

Министерство образования Российской Федерации  
Московский государственный институт электронной  
техники  
(технический университет)

---

**М.Ф. Лисова, А.В. Горбач, Ю.И. Волков,  
В.И. Самохин**

**Сборник лабораторных работ  
по теории электрических цепей**

Утверждено редакционно-издательским советом института  
в качестве методических указаний

Москва 2003

УДК 621 372 (076.5)

Рецензент канд. техн. наук, доц. *П.В. Зубарев*

**Лисова М.Ф., Горбач А.В., Волков Ю.И., Самохин В.И.**  
Сборник лабораторных работ по теории электрических цепей. - М.: МИЭТ, 2003. - 36 с.: ил.

Сборник лабораторных работ предназначен для использования при подготовке и проведению лабораторных работ по дисциплинам «Электротехника и основы электроники» и «Теория электрических цепей» для студентов всех специальностей дневного и вечернего факультетов.

В сборник включены семь лабораторных работ по теории электрических цепей с методическими рекомендациями по их выполнению. С помощью системы схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» все лабораторные работы могут быть исследованы в виртуальной среде и выполнены на реальных лабораторных стендах.

ã МИЭТ, 2003

# Лабораторная работа № 1

## Исследование электрической цепи постоянного тока

**Цель работы:** экспериментальная проверка законов и принципов теории электрических цепей.

**Оборудование, используемое при выполнении работы:**

- персональный компьютер с программой «Electronics Workbench»;
- лабораторный стенд;
- вольтметр;
- магазин сопротивлений.

### Исследуемая схема

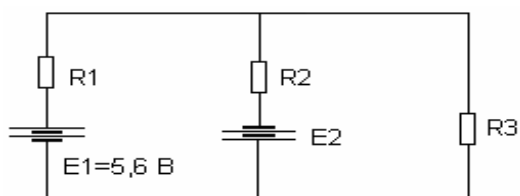


Рис.1.

Исходные данные исследуемых схем (варианты заданий) приведены в табл.1.

Варианты индивидуальных заданий выдаются преподавателем.

Таблица 1

Номер варианта	$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$R3$ , Ом	$E2$ , В
1	110	110	75	10

2	110	110	75	12
3	110	110	200	10
4	110	110	110	12
5	200	200	75	10
6	200	200	75	12

**Окончание**

Номер варианта	$R1, \text{ Ом}$	$R2, \text{ Ом}$	$R3, \text{ Ом}$	$E2, \text{ В}$
7	200	200	200	10
8	100	200	200	12
9	200	110	75	10
10	200	110	75	12
11	200	110	200	10
12	200	110	200	12

**Теоретические сведения к расчетному заданию  
с методическими указаниями**

1. Рассчитать ток в первой ветви схемы (рис.1) методом наложения. В соответствии с принципом суперпозиции ток  $I_1$  определяется как алгебраическая сумма токов  $I_1^{(E1)}$  и  $I_1^{(E2)}$ , вызываемых в первой ветви каждой из ЭДС в отдельности (рис.2):  $I_1 = I_1^{(E1)} + I_1^{(E2)}$ .

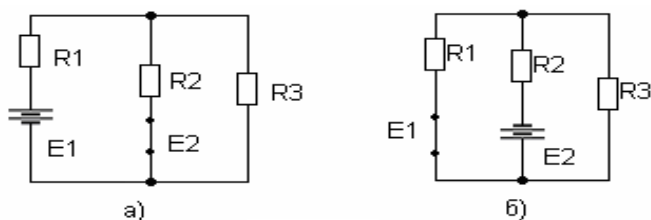


Рис.2.

2. Рассчитать ток во второй ветви  $I_2$  схемы (рис.1) методом эквивалентного генератора напряжения (ЭГН).

В исходной схеме (рис.1) размыкается вторая ветвь (рис.3,а), а часть цепи, подключенной к этой ветви, заменяется эквивалентным генератором с ЭДС  $E_{\Gamma}$  и внутренним сопротивлением  $R_{\Gamma}$  (рис.3,б). Ток  $I_2$  рассчитывается по закону Ома:  $I_2 = (E_{\Gamma} + E_2)/(R_{\Gamma} + R_2)$ .

ЭДС генератора определяется как напряжение на зажимах (а-в) при разомкнутой второй ветви (напряжение холостого хода  $U_{XX}$ ) (рис.4,а), а  $R_{\Gamma}$  - как входное сопротивление пассивной цепи относительно зажимов (а-в) (рис.4,б).

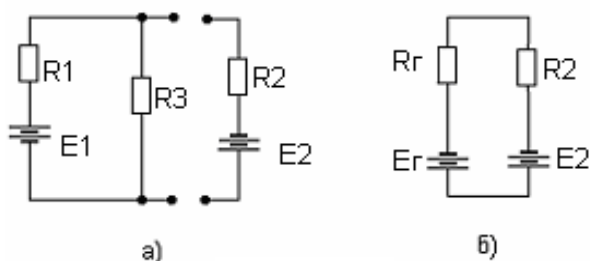


Рис.3.

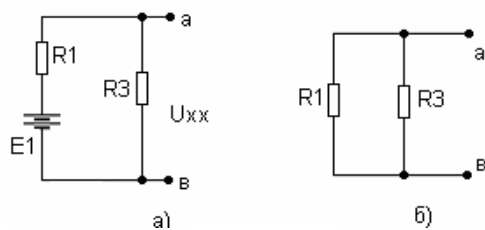


Рис.4

3. Рассчитать ток в третьей ветви  $I_3$  схемы (рис.1), используя принцип взаимности в сочетании методом наложения.

