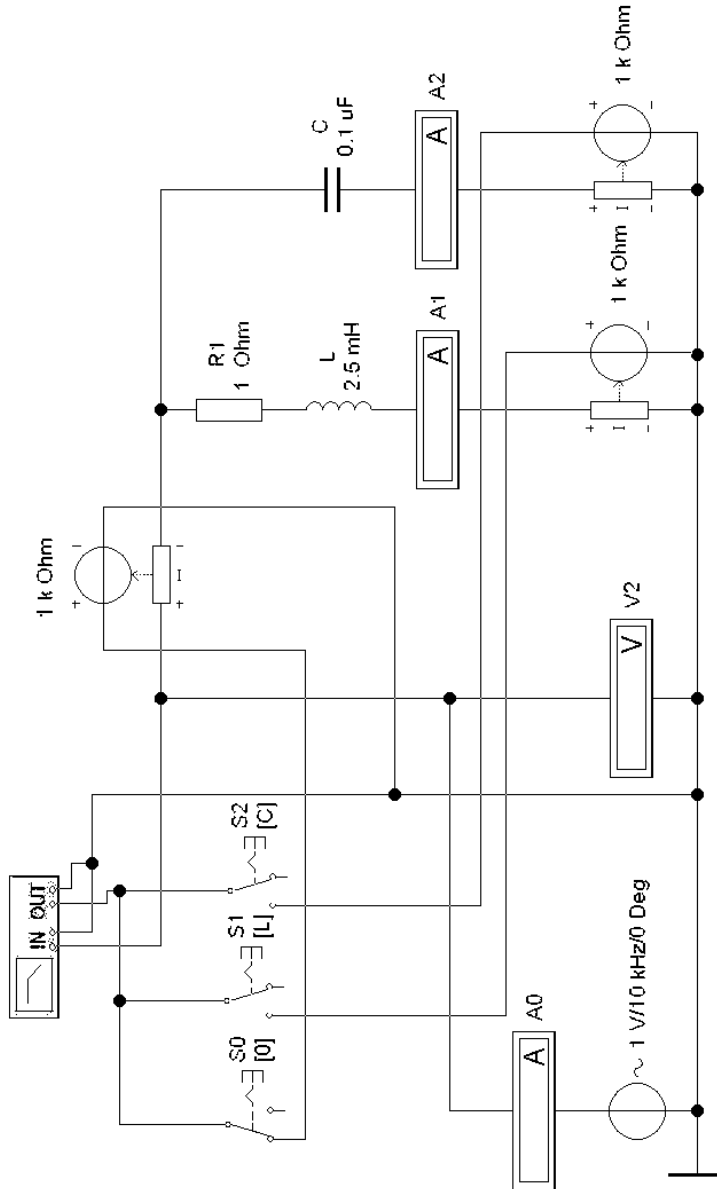


Рис. 2. Моделирование резонанса токов в программе EWB

11. Включить Бode-плоттер в режим измерения ФЧХ (**Phase**), определить угол сдвига фаз между *током* и *напряжением*  $\alpha$  на частоте  $f_0$ , соответствующей резонансу токов. Угол сдвига фаз между *напряжением* и *током*  $\varphi$  имеет такую же величину, взятую с обратным знаком. Провести также измерения на частотах  $f_H = 0,8f_0$ ;  $f_B = 1,2f_0$ .

12. Установить переключатель  $S_0$  с помощью клавиши «0» в правое по схеме положение. Переключатель  $S_1$  с помощью клавиши «L» установить в левое по схеме положение. Повторить п. 9. Включить Бode-плоттер в режим измерения АЧХ (**Magnitude**), получить зависимость  $I_L(f)$ . Сравнить её с теоретической.

13. Установить переключатель  $S_1$  с помощью клавиши «L» в правое по схеме положение, переключатель  $S_2$  с помощью клавиши «C» установить в левое по схеме положение. Повторить п. 9. Включить Бode-плоттер в режим измерения АЧХ (Magnitude), получить зависимость  $I_C(f)$ . Сравнить её с теоретической.

14. Снять показания амперметров  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ , измеряющих токи цепи  $I_0$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  на частоте  $f_0$ , установленной на источнике переменной ЭДС заранее. Внести их в табл. 2.

15. Установить частоту  $f_n = 0,8f_0$ , повторить п. 9. Снять показания приборов на частоте  $f_n$ , внести их в табл. 2.
16. Установить частоту  $f_b = 1,2f_0$ , повторить п. 9. Снять показания приборов на частоте  $f_b$ , внести их в табл. 2.
17. Провести расчёты величин  $Y, g, b_L, b_C, \cos\varphi$ , внести их в соответствующие ячейки табл. 2.
18. Построить в масштабе векторные диаграммы токов для опытов, проведённых на частотах  $f = f_0; f_n = 0,8f_0; f_b = 1,2f_0$ .

Таблица 2

	Измерения						Вычисления				
	$f,$	$\varphi,$	$U,$ В	$I$	$I_L$	$I_C$	$Y$	$g$	$b_L$	$b_C$	$\cos\varphi$
				А							
1	Гц	град									
2											
3											

#### Содержание отчёта

1. Заполненная таблица результатов измерений и расчётов.
2. Векторные диаграммы токов для следующих режимов работы цепи:  $f = f_0; f_n = 0,8f_0; f_b = 1,2f_0$ .

#### Контрольные вопросы

1. Напишите формулы для определения активной, индуктивной, ёмкостной и полной проводимостей электрической цепи.
2. Зависит ли реактивная проводимость катушки индуктивности от величины её активного сопротивления?
3. Сформулируйте условие возникновения резонанса токов в электрической цепи.
4. Чем отличается резонанс токов от резонанса напряжений?
5. Поясните способ повышения коэффициента мощности электрической цепи при параллельном включении ёмкости и потребителя с активно-индуктивной нагрузкой.
6. Поясните ход зависимостей  $I(\omega), I_L(\omega), I_C(\omega)$ .

Литература: [1], с. 108 – 110; [2], с. 93 – 101.

Лабораторная работа 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

**Цель работы:** Установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями в трёхфазной системе при соединении приёмников звездой при различной нагрузке фаз; определить влияние обрыва линейного провода и одной или двух фаз приёмника на его работу; построить векторные диаграммы напряжений и токов.