Аналитическое выражение для расчета тока  $I_3$  получается на основании принципов взаимности и суперпозиции с учетом коэффициентов пропорциональности:

$$I_3 = -I_1^{(E_\Phi)}(E_1 / E_\Phi) + I_2^{(E_\Phi)}(E_2 / E_\Phi).$$
 Токи  $I_1^{(E_\Phi)}$  и  $I_2^{(E_\Phi)}$  определяются в расчетной схеме (рис.5), полученной из исходной (рис.1), путем закорачивания источников  $E_1$  и  $E_2$  и введения в третью ветвь фиктивного источника  $E_\Phi$  произвольной величины.

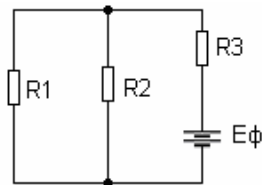


Рис.5.

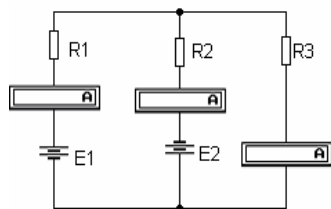
4. Проверить расчеты по законам Кирхгофа.

5. Проверить выполнение баланса мощности. Мощность, развиваемая источниками, должна быть равна мощности, расходуемой в нагрузке.

6. Проверить результаты расчетов на персональном компьютере с помощью системы схемотехнического

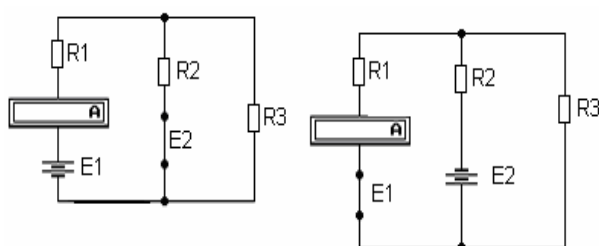
моделирования «Electronics Workbench». Проверку выполнить по схемам, приведенным на рис.6 - 8. При этом должны быть установлены сопротивления амперметров (А) не более 1 Ом, сопротивления вольтметров не менее 1 МОм, режимы измерения - «DC».

***Исходная схема***



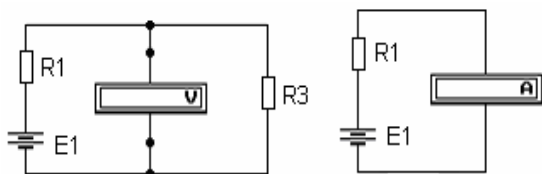
*Рис.6*

***Схемы по методу наложения***



*Рис.7.*

***Схемы по методу эквивалентного генератора***



*Рис.8.*

7. Произвести на компьютере моделирование зависимости  $U_{R2} = f(R2)$  по схеме, приведенной на рис.9 и построить графическую зависимость  $P(R2)$ . Определить условие получения максимальной мощности на  $R2$ .

**Схема моделирования зависимости  $U_{R2}(R2)$**

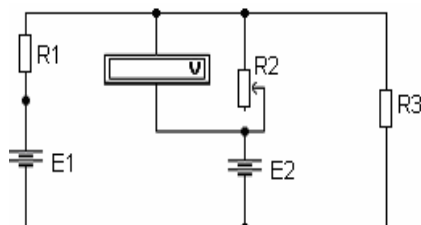


Рис.9.

8. Произвести измерения и построить потенциальные диаграммы для контуров  $E1 R1 R2 E2$ ,  $E1 R1 R3$ ,  $E2 R2 R3$ . Для построения потенциальных диаграмм необходимо выбрать направление обхода контура, выбрать точку начала обхода с потенциалом равным нулю и измерить потенциалы (напряжения) в других точках по направлению обхода (рис.10). На графиках потенциальных диаграмм по оси абсцисс откладываются величины сопротивлений отдельных участков цепи, образующих контурное сопротивление, а по оси ординат - значения потенциалов в соответствующих точках.



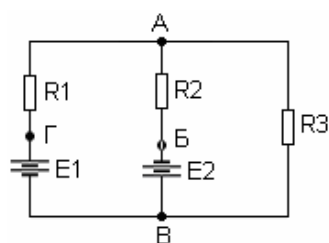


Рис.10.

Результаты расчетов занести в формы табл.2 и 3, в графу расчет.

### **Лабораторное задание и методика выполнения задания на лабораторном стенде**

Установить соответствие «рабочего места» варианту задания и схеме измерения (рис.9).

При проведении экспериментов фиксировать полярность напряжений.

Результаты измерений и дополнительных расчетов заносить по ходу эксперимента в формы табл.2 и 3 в графу «эксперимент».

1. Экспериментальная проверка законов Кирхгофа.

Измерить напряжения источников  $E1$ ,  $E2$  и напряжения на резисторах  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ . Проверить выполнение законов Кирхгофа.

2. Экспериментальная проверка обобщенного закона Ома.

В схеме (рис.10) измерить потенциал (напряжение) точки «В» относительно точки «А» и рассчитать токи ветвей  $I1$ ,  $I2$ ,  $I3$ , используя обобщенный закон Ома.

3. Экспериментальная проверка напряжения «холостого хода» по методу эквивалентного генератора напряжения для ветви, содержащей резистор  $R2$ .

Выполняется по схеме рис.9. Установить на «магазине сопротивлений» максимальную величину сопротивления (не менее 10 кОм) и измерить напряжение  $U_{XX}$  между точками А - В (рис.10).

Экспериментальная проверка зависимости мощности на резисторе  $R_2$  («магазин сопротивлений») от величины этого сопротивления выполняется по схеме рис.9. Установить сопротивление  $R_2$  равное сопротивлению  $R_r$  (см. расчет тока  $I_2$  по методу эквивалентного генератора) и измерить напряжение на нем. Установить несколько других соизмеримых значений сопротивления  $R_2$  и измерить напряжения на них. Рассчитать мощности, выделяемые на выбранных сопротивлениях  $R_2$ . Построить графическую зависимость  $P = f(R_2)$  и определить условие получения максимальной мощности.

4. Экспериментальная проверка потенциальных диаграмм выполняется по схеме рис.10. Например, принимается потенциал точки «А» = 0 и измеряются напряжения в точках «Б, В, Г» относительно точки «А». Результаты измерений наносятся на потенциальные диаграммы, полученные расчётным путем.

5. Сравнить результаты расчета и эксперимента. Оценить и объяснить расхождения.

**Форма табл.2**

Данные	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$U_{R1}$ , В	$U_{R2}$ , В	$U_{R3}$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$P_E$ , Вт	$P_R$ , Вт
Расчет										
Экспери- мент										

**Форма табл.3**

Параметр	Значение параметра $R_2$ , Ом						
$R_2$ , Ом	10						200
$U_{R2}$ , В							
$P_{R2}$ , Вт							

**Контрольные вопросы**

1. Понятие электрической цепи. Составные части электрической цепи. Отличие электрической цепи от электрической схемы.
2. Элементы электрической цепи и компонентные уравнения.
3. Сформулировать законы Кирхгофа, принципы суперпозиции и взаимности.
4. Преобразовать источник напряжения в источник тока.
5. Записать закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.
6. Что такое делители напряжения и тока? Примеры расчета.
7. Понятия резистивного, индуктивного и емкостного элементов.
8. Вывести условие передачи максимальной мощности от генератора нагрузке. Выразить  $P_{\max}$  через параметры  $E_G$  и  $R_G$ .

9. Пояснить принцип построения потенциальной диаграммы.
10. Привести пример преобразования соединений «треугольником» в «звезду» и наоборот.
11. Как выбрать оптимальный метод составления систем уравнений для расчета цепи?

## Лабораторная работа № 2

### Исследование электрической цепи синусоидального тока

**Цель работы:** экспериментальное определение амплитудно-фазовых соотношений в цепи синусоидального тока.

**Оборудование, используемое в работе:**

- персональный компьютер с программой «Electronics Workbench»;
- лабораторный стенд;
- генератор напряжения синусоидальной формы;
- вольтметр;
- фазометр (осциллограф).

#### Исследуемая схема и исходные данные

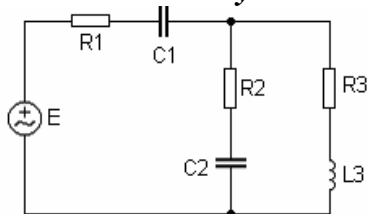


Рис. 1.

$E = 10 \text{ В}$   
 $C2 = 1 \text{ мкФ}$

Исходные данные исследуемых схем (варианты заданий) приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

Номер варианта	$R1$ , Ом	$C1$ , мкФ	$R2$ , Ом	$R3$ , Ом	$L3$ , мГ	$R_{L3}$ , Ом	$f_1$ , Гц	$f_2$ , Гц
-------------------	--------------	---------------	--------------	--------------	--------------	------------------	---------------	---------------

1	180	2	75	75	10	12	500	1000
2	220	2	120	130	20	18	300	600
3	330	1	180	75	40	30	400	800
4	300	1	75	110	25	20	500	1000
5	330	2	110	82	100	70	200	400
6	330	2	110	110	50	30	300	600

**Окончание**

Номер варианта	$R1$ , Ом	$C1$ , мкФ	$R2$ , Ом	$R3$ , Ом	$L3$ , мГ	$R_{L3}$ , Ом	$f_1$ , Гц	$f_2$ , Гц
7	360	1	180	130	60	50	400	800
8	220	1	110	75	55	40	400	800
9	360	1	110	82	40	30	400	800
10	270	1	180	110	50	35	500	1000
11	220	1	110	75	25	20	400	800
12	180	2	75	75	10	10	400	800
13	220	2	120	130	20	20	400	800
14	330	1	180	75	40	30	500	1000
15	300	1	75	110	25	20	400	800

**Теоретические сведения к расчетному заданию**

1. Рассчитать электрическую цепь (рис.1), определив последовательно:

а) комплексные сопротивления ветвей  $Z_1, Z_2, Z_3$ :

$$Z_K = R_K + jX_K = (R_K^2 + X_K^2)^{-1/2} \exp(j \arctg X_K / R_K);$$

б) комплексное входное сопротивление  $Z$ :

$$Z = Z_1 + (Z_2 Z_3) / (Z_2 + Z_3);$$

в) комплексные и мгновенные значения токов в ветвях  $I_K, i_K(t)$ ;

г) комплексные и мгновенные значения напряжений на ветвях и элементах  $U_K, u_K(t)$ .

Комплексные значения сопротивлений, токов и напряжений привести в показательной и алгебраической формах. Действующие значения токов и напряжений, а также их начальные фазы занести в форму табл.2, в графу «расчет».

2. Рассчитать мощности источника ( $E$ ) и нагрузки ( $Z$ ) и проверить выполнение баланса активной, реактивной и полной мощностей:

$$(P_E + jQ_E) = (P_Z + jQ_Z).$$

3. Заменить нагрузку ( $Z$ ) эквивалентным двухполюсником с эквивалентными параметрами  $R_{\Sigma}$ ,  $C_{\Sigma}$  или  $L_{\Sigma}$ .

4. Проверить результаты расчетов на персональном компьютере с помощью системы схемотехнического моделирования «Electronics Workbench». Измерение модулей действующих значений токов и напряжений выполнить по схеме, приведенной на рис.2. При этом напряжение генератора должно быть  $E = 10$  В с начальной фазой  $F = 0$ , сопротивления амперметров должно быть не более 1 Ом, вольтметров не менее 1 мОм в режиме измерения «АС». Исходные данные должны соответствовать вариантам заданий.

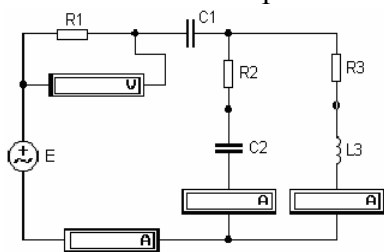


Рис.2.