**Оборудование и приборы:**

1. Трёхфазный источник с напряжением 36 В.
2. Вольтметр переменного тока 0...50 В.
3. Амперметр переменного тока 0...0,5 А.
4. Измерительный комплект К-505.

#### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: трёхфазная система ЭДС; основные схемы соединения трёхфазных цепей; соотношения между линейными и фазовыми напряжениями и токами при соединении нагрузки звездой.

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с измерительным комплектом К-505. Для измерений в трёхпроводных цепях трёхфазного тока схема комплекта имеет искусственный нуль. Поэтому с помощью вольтметра комплекта можно измерить только фазные напряжения. Переносным вольтметром измерить линейные напряжения  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ . Со стенда снять и записать значения  $r_A, r_B, r_C, L, C$ .
2. Собрать схему, приведённую на рис. 1 для измерения токов, напряжений, мощности с помощью комплекта К-505, а также тока в нулевом проводе с помощью переносного амперметра А и напряжения смещения нейтрали нагрузки с помощью переносного вольтметра V. Показания приборов записать в первую строку табл. 1.
3. Отключить амперметр А, создав тем самым разрыв нулевого провода, и показания приборов записать во вторую строку табл. 1. Подключить амперметр А.
4. Установить несимметричную нагрузку фаз  $r_A = r_B \neq r_C$ , и показания приборов записать в третью строку табл. 1.
5. Отключить амперметр А и показания приборов записать в четвёртую строку табл. 1.
6. Провести обрыв фазы А и показания записать в пятую строку табл. 1.

7. Подключить амперметр А и оставить оборванной фазу А, произвести измерения. Показания приборов записать в шестую строку табл. 1.

8. Собрать схему для неоднородной нагрузки с нулевым проводом: фаза А – активная нагрузка, фаза В – индуктивная нагрузка, фаза С – ёмкостная нагрузка ( $Z_{AB} = r_A + jX_L$ ;  $Z_{BC} = -jX_C$ ;  $Z_{CA} = r$ ). Произвести измерения и результаты записать в седьмую строку табл. 1.

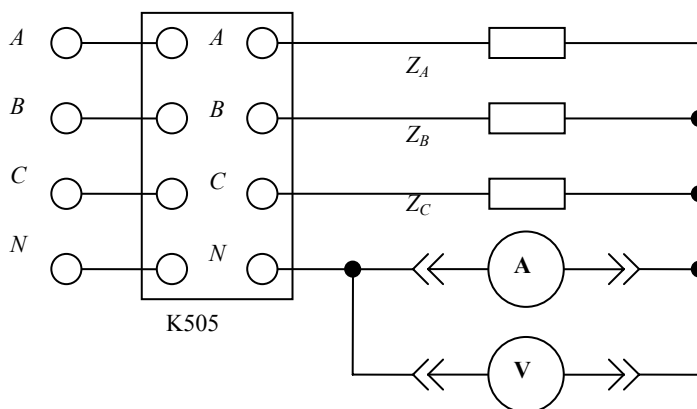


Рис. 1. Схема установки для исследования трёхфазных цепей при соединении нагрузки звездой

Таблица 1

№ опыта	Вид нагрузки	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_N$	$P_A$	$P_B$	$P_C$
		А				В				Вт		
1	$r_A = r_B = r_C$ , четырёхпроводная											
2	$r_A = r_B = r_C$ , трёхпроводная											
3	$r_A = r_B \neq r_C$ , четырёхпроводная											
4	$r_A = r_B \neq r_C$ , трёхпроводная											
5	$r_A = \infty, r_B \neq r_C$ , трёхпроводная											
6	$r_A = \infty, r_B \neq r_C$ , четырёхпроводная											
7	$r_A = r, r_B = X_L, r_C = X_C$ , четырёхпроводная											
8	$r_A = r, r_B = X_L, r_C = X_C$ , трёхпроводная											

9. Собрать схему для неоднородной нагрузки без нулевого провода, для этого в предыдущей схеме отключить переносной амперметр А. Произвести измерения и результаты записать в восьмую строку табл. 1.

10. По данным опыта 7 определить углы сдвига между током и напряжением в каждой фазе  $\varphi = \arctg \frac{P}{I_\phi U_\phi}$ .

11. По данным всех опытов построить векторные диаграммы.

12. Запустить программу **EWB**.

13. Загрузить файл star\_01.ewb для исследования трёхфазной цепи при соединении приёмников звездой. Схема цепи соответствует рис. 2. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда. Значения активной мощности в ваттах соответствуют показаниям приборов  $P_A, P_B, P_C$  в вольтах.

14. Исследование цепи при симметричной нагрузке с нулевым проводом. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:  $S_1, S_2$  – «ВКЛ».

15. Включить питание. Через промежуток времени  $t \geq 5$  с отключить питание. Снять показания приборов.

16. Заполнить первую строку табл. 2.

17. Исследование цепи при симметричной нагрузке без нулевого провода. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:  $S_1$  – «ВКЛ»;  $S_2$  – «ОТКЛ».

Повторить действия п. 15, заполнить вторую строку табл. 2.



Таблица 2

№ опыта	Вид нагрузки	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_N$	$P_A$	$P_B$	$P_C$
		А				В				Вт		
1	$r_A = r_B = r_C$ , четырёхпроводная											
2	$r_A = r_B = r_C$ , трёхпроводная											
3	$r_A = r_B \neq r_C$ , четырёхпроводная											
4	$r_A = r_B \neq r_C$ , трёхпроводная											
5	$r_A = \infty, r_B \neq r_C$ , трёхпроводная											
6	$r_A = \infty, r_B \neq r_C$ , четырёхпроводная											
7	$r_A = r, r_B = X_L, r_C = X_C$ , четырёхпроводная											
8	$r_A = r, r_B = X_L, r_C = X_C$ , трёхпроводная											

18. Исследование цепи при несимметричной нагрузке с нулевым проводом. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:  $S_1, S_2$  – «ВКЛ».

Увеличить значения сопротивления  $RA$  в два раза. Повторить действия п. 15, заполнить третью строку табл. 2.

19. Исследование цепи при несимметричной нагрузке без нулевого провода. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:

$$S_1 - \text{«ВКЛ»}; S_2 - \text{«ОТКЛ»}.$$

Повторить действия п. 15, заполнить четвёртую строку табл. 2.