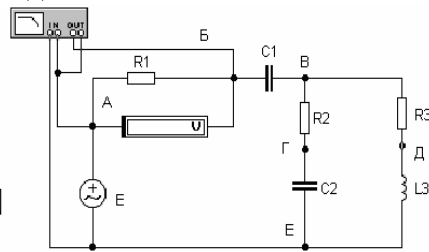


Рис.3.

5. По схеме рис.3 измерить действующие значения напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{AC}$ ,  $U_{AD}$ ,  $U_{AE}$  и их начальные фазы

$F_{AB}, F_{AB}, F_{AG}, F_{AD}, F_{AE}$ . Результаты занести в форму табл.3, в графу «расчет». По результатам измерений на компьютере построить векторную диаграмму напряжений. Используя законы Кирхгофа достроить эту диаграмму до векторной топографической диаграммы. Полученные из векторной топографической диаграммы значения напряжений и начальных фаз должны совпадать с результатами расчетов, занесенные в форму табл.2.

### **Лабораторное задание и методика выполнения работы на лабораторном стенде**

1. Убедиться в соответствии состава рабочего места схеме рис.3.  
Значения элементов схемы, величина напряжения и частота генератора (E) должны соответствовать варианту задания.
2. Измерить напряжения на элементах электрической схемы, определить токи ветвей и занести результаты в форму табл.2.
3. Измерить напряжения в точках электрической схемы (Б, В, Г, Д, Е) относительно точки (А). Измерить фазометром (или осциллографом по указанию преподавателя) начальные фазы напряжений в точках (Б, В, Г, Д, Е) относительно точки (А). Результаты измерений занести в форму табл.3 в графу «эксперимент».
4. По результатам измерений построить векторную и топографические диаграммы. Полученные значения напряжений и фаз сравнить с результатами расчетов.
5. Используя результаты эксперимента, рассчитать полную, активную и реактивную мощности. Проверить выполнение баланса мощностей.



**Форма табл.2**

Данные	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$F$ , град	$U_{R1}$ , В	$U_{C1}$ , В	$U_{R2}$ , В	$U_{C2}$ , В	$U_{R3}$ , В	$U_{L3}$ , В
Расчет										
Экспе- римент										

**Форма табл.3**

Данные	$U_{AB}$ , В	$F_{AB}$ , град	$U_{AB}$ , В	$F_{AB}$ , град	$U_{AG}$ , В	$F_{AG}$ , град	$U_{AD}$ , В	$F_{AD}$ , град	$U_{AE}$ , В	$F_{AE}$ , град
Расчет										
Экспе- римент										

**Контрольные вопросы**

1. Какими основными соотношениями определяются напряжения и токи в последовательных  $RL$  и  $RC$  цепях и как эти напряжения и токи могут быть представлены на векторной диаграмме?
2. Как для последовательных  $RL$  и  $RC$  цепей строятся треугольники сопротивлений, проводимостей и мощностей?
3. Как в разветвленных  $RL$  и  $RC$  цепях определяются напряжения и токи и как строятся векторные диаграмма для таких цепей ?
4. Что такое фазовый сдвиг тока и напряжения?
5. Какие виды мощности присущи электрической цепи, содержащей  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементы? Что они характеризуют? В каких единицах измеряются?
6. Что такое векторная и топографическая диаграммы?
7. В чем заключаются преимущества расчета электрической цепи в комплексных числах?

## Лабораторная работа № 3

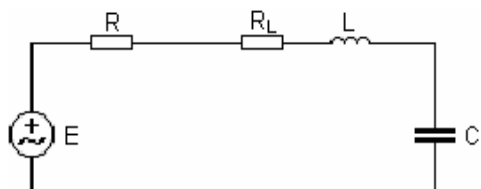
### Резонанс напряжений в последовательной RLC цепи

**Цель работы:** экспериментальное исследование частотных свойств последовательной RLC цепи.

**Оборудование, используемое в работе:**

- персональный компьютер с программой «Electronics Workbench»;
- RLC устройство;
- генератор напряжения синусоидальной формы;
- вольтметр;
- фазометр.

#### Исследуемая схема и исходные данные



$$E(t) = E_m \sin \omega t$$

$$E = 5 \dots 15 \text{ В}$$

$$R = 390 \text{ Ом}$$

Рис.1.

Исходные данные (рис.1) по вариантам заданий приведены в табл.1.

**Таблица 1**

Номер варианта	$L$ , мГ	$R_L$ , Ом	$C$ , мкФ
1	11	12	0,013
2	53	31	0,013
3	39	32	0,013
4	23	18	0,0075
5	48	30	0,015
6	43	33	0,013
7	62	35	0,013

**Окончание**

Номер варианта	$L$ , мГ	$R_L$ , Ом	$C$ , мкФ
8	50	32	0,012
9	45	29	0,013
10	53	70	0,013
11	7	10	0,013

**Сведения к расчетному заданию**

1. Рассчитать и построить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ)  $I(F)$ ,  $U_R(F)$ ,  $U_C(F)$ ,  $U_L(F)$  и фазочастотную характеристику (ФЧХ):

- рассчитать резонансную частоту ( $F_0$ ); частоту ( $F_L$ ), на которой напряжение  $U_L$  достигает максимума; частоту ( $F_C$ ), на которой напряжение  $U_C$  достигает максимума;
- привести расчетные формулы для вычисления действующих значений тока ( $I$ ), напряжений ( $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$ ) и угла сдвига фаз между током и напряжением, приложенным к цепи;

- задав не менее девяти значений частоты (включая  $F_O$ ,  $F_L$ ,  $F_C$ ) в диапазоне от 1 до 30 кГц, рассчитать значения сопротивлений ( $X_L$ ,  $X_C$ ,  $X$ ,  $Z$ ), тока ( $I$ ), напряжений ( $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$ ) и сдвига фаз между током и напряжением генератора. Результаты расчетов занести в форму табл.2. По результатам расчетов построить АЧХ и ФЧХ.

**Форма табл.2**

Параметр	Значение параметра на частоте $F$ , кГц							
$F$ , кГц	1	$F_C =$			$F_O =$			$F_L =$ 30
$X_L$ , Ом								
$X_C$ , Ом								
$X$ , Ом								
$Z$ , Ом								
$I$ , А								
$U_R$ , В								
$U_L$ , В								
$U_C$ , В								
Угол, град.								

2. Рассчитать волновое сопротивление и добротность резонансного контура.
3. Построить векторную диаграмму тока и напряжений при резонансе.
4. Проверить результаты расчетов на персональном компьютере с помощью системы схемотехнического моделирования «Electronics Workbench». Проверку выполнить по схеме рис.2:
  - ввести в виртуальную схему значения элементов варианта задания;

- установить «активный режим» и произвести измерения АЧХ и ФЧХ.

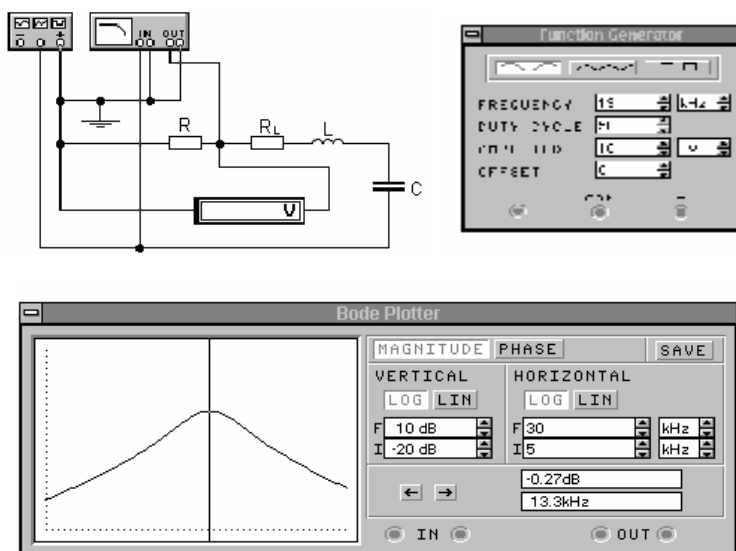


Рис.2.

Сравнить результаты измерений на компьютере с графическими построениями расчетного задания.

5. Произвести моделирование (изменение) величин  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и исследовать характер изменения добротности и значений резонансных частот.

### Лабораторное задание и методика выполнения работы на лабораторном стенде

Проверить соответствие состава рабочего места компьютерной схеме и варианту задания. Снять экспериментально АЧХ и ФЧХ. Результаты измерений по

ходу выполнения задания наносить на расчетные графические построения АЧХ и ФЧХ (форма табл.2). Сравнить результаты расчетов и измерений.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое резонанс напряжений? В какой цепи он наблюдается?
2. Какой вид имеет векторная диаграмма токов и напряжений при резонансе?
3. Что такое основная резонансная частота и частные резонансные частоты и на каких элементах они имеют место?
4. Что такое волновое сопротивление и добротность резонансного контура? Какими соотношениями они выражаются?
5. Как изменится вид АЧХ тока при изменении активного сопротивления?
6. Что нужно сделать, чтобы изменить полосу пропускания контура?
7. По каким показаниям вольтметра и фазометра определяется состояние резонанса? Какое из этих измерений является более точным и почему?

## Лабораторная работа № 4

### Определение постоянных коэффициентов

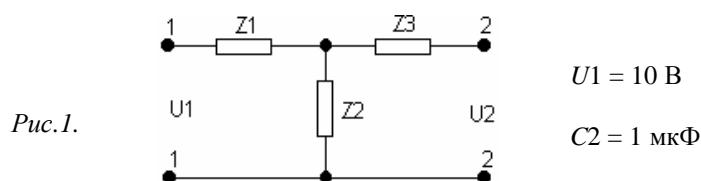
#### четырехполюсника

**Цель работы:** изучение методов определения коэффициентов уравнений четырехполюсника.

**Оборудование, используемое в работе:**

- персональный компьютер с программами «Electronics Workbench» и «Analysis Center»;
- генератор напряжения синусоидальной формы;
- вольтметр;
- фазометр.

#### Исследуемая схема и исходные данные



Недостающие исходные данные приведены в таблице вариантов заданий (табл.1). В схеме рис.1:  $Z1 = R1 - jX_{C1}$ ,  $Z2 = R2 - jX_{C2}$ ,  $Z3 = R3$ .

Таблица 1

№	$F1, \text{Гц}$	$F2, \text{Гц}$	$R1, \text{Ом}$	$C1, \text{мкФ}$	$R2, \text{Ом}$	$R3, \text{Ом}$
1	500	1000	180	2	75	75

2	300	600	220	2	120	130
3	400	800	330	1	180	75
4	500	1000	300	1	75	110
5	200	1000	330	2	110	82
6	300	600	330	2	110	110
7	400	800	360	1	180	130
8	400	800	220	1	110	75

**Окончание**

№	$F1, \Gamma_{\text{ц}}$	$F2, \Gamma_{\text{ц}}$	$R1, \text{Ом}$	$C1, \text{мкФ}$	$R2, \text{Ом}$	$R3, \text{Ом}$
9	400	800	360	1	110	82
10	500	1000	270	1	180	110
11	400	800	220	1	110	75
12	400	800	180	2	75	75
13	400	800	220	2	120	130
14	500	1000	330	1	180	75
15	500	1000	300	1	75	110
$C2 = 1 \text{ мкФ}$						

**Теоретические сведения к расчетному заданию**

По заданным значениям сопротивлений  $Z1, Z2, Z3$  рассчитать параметры холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), а также соответствующие этим режимам токи и напряжения при питании со стороны первичных (1–1) и вторичных (2–2) выводов электрической цепи (рис.1). Расчеты выполняются с применением комплексных чисел. Источник (генератор напряжения) подключен к первичным выводам (прямое включение):

- режим ХХ (рис.2);
- режим КЗ (рис.3).