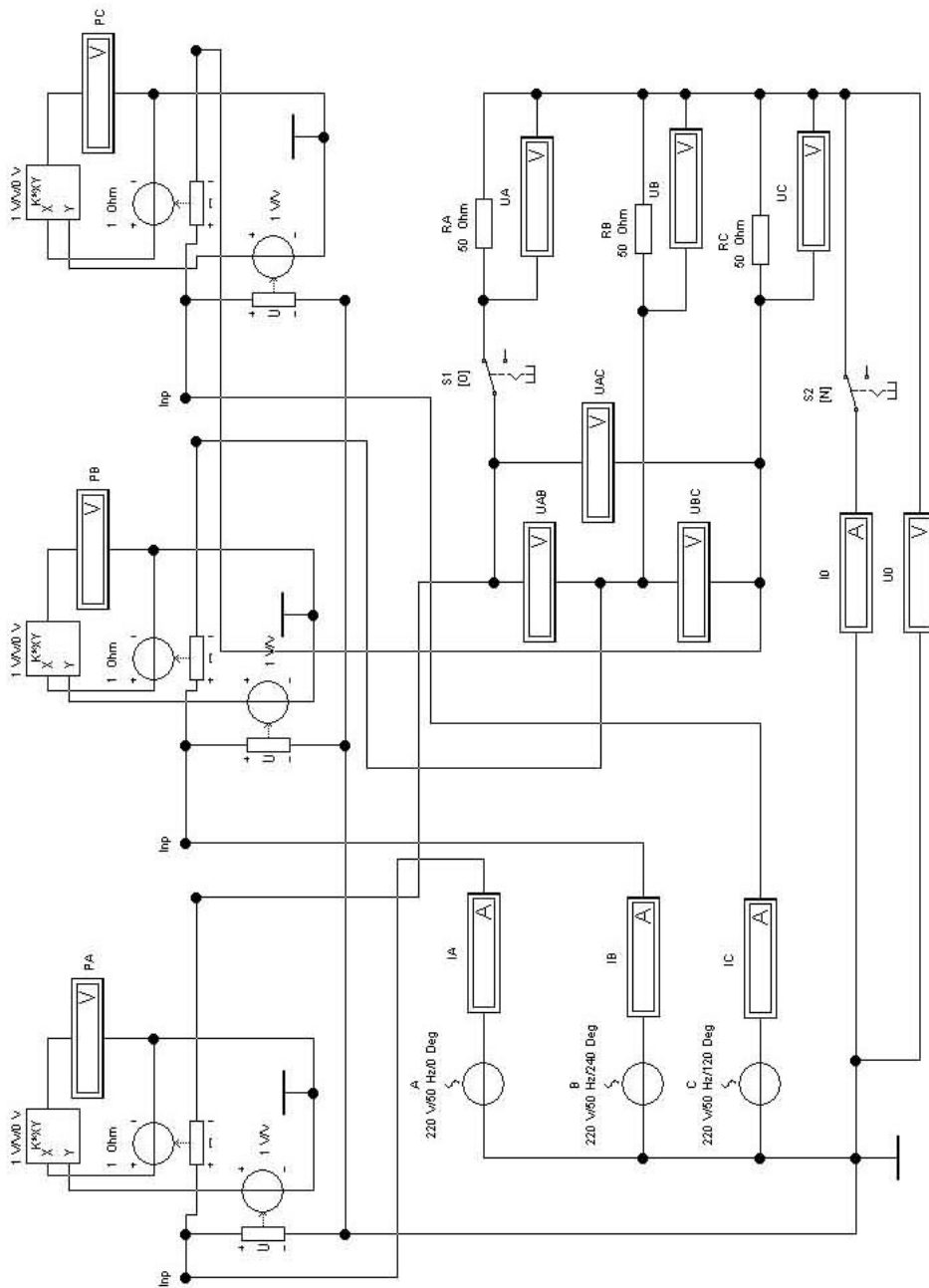


Рис. 2. Схема цепи для исследования трехфазных цепей при соединении нагрузки звездой (моделирование в программе EWB)

20. Исследование цепи при обрыве линейного провода с нулевым проводом. Восстановить исходное значение  $RA$ . Переключатели должны быть установлены в следующие положения:

$$S_2 - \text{«ВКЛ»}; S_1 - \text{«ОТКЛ»}.$$

Повторить действия п. 15, заполнить пятую строку табл. 2.

21. Исследование цепи при обрыве линейного провода без нулевого провода. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:

$$S_1, S_2 - \text{«ОТКЛ»}.$$

Повторить действия п. 15, заполнить шестую строку табл. 2.

22. Исследование цепи при неоднородной нагрузке с нулевым проводом: фаза  $A$  – активная нагрузка, фаза  $B$  – индуктивная нагрузка, фаза  $C$  – ёмкостная нагрузка. Заменить элемент  $RB$  на катушку индуктивности, а элемент  $RC$  – на

конденсатор. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:

$$S_1, S_2 - \text{«ВКЛ»}.$$

Произвести измерения и результаты записать в седьмую строку табл. 2.

23. Исследование цепи при неоднородной нагрузке без нулевого провода: фаза  $A$  – активная нагрузка, фаза  $B$  – индуктивная нагрузка, фаза  $C$  – ёмкостная нагрузка. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:

$$S_1 - \text{«ВКЛ»}; S_2 - \text{«ОТКЛ»}.$$

Произвести измерения и результаты записать в восьмую строку табл. 2.

24. По данным опыта 7 определить углы сдвига между током и напряжением в каждой фазе  $\varphi = \arctg \frac{P}{I_\phi U_\phi}$ .

25. Построить векторные диаграммы для опытов 1 – 8 табл. 2.

### Содержание отчёта

1. Заполненная таблица результатов измерений.
2. Рассчитанные значения угла сдвига фаз между напряжением и током.
3. Векторные диаграммы напряжений и токов.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение трёхфазной симметричной системы ЭДС.
2. Перечислите способы соединения нагрузки в трёхфазных цепях.
3. Объясните назначение нейтрального провода.
4. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении нагрузки звездой?
5. Укажите способы включения ваттметров для измерения активной мощности в четырёхпроводных и трёхпроводных трёхфазных цепях.

Литература: [1], с. 184 – 189, 191 – 195; [2], с. 123 – 131, 137 – 143.

Лабораторная работа 6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЁМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

**Цель работы:** Установить соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приёмников треугольником при различной нагрузке фаз; определить влияние обрыва линейного провода и фазы нагрузки на работу цепи; построить векторные диаграммы напряжений и токов.

**Оборудование и приборы:**

1. Трёхфазный источник с напряжением 36 В.
2. Вольтметр переменного тока 0...50 В.
3. Амперметр переменного тока 0...1 А.
4. Измерительный комплект К-505.

### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: трёхфазная система ЭДС; основные схемы соединения трёхфазных цепей; соотношения между линейными и фазовыми напряжениями и токами при соединении нагрузки треугольником.

### Порядок выполнения работы

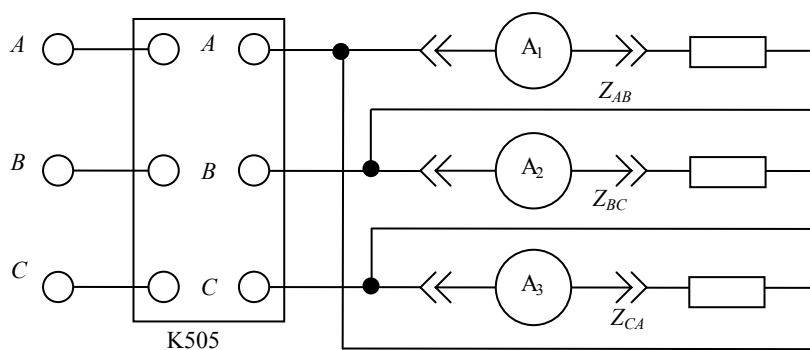


Рис. 1. Схема установки для исследования трёхфазных цепей при соединении нагрузки треугольником

1. Собрать установку для измерения токов и напряжений для случая симметричной нагрузки согласно схеме рис. 1. Установить одинаковые сопротивления в каждой фазе:  $r_{AB} = r_{BC} = r_{CA}$ . Для измерения линейных токов использовать прибор К-505. Фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$  измерить тремя переносными амперметрами  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  или одним, поочередно включая его в цепь каждой фазы треугольника. Фазные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  измерить переносным вольтметром. Со стенда снять и записать значения  $r_A$ ,  $r_B$ ,  $r_C$ ,  $L$ ,  $C$ . Показания приборов записать в первую строку табл. 1.

№ п/п	Нагрузка	Измерения, А						Вычисления, Вт		
		$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_{AB}$	$P_{BC}$	$P_{CA}$
1	$r_{AB} = r_{BC} = r_{CA}$									
2	$r_{AB} = r_{BC} \neq r_{CA}$									
3	$r_{AB} = r_{BC}$ , обрыв линейного провода $A$									
4	$r_{AB} = \infty$ , $r_{BC} \neq r_{CA}$									
5	$Z_{AB} = r_A + jX_L$ , $Z_{BC} = -jX_C$ , $Z_{CA} = r$									

2. Установить неодинаковые сопротивления двух фаз:  $r_{AB} = r_{BC} \neq r_{CA}$ . Показания приборов записать во вторую строку табл. 1.

3. Произвести обрыв линейного провода  $A$ . Показания приборов записать в третью строку табл. 1.

4. Подключить провод  $A$ , нагрузку  $r_{AB}$  отключить, результаты измерений записать в четвертую строку табл. 1.

5. Собрать схему для неоднородной нагрузки  $Z_{AB} = r_A + jX_L$ ;  $Z_{BC} = -jX_C$ ;  $Z_{CA} = r$ . Произвести измерение токов и напряжений. Результаты измерений записать в пятую строку табл. 1.

6. По данным опыта 5 определить параметры нагрузки по формулам:

$$Z_{AB} = \frac{U_{\Delta}}{I_{AB}}; X_{AB} = \sqrt{Z_{AB}^2 - r_{AB}^2}; X_{BC} = \frac{U_{\Delta}}{I_{BC}}; \cos \varphi_{AB} = \frac{r_{AB}}{Z_{AB}};$$

$$\cos \varphi_{BC} = 0; \cos \varphi_{CA} = 1.$$

7. По данным опытов 1 – 5 определить мощности фаз и всей цепи по формулам:

$$P_{AB} = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \cos \varphi_{AB}; P_{BC} = U_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \cos \varphi_{BC}; P_{CA} = U_{CA} \cdot I_{CA} \cdot \cos \varphi_{CA};$$

$$\sum P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}.$$

8. По данным опытов 1 – 5 построить векторные диаграммы.

9. Запустить программу **EWB**.

10. Загрузить файл triangle\_1.ewb для исследования трёхфазной цепи при соединении приёмников треугольником.

Схема цепи соответствует рис. 2. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда.

11. Исследование цепи при симметричной нагрузке. Переключатели должны быть установлены в следующие положения:

$$S_A, S_{AB} - \text{«ВКЛ»}.$$

12. Включить питание. Через промежуток времени  $t \geq 5$  с отключить питание. Снять показания приборов.

13. Заполнить первую строку табл. 2.

14. Исследование цепи при несимметричной нагрузке. Увеличить значения сопротивления  $R_{AB}$  в два раза. Повторить действия п. 12, заполнить вторую строку табл. 2. Восстановить исходные значения  $R_{AB}$ .