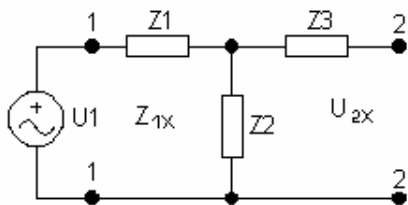


Рис.2.

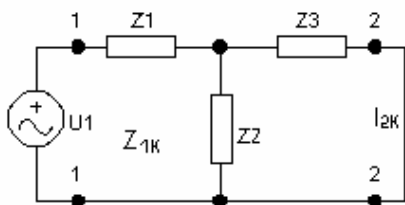


Рис.3.

Входное сопротивление в режиме  $I_2 = 0$  (XX)  $Z_{1X} = Z1 + Z2$ .

Входной ток в режиме «XX»  $I_{1X} = U1/Z_{1X}$ .

Выходное напряжение в режиме «XX»  $U_{2X} = I_{1X} Z2$ .

Входное сопротивление в режиме «КЗ»

$Z_{1K} = Z1 + (Z2 Z3)/(Z2 + Z3)$ .

Входной ток в режиме «КЗ»  $I_{1K} = U1/Z_{1K}$ .

Ток «КЗ»  $I_{2K} = I_{1K} Z2/(Z2 + Z3)$ .

Результаты расчетов занести в форму табл.2, в графу «расчет».

Источник (генератор напряжения) подключен к вторичным выводам электрической цепи (обратное включение):

- режим «XX» (рис.4);
- режим «КЗ» (рис.5).

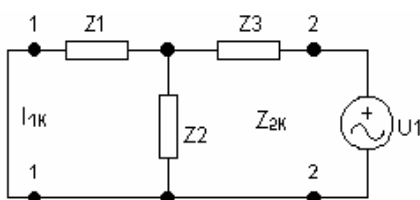
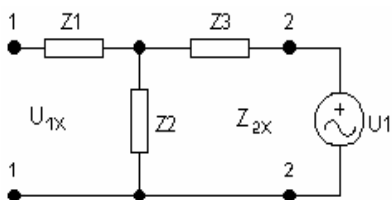


Рис.4.

Рис.5.

Передаточное сопротивление обратной передачи от выхода к входу в режиме  $I_1 = 0$  (XX)  $Z_{2X} = Z_3 + Z_2$ .

Входной обратный ток в режиме «XX»  $I_{2X} = U_1/Z_{2X}$ .

Выходное обратное напряжения в режиме «XX»  $U_{1X} = I_{2X}Z_2$ .

Входное обратное сопротивление в режиме «КЗ»

$$Z_{2K} = Z_3 + (Z_1 Z_2)/(Z_1 + Z_2).$$

Входной обратный ток в режиме «КЗ»  $I_{2K} = U_1/Z_{2K}$ .

Выходной обратный ток в режиме «КЗ»  $I_{1K} = I_{2K}Z_2/(Z_1 + Z_2)$ .

Результаты расчетов занести в форму табл.3, в графу «расчет».

По результатам расчетов, занесенных в формы табл.2 и 3, вычислить «A, Y, H» - параметры:

А) уравнения в «А» параметрах

$$U_1 = A_{11}U_2 + A_{12}I_2, \quad A_{11} = U_1/U_{2X}; (I_2 = 0);$$

$$A_{12} = U_1/I_{2K}; (U_2 = 0);$$

$$I_1 = A_{21}U_2 + A_{22}I_2; \quad A_{21} = I_{1X}/U_{2X}; (I_2 = 0);$$

$$A_{22} = I_{1K}/I_{2K}; (U_2 = 0).$$

Б) уравнения в «Y» параметрах:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2; & Y_{11} &= I_{1K}/U_1; & (U_2 = 0); \\ Y_{12} &= I_{1K}/U_1; & (U_1 &= U_2; U_1 = 0); \\ I_2 &= Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2; & Y_{21} &= I_{2K}/U_1; & (U_2 = 0); \\ Y_{22} &= I_{2K}/U_1; & (U_1 &= 0); \end{aligned}$$

В) уравнения в «H» параметрах:

$$\begin{aligned} U_1 &= H_{11}I_1 + H_{12}U_2; & H_{11} &= 1/Y_{11}; \\ H_{12} &= U_{1X}/U_1; & (U_1 &= U_2, I_1 = 0); \\ I_2 &= H_{21}I_1 + H_{22}U_2; & H_{21} &= I_{2K}/I_{1K}; & (U_2 = 0); \\ H_{22} &= 1/Z_{2K} \end{aligned}$$

Принимая во внимание, что  $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$ ,  $Y_{12} = Y_{21}$ ,  $H_{12} = H_{21}$ , проверить правильность расчетов.

### **Лабораторное задание и методика выполнения работы**

Проверка результатов расчета производится на компьютере с применением программы «Electronics Workbench», измерение параметров - на лабораторном стенде с применением (или без) программы «Analysis Center» (по указанию преподавателя).

1. Определение тока  $I_{1X}$  и напряжения  $U_{2X}$  из опыта «XX» при питании со стороны первичных выводов:

А) собрать схему рис.6;

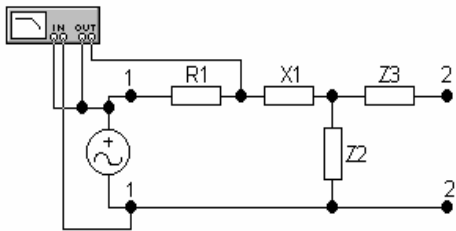
Б) установить заданные значения частоты и напряжения генератора на выводах «1-1» (выводы «2-2» разомкнуты);

В) измерить напряжение на резисторе  $R1$  и напряжение на выводах

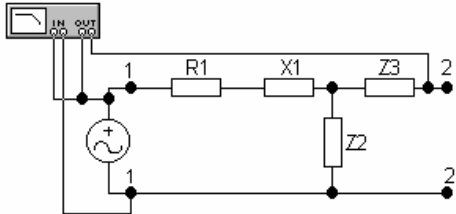
«2-2» ( $U_{2X}$ ), вычислить модуль тока  $I_{1X}$ ;

Г) измерить фазометром фазы  $F_{1X}$  (рис.6) и  $F_{2X}$  (рис.7).