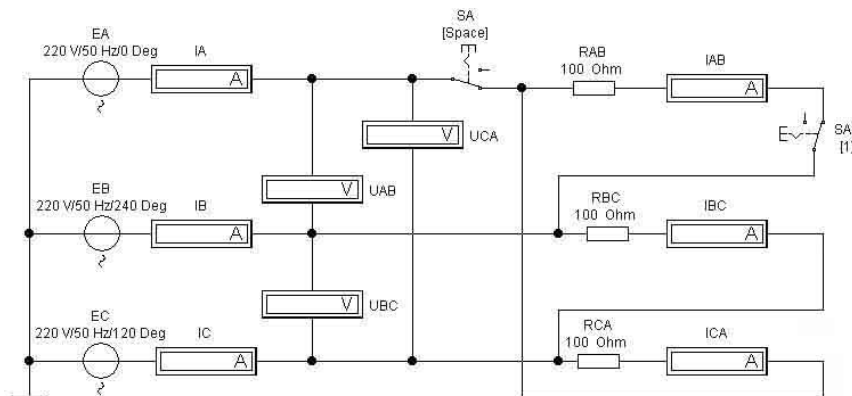


Рис. 2. Схема цепи для исследования трёхфазных цепей при соединении нагрузки треугольником (моделирование в программе EWB)

№ п/п	Нагрузка	Измерения, А						Вычисления, Вт		
		$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_{AB}$	$P_{BC}$	$P_{CA}$
1	$r_{AB} = r_{BC} = r_{CA}$									
2	$r_{AB} = r_{BC} \neq r_{CA}$									
3	$r_{AB} = r_{BC}$ , обрыв линейного провода $A$									
4	$r_{AB} = \infty$ , $r_{BC} \neq r_{CA}$									
5	$Z_{AB} = r_A + jX_L$ , $Z_{BC} = -jX_C$ , $Z_{CA} = r$									

15. Исследование цепи при обрыве линейного провода  $A$ .

Создать обрыв линейного провода  $A$ , установив переключатель  $S_A$  в положение «ВЫКЛ» с помощью клавиши «ПРОБЕЛ». Повторить действия п. 12, заполнить третью строку табл. 2. Восстановить исходное положение переключателя  $S_A$  с помощью клавиши «ПРОБЕЛ».

16. Исследование цепи при обрыве одной фазы нагрузки  $AB$ .

Установить переключатель  $S_{AB}$  в положение «ВЫКЛ» с помощью клавиши 1. Повторить действия п. 12, заполнить четвёртую строку табл. 2.

17. Исследование цепи при неоднородной нагрузке. Собрать схему для неоднородной нагрузки:  $Z_{AB} = r_A + jX_L$ ;  $Z_{BC} = -jX_C$ ;  $Z_{CA} = r$ . Значения индуктивности  $L$  и ёмкости  $C$  установить согласно п. 5. Повторить действия п. 12, заполнить пятую строку табл. 1.

18. Вычислить параметры нагрузки и значения коэффициента мощности для каждой из фаз нагрузки по формулам п. 6.

19. Вычислить значения активной мощности для каждой из фаз нагрузки и всей цепи по формулам п. 7.

20. Построить векторные диаграммы для каждого из опытов.

### Содержание отчёта

1. Заполненная таблица результатов измерений.
2. Рассчитанные значения коэффициента мощности и активной мощности в фазах нагрузки  $AB$ ,  $BC$  и  $CA$ .
3. Векторные диаграммы напряжений и токов.

### Контрольные вопросы

1. Начертите схему соединения приёмников в треугольник, указав положительные направления линейных и фазных токов.
2. Каковы соотношения между значениями линейных и фазных токов при симметричной нагрузке?
3. Начертите векторную диаграмму напряжений и токов для симметричной нагрузки, соединённой в треугольник.
4. Как изменятся ток и мощность, если включенные по схеме «звезда» одинаковые нагрузки переключить на схему «треугольник» (линейные напряжения в обоих случаях одинаковы)?
5. Как рассчитать мощность приёмника при несимметричной нагрузке?
6. Как рассчитать мощность приёмника при симметричной нагрузке?
7. Доказать, что при помощи двух однофазных ваттметров можно измерить мощность всей трёхфазной цепи.

Л и т е р а т у р а : [1], с. 184 – 195; [2], с. 123 – 127, 132 – 135, 137 – 143.

Лабораторная работа 7

## ИЗУЧЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Цель работы:* Изучение методики снятия вольтамперных характеристик элементов электрических цепей постоянного тока с различными видами нелинейности; экспериментальная проверка графо-аналитического метода расчёта нелинейных цепей постоянного тока.

*Оборудование и приборы:*

4. Варистор 22 В.
5. Лампа накаливания 220 В, 100 Вт.
6. Стабилитрон типа Д815 А.
7. Источник постоянной ЭДС 0...10 В.
8. Источник переменной ЭДС 0...15 В.

9. Амперметр постоянного тока 0,2 А.
10. Вольтметр постоянного тока 10 В.
11. Реостат 50 Ом.
12. Осциллограф.

### Пояснения к выполнению работы

Изучить раздел учебника «Нелинейные электрические цепи постоянного тока».

#### Порядок выполнения работы

1. Сборка основной цепи согласно рис. 1 производится на лабораторном стенде. В качестве нелинейного элемента используется варистор. У некоторых типов нелинейных элементов ветви ВАХ могут быть настолько крутыми, что задавать разумные значения приращения напряжения и измерять соответствующие им приращения тока оказывается невозможным. Поэтому для всех трёх типов нелинейных элементов следует задавать значения тока от 0 до 150 мА через 10 мА и измерять соответствующие значения напряжения. Результаты измерений занести в табл. 1.

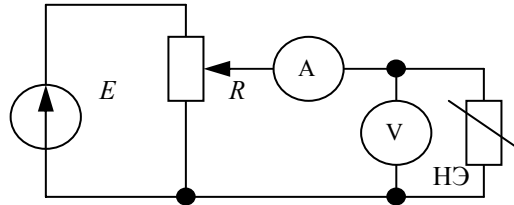


Рис. 1. Схема исследуемой цепи

2. Повторить п. 1 с использованием в качестве НЭ лампы накаливания.
3. Повторить п. 1 с использованием в качестве НЭ стабилитрона, включив его в прямом направлении.
4. Повторить п. 1 с использованием в качестве НЭ стабилитрона, включив его в обратном направлении.
5. Взять в качестве НЭ лампу накаливания и включить параллельно с ней резистор из состава стенда с сопротивлением, близким к 150 Ом. Провести измерения тока в неразветвлённой части цепи при напряжениях на параллельном участке, взятых из столбца  $U_2$  (для лампы накаливания). Результаты измерений занести в табл. 1 (столбец  $HL||R$ ).
6. Взять в качестве НЭ лампу накаливания и включить последовательно с ней резистор из состава стенда с сопротивлением, близким к 60 Ом. Провести измерения суммарного напряжения на лампе и резисторе при значениях тока, взятых из столбца  $I$ . Результаты измерений занести в табл. 1 (столбец  $HL \rightarrow R$ ).
7. Построить ВАХ варистора, лампы накаливания и стабилитрона, выбрав соответствующие масштабы на осях координат. Для варистора и лампы накаливания построить обратные ветви ВАХ по значениям  $U_1$  и  $U_2$  в третьей координатной четверти аналогично их прямым ветвям. Для стабилитрона использовать значения  $U_{пр}$  и  $U_{обр}$ , взятые из соответствующих столбцов табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	$I$ , мА	Варистор	Лампа	Стабилитрон		$HL  R$	$HL \rightarrow R$
		$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_{пр}$ , В	$U_{обр}$ , В	$I_0$	$U_0$
1	10						
2	20						
3	30						
4	40						
5	50						
6	60						
7	70						
8	80						
9	90						
10	100						
11	110						
12	120						
13	130						
14	140						
15	150						

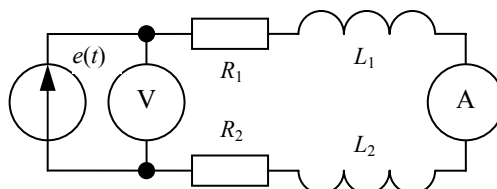
8. Построить в одной системе координат ВАХ лампы накаливания с подключенными резисторами (столбцы  $HL||R$  и  $HL \rightarrow R$ ). Провести соответствующие расчёты для 1, 4, 8 и 12-й точек ВАХ (соответствующие строки табл. 1). Проверить соответствие экспериментальных и расчётных значений. Объяснить причину расхождения.



	Ом			В	А	Ом		Гн
1								
2								

2. Собрать цепь согласно рис. 1. Установить напряжение на выходе генератора НЧ в пределах 5...10 В при частоте 1 кГц.

3. Измерить напряжение и ток при первом варианте включения катушек, записать измеренные величины для первого опыта. Поменять местами выводы катушки  $L_2$  (правой в схеме рис. 1), провести измерения и записать данные для второго опыта. При отсутствии маркировки одноименных выводов обмоток согласному включению соответствует меньшее значение тока в катушках.



**Рис. 1. Схема цепи для измерения коэффициента взаимной индукции первым способом**

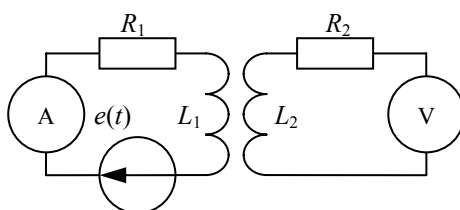
4. Провести расчёты  $Z$ ,  $X$ ,  $L$  для частоты, на которой проводились измерения. Вычислить коэффициент взаимной индукции по первому способу по формуле:

$$M = (L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}})/4.$$

5. Построить в одинаковом масштабе векторные диаграммы для согласного и встречного включения катушек.

6. Собрать цепь согласно схеме рис. 2 для измерения коэффициента взаимной индукции по второму способу. Провести измерения  $I_1$ ,  $U_2$ . Вычислить коэффициент взаимной индукции по второму способу по формуле:

$$M = U_2/(\omega I_1).$$



**Рис. 2. Схема цепи для измерения коэффициента взаимной индукции вторым способом**

7. Сравнить значения коэффициента взаимной индукции, измеренные по первому и второму способам. Провести анализ полученных результатов.

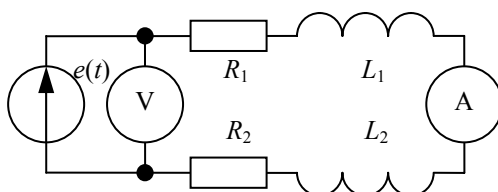
8. Вычислить значение коэффициента связи по формуле:

$$K = M/(L_1 L_2)^{1/2}.$$

Значение  $M$  взять из результатов первого способа.

### Содержание отчёта

1. Схемы исследуемых электрических цепей.
2. Заполненная таблица с результатами измерений.
3. Результаты расчётов, векторные диаграммы.
4. Выводы.



**Рис. 1. Схема цепи для измерения коэффициента взаимной индукции первым способом.**



## Контрольные вопросы

1. Сформулировать закон электромагнитной индукции.
2. Как с помощью амперметра, вольтметра, омметра определить параметры катушки  $R, Z, X_L, L$ ?
3. Какое включение катушек индуктивности называется согласным?
4. Какое включение катушек индуктивности называется встречным?
5. Как по результатам опытов для последовательного соединения индуктивно связанных катушек при неизменном напряжении определить характер их включения (согласное или встречное)?
6. Как определить характер их включения при неизменном во всех опытах токе?
7. Какие зажимы катушек называются одноимёнными?
8. Как их определить экспериментально?
9. Как опытным путём определить взаимную индуктивность?

Литература: [1], с. 119 – 125.

Лабораторная работа 9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКОВ

*Цель работы:* Экспериментальное определение коэффициентов системы уравнений пассивного четырёхполюсника в  $A$ -форме и его характеристических параметров.

*Оборудование и приборы:*

1. Генератор НЧ.
2. Миллиамперметр переменного тока 0,2 А.
3. Вольтметр переменного тока 10 В.
4. Осциллограф.

### Пояснения к выполнению работы

Изучить разделы учебника: различные формы записи уравнений четырёхполюсника; определение коэффициентов  $A$ -формы записи уравнений четырёхполюсника; постоянная передачи и единицы измерения затухания.

Коэффициенты системы уравнений четырёхполюсника и его характеристические параметры связаны с параметрами элементов, из которых составлен четырёхполюсник, и могут быть рассчитаны по их значениям, а также определены экспериментально.