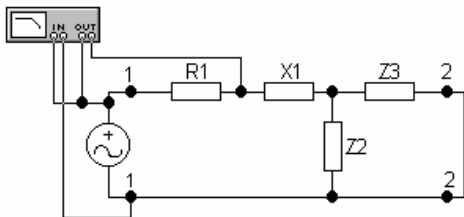
2. Определение токов  $I_{1K}$  и  $I_{2K}$  из опыта «КЗ» при питании со стороны первичных выводов:
- А) замкнуть выводы «2-2» (рис.8, 9);
  - Б) установить напряжение и частоту генератора;
  - В) измерить напряжения на резисторах  $R1$  и  $R3$ , вычислить модули токов  $I_{1K}$  и  $I_{2K}$ ;
  - Г) измерить фазометром фазы  $F_{1K}$  (рис.8) и  $F_{2K}$  (рис.9).
3. Определение напряжения  $U_{1X}$  и тока  $I_{2X}$  из опыта «ХХ» при питании со стороны вторичных выводов:
- А) собрать схему рис.10, установить заданные значения частоты и напряжения генератора;
  - Б) измерить напряжение на резисторе  $R3$  и напряжение на выводах 1-1 ( $U_{1X}$ ); рассчитать модуль тока  $I_{2X}$ ;
  - В) измерить фазометром фазы  $F_{2X}$  (рис.10) и  $F_{1X}$  (рис.11).
4. Определение токов  $I_{1K}$  и  $I_{2K}$  при питании со стороны вторичных выводов:
- А) замкнуть выводы 1-1 (рис.12) и установить заданные значения частоты и напряжения генератора;
  - Б) измерить напряжение на резисторах  $R1$  и  $R3$ , рассчитать модули токов  $I_{1K}$  и  $I_{2K}$ ;
  - В) измерить фазометром фазы  $F_{2K}$  (рис.12) и  $F_{1K}$  (рис.13).
5. Рассчитать параметры четырехполюсника ( $A$ ,  $Y$ ,  $H$ ) по результатам измерений. Все расчетные и экспериментальные данные по ходу выполнения заносить в формы табл.2 - 4.



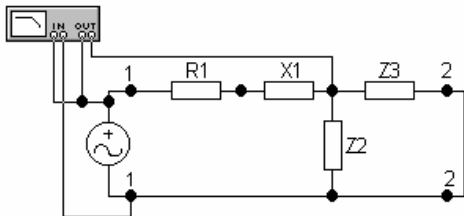
*Puc.6.*



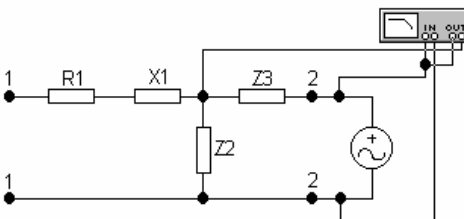
*Puc.7.*



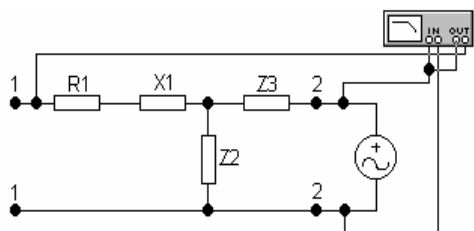
*Puc.8.*



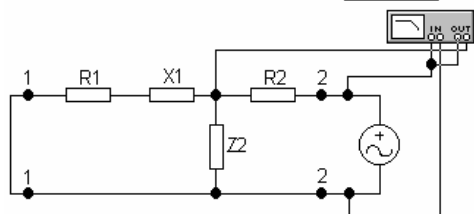
*Puc.9.*



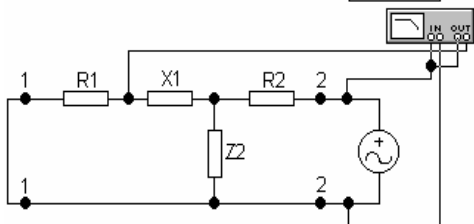
*Puc.10.*



*Puc.11.*



*Puc.12.*



*Puc.13.*

**Форма табл.2**

Данные	Параметры прямого включения							
	режим «ХХ»				режим «КЗ»			
	$I_{1X}$	$F_{1X}$	$U_{2X}$	$F_{2X}$	$I_{1K}$	$F_{1K}$	$I_{2K}$	$F_{2K}$
Расчет								
Эксперимент								

**Форма табл.3**

Данные	Параметры обратного включения							
	режим «ХХ»				режим «КЗ»			
	$I_{2X}$	$F_{2X}$	$U_{1X}$	$F_{1X}$	$I_{2K}$	$F_{2K}$	$I_{1K}$	$F_{1K}$
Расчет								
Эксперимент								

**Форма табл.4**

Данные	Параметры											
	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{21}$	$A_{22}$	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$H_{11}$	$H_{12}$	$H_{21}$	$H_{22}$
Расчет												
Эксперимент												

### Контрольные вопросы

1. Что такое схема замещения четырехполюсника?
2. Перечислить виды схем четырехполюсника.
3. Что понимается под параметрами холостого хода и короткого замыкания?
4. Какие опыты надо проделать для определения постоянных коэффициентов в « $A$ ,  $H$ ,  $Y$ ,  $Z$ » параметрах?
5. Как экспериментально определить фазу тока на входе и выходе четырехполюсника?
6. Как экспериментально определить фазу напряжения на выходе четырехполюсника?
7. Перечислить схемы соединения сложных четырехполюсников.



## Лабораторная работа № 5

### Исследование линейной электрической цепи при несинусоидальных периодических воздействиях

**Цель работы:** экспериментальное получение осциллограмм несинусоидальных сигналов и изучение особенностей измерения несинусоидальных напряжений.

**Используемое оборудование:**

- персональный компьютер с программами «Electronics Workbench» и «Analysis Center»;
- генератор;
- осциллограф;
- вольтметр.

#### Исследуемая схема и исходные данные

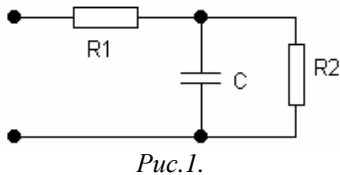


Рис.1.

Воздействующие сигналы - однополярные прямоугольные импульсы с периодом  $T = 20$  мкс ( $f = 50$  кГц) и максимальным напряжением  $E_m = 15$  В.

Внутреннее сопротивление генератора сигналов  $R = 100$  Ом. Значения  $R1$ ,  $R2$  и  $C$  в табл.1.

Таблица 1

№	$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$C$ , мкФ	№	$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$C$ , мкФ
1	51	-	0,03	12	120	160	0,015
2	51	120	0,03	13	160	-	0,015

3	120	-	0,03	14	160	240	0,015
4	120	160	0,03	15	240	-	0,015
5	160	-	0,03	16	240	300	0,015
6	160	240	0,03	17	51	-	0,01
7	240	-	0,03	18	51	120	0,01
8	240	300	0,03	19	120	-	0,01
9	51	-	0,015	20	120	160	0,01
10	51	120	0,015	21	160	-	0,01
11	120	-	0,015	22	160	240	0,01

**Окончание**

№	R1, Ом	R2, Ом	C, мкФ	№	R1, Ом	R2, Ом	C, мкФ
23	240	-	0,01	26	160	160	0,03
24	240	300	0,01	27	240	-	0,03
25	160	-	0,03	28	240	240	0,03

**Теоретические сведения к расчетному заданию**

1. Рассчитать напряжения  $u_C(t)$  для схем рис.1.

Записать воздействующий сигнал несинусоидального процесса в виде ряда Фурье:

$$E(t) = (E_m/2) + (E_m/2)[\sin(\omega t) + (1/3)\sin(3\omega t) + (1/5)\sin(5\omega t) + (1/7)\sin(7\omega t)].$$

Рассчитать последовательно для каждой из гармоник ( $k$ ) сопротивления:  $R(\omega) = \text{const}$ ,  $X_{Ck} = 1/k\omega C$ ,  $Z_k$

Рассчитать комплексные амплитуды тока:  $I_{mk} = U_{mk}/Z_k$

Рассчитать комплексную амплитуду напряжения на конденсаторе.

Рассчитать активную мощность электрической схемы ( $P_k$ ).

Результаты расчетов занести в форму табл.2.

**Форма табл.2**

Гармоника	Параметры					
	$U_{mk}$ , В	$Z_{R2Ck}$ , Ом	$Z_k$ , Ом	$I_{mk}$ , А	$U_{mCk}$ , В	$P_k$ , Вт
$K = 0$						

$K = 1$						
$K = 3$						
$K = 5$						
$K = 7$						

2. Записать  $u_C(t)$  в виде ряда Фурье и построить осциллограммы гармонических составляющих входного напряжения и напряжения на конденсаторе.

3. Рассчитать коэффициенты амплитуды ( $K_A$ ), формы ( $K_F$ ) и искажений ( $K_I$ ), используя среднее и действующее напряжения на конденсаторе:

$$K_A = U_{mC}/U_C; K_F = U_C/U_{Ccp}; K_I = U_{C(3)}/U_C.$$

### Лабораторное задание и методика выполнения работы

1. Произвести проверку расчетного задания на персональном компьютере с помощью системы схемотехнического моделирования «Electronics Workbench». Проверка воздействующего сигнала на соответствие разложению в ряд Фурье выполняется по схеме рис.2. Проверка гармонических составляющих  $u_C(t)$  выполняется по схеме рис.3.

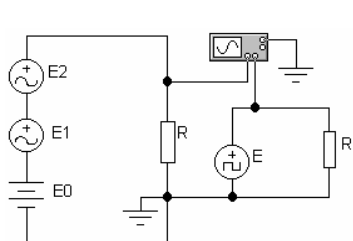


Рис.2.

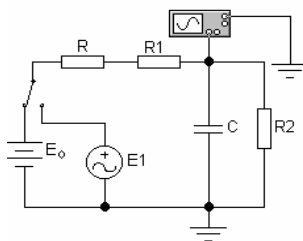


Рис.3.

2. Экспериментальные измерения (в том числе с применением компьютера) выполняется по схеме, приведенной на рис.4.

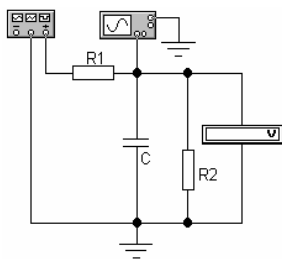


Рис. 4.

На виртуальном генераторе устанавливаются заданные значения частоты и напряжения прямоугольной формы. С помощью виртуального осциллографа снимаются осциллограммы процессов и сравниваются с графическими построениями расчетного задания.

Вольтметром измеряются среднее и действующее значения напряжений. Результаты измерений сравниваются с расчетными данными.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит физический смысл разложения сигнала в ряд Фурье?
2. Существуют ли гармоники реально?
3. Как изменяется сопротивление конденсатора с переходом от  $k$ -й к  $(k+1)$ -й гармонике?
4. Как изменяется сопротивление катушки индуктивности с переходом от  $k$ -й к  $(k-1)$ -й гармонике