Для экспериментального определения характеристического сопротивления симметричного четырёхполюсника  $Z_c$  и постоянной передачи  $\Gamma$ , а также коэффициентов  $A$ -формы необходимо найти его входное сопротивление в предельных режимах, т.е. в режимах холостого хода  $Z_x$  и короткого замыкания  $Z_k$ .  $A$ -параметры симметричного четырёхполюсника

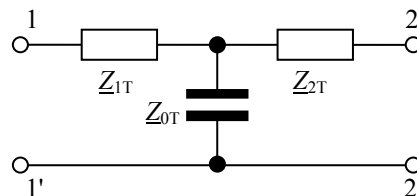
$$\underline{A} = \underline{D} = \sqrt{\frac{Z_x}{Z_x - Z_k}}; \underline{B} = \underline{A} Z_k; \underline{C} = \frac{\underline{A}}{Z_x}.$$

Характеристическое сопротивление

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_k} = \sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}}.$$

Постоянная передачи  $\Gamma = \ln[\underline{A} + (\underline{BC})^{1/2}]$

*Пример расчёта.* Симметричный Т-образный четырёхполюсник (рис. 1) составлен из следующих элементов:  $Z_{1T} = Z_{2T} = Z_T = 10$  Ом;  $Z_{0T} = -j10$  Ом. Определить коэффициенты  $A$ -формы и характеристические параметры.



**Рис. 1. Схема симметричного Т-образного четырёхполюсника**

Коэффициенты  $A$ -формы могут быть найдены из следующих выражений:

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + (Z_{1T} / Z_{0T}) = 1 + (10 / -j10) = 1 + j = 1,41e^{j45^\circ};$$

$$\underline{B} = Z_{1T} + Z_{2T} + (Z_{1T}Z_{2T} / Z_{0T}) = 10 + 10 + (100 / -j10) = (20 + j10) \text{ Ом};$$

$$\underline{C} = 1/Z_{0T} = (1 / -j10) = j0,1 \text{ См.}$$

Характеристическое сопротивление симметричного четырёхполюсника

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}} = \sqrt{\frac{20 + j10}{j0,1}} = 14,95e^{-j31,75^\circ} = (12,75 - j7,87) \text{ Ом.}$$

Постоянная передачи

$$\underline{\Gamma} = \ln(\underline{A} + \sqrt{\underline{BC}}) = \ln[1 + j + \sqrt{(20 + j10)j0,1}] = \ln 2,9e^{j51,75^\circ} = \ln 2,9e^{j0,9};$$

$$a = \ln 2,9 = 1,06 \text{ Нп; } b = 0,9 \text{ рад} = 51,75^\circ.$$

При расчётах по приведённым формулам постоянную ослабления выражают в неперах (Нп), а постоянную фазы – в радианах (рад). Измерительную аппаратуру градуируют в децибелах и градусах, причём 1 Нп = 8,68 дБ; 1 дБ = 0,115 Нп; 1 рад = 57,3°; 1° = 0,017452 рад.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь согласно рис. 2. В качестве  $Z_{1T}$ ,  $Z_{2T}$  и  $Z_{0T}$  взять резисторы и конденсатор из состава стенда, удовлетворяющие условию  $Z_{1T} \approx Z_{2T} \approx Z_{0T}$  на частоте 1 кГц. Нагрузку  $Z_C$  не подключать. В качестве датчиков тока  $R_d$  использовать низкоомные резисторы сопротивлением 0,5...1,0 Ом (знать точное значение не обязательно). Провести расчёты коэффициентов  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$ , а также параметров  $\underline{Z}_c$ ,  $a$  и  $b$  по значениям элементов на частоте 1 кГц. Установить выходное напряжение генератора в пределах 5...10 В, в дальнейшем поддерживать его постоянным.

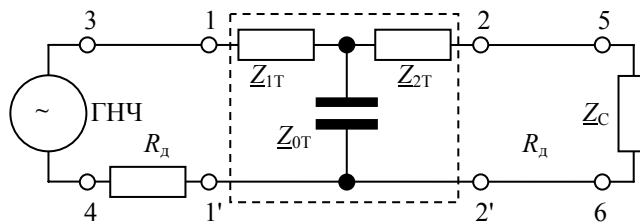


Рис. 2. Схема установки для исследования симметричного T-образного четырёхполюсника

2. Вместо перемычки 3–1 включить миллиамперметр, к зажимам 1–1' четырёхполюсника подключить вольтметр, к точке 1 подключить вход канала  $A$ , к точке 4 подключить вход канала  $B$  двухканального осциллографа. Провести измерения напряжения  $U_{1x}$  и тока  $I_{1x}$  на входе четырёхполюсника, а также временной сдвиг между напряжением и током  $\Delta t_{1x}$  в режиме холостого хода. Внести данные в табл. 1.

3. Замкнуть коротко зажимы 2–2' четырёхполюсника, повторить действия п. 2, измерив и записав в табл. 1 напряжение  $U_{1k}$  и ток  $I_{1k}$  на входе четырёхполюсника, а также временной сдвиг между напряжением и током  $\Delta t_{1k}$  в режиме короткого замыкания.

4. Рассчитать  $\varphi_x$ ,  $\varphi_k$ ,  $\underline{Z}_x$  и  $\underline{Z}_k$  по формулам:

$$\varphi = (2\pi \cdot \Delta t) / T \text{ рад или } \varphi = (360 \cdot \Delta t) / T \text{ град; } T = 1/f, Z = U/I; \underline{Z} = Ze^{j\varphi}.$$

Таблица 1

Режим	Измерения			Вычисления	
	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$\Delta t_1$ , мс	$\varphi_1$ , град	$\underline{Z}$ , Ом
Х.Х.					
К.З.					

Внести данные в табл. 1.

5. По известным значениям  $R$ ,  $C$ ,  $f$  вычислить величины  $\underline{Z}_T = \underline{Z}_{1T} = \underline{Z}_{2T}$  и  $\underline{Z}_{0T}$ , а также коэффициенты  $\underline{A} = \underline{D}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ , характеристическое сопротивление  $\underline{Z}_c = R_C + jX_C$ , постоянную передачи  $\underline{\Gamma}$ , постоянную ослабления  $a$  и постоянную фазы  $b$  по формулам, приведённым ранее. Внести данные в табл. 2.

Таблица 2

$\underline{Z}_T$	$\underline{Z}_{0T}$	$\underline{A}$	$\underline{B}$	$\underline{C}$	$\underline{Z}_c$	$R_C$	$X_C$	$\underline{\Gamma}$	$a$	$b$		
Ом		–	Ом	См		Ом			Нп	дБ	рад	°

6. Разомкнуть перемычку 2–5, на её место включить второй миллиамперметр. Подключить к клеммам 5, 6 нагрузку  $\underline{Z}_C = R_C + jX_C$ , составленную из резисторов и конденсаторов стенда. К зажимам 2–2' подключить второй вольтметр. К точке 1 подключить вход канала  $A$ , к точке 2 подключить вход канала  $B$  осциллографа. Провести измерения  $U_{1c}$ ,  $U_{2c}$ ,  $I_{1c}$ ,  $I_{2c}$ ,  $\Delta t_{12c}$  (напряжения и токи на входе и выходе четырёхполюсника, а также временной сдвиг между входным  $U_{1c}$  и выходным  $U_{2c}$  напряжениями при согласованной нагрузке  $\underline{Z}_H = \underline{Z}_C$ ). Внести данные в табл. 3.

Измерения					Вычисления		
$U_{1C}$	$U_{2C}$	$I_{1C}$	$I_{2C}$	$\Delta t_{12C}$	$\ln(U_{1C}/U_{2C})$	$\ln(I_{1C}/I_{2C})$	$\varphi_{12}$
Ом		мА		мс	–	–	град

7. Вычислить величины  $\ln(U_{1C}/U_{2C})$ ,  $\ln(I_{1C}/I_{2C})$ ,  $\varphi_{12}$ . Сравнить эти значения с полученными ранее значениями *a* и *b*. Объяснить различие результатов.

8. Выполнить эксперименты в программе EWB. Открыть файл lab\_4pol.ewb. Схема цепи соответствует рис. 3. Установить значения элементов цепи лабораторного стенда  $Z_{1T}$ ,  $Z_{2T}$ ,  $Z_{0T}$ .

9. Переключатель S1 установить в положение «ВЫКЛ.» с помощью клавиши «ПРОБЕЛ». Включить питание. Провести измерения в режиме холостого хода: напряжения  $U_{1x}$  и тока  $I_{1x}$  на входе четырёхполюсника, а также временной сдвиг между напряжением и током  $\Delta t_{1x}$  с помощью осциллографа, а также угол  $\varphi$  между напряжением  $U_{1x}$  и током  $I_{1x}$  с помощью Бод-плоттера в режиме фазометра. Внести данные в табл. 4.

10. Переключатель S1 установить в положение «ВКЛ.» с помощью клавиши «ПРОБЕЛ». Повторить действия п. 9 для режима короткого замыкания на выходе.

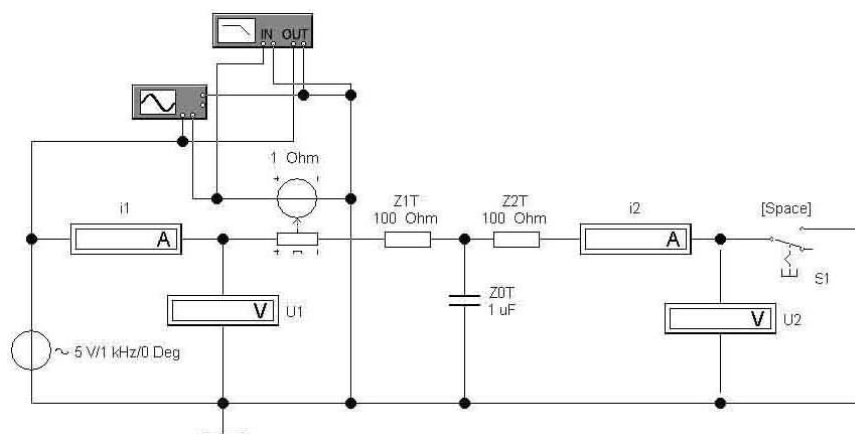


Рис. 3. Исследование четырёхполюсника (моделирование в программе EWB)

Режим	Измерения				Вычисления	
	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$\Delta t_1$ , мс	$\varphi_1$ , град	$\varphi_1$ , град	$Z_c$ , Ом
Х.Х.						
К.З.						

11. Переключатель S1 установить в положение «ВЫКЛ.» с помощью клавиши «ПРОБЕЛ». Подключить параллельно вольтметру  $U_2$  согласованную нагрузку  $Z_c = R_c + jX_c$ , составленную по данным табл. 2. Включить питание.

Провести измерения  $U_{1C}$ ,  $U_{2C}$ ,  $I_{1C}$ ,  $I_{2C}$ ,  $\Delta t_{12C}$  и  $\varphi_{1C}$  (напряжения и токи на входе и выходе четырёхполюсника, а также временной и угловой сдвиг между входным  $U_{1C}$  и выходным  $U_{2C}$  напряжениями при согласованной нагрузке  $Z_n = Z_c$ ). Внести данные в табл. 5.

12. Вычислить величины  $\ln(U_{1C}/U_{2C})$ ,  $\ln(I_{1C}/I_{2C})$ ,  $\varphi_{12}$ . Сравнить эти значения с полученными ранее значениями *a* и *b*. Объяснить различие результатов.

Измерения						Вычисления		
$U_{1C}$	$U_{2C}$	$I_{1C}$	$I_{2C}$	$\Delta t_{12C}$	$\varphi_{1C}$	$\ln(U_{1C}/U_{2C})$	$\ln(I_{1C}/I_{2C})$	$\varphi_{12}$

Содержание отчёта

1. Схемы исследуемых электрических цепей.
2. Заполненные таблицы с результатами измерений.
3. Результаты расчётов.
4. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какими величинами характеризуется четырёхполюсник?
  2. Какие существуют формы записи уравнений четырёхполюсника?
  3. Каков физический смысл параметров  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$   $A$ -формы записи четырёхполюсника?
  4. Каким образом можно рассчитать параметры четырёхполюсника по опытам холостого хода и короткого замыкания?
  5. Какую величину называют характеристическим сопротивлением четырёхполюсника?
  6. Какую величину называют постоянной передачи четырёхполюсника?
  7. В чём заключается физический смысл постоянной ослабления и постоянной фазы?
- Литература: [1], с. 135 – 147.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л.А. Бессонов. – 10-е изд. – М. : Гардарики, 2002. – 638 с.
2. Иванов, И.И. Электротехника : учебник / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во «Лань», 2003. – 496 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
3. Чернышов, Н.Г. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench : учеб.-метод. пособие / Н.Г. Чернышов, Т.И. Чернышова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 52 с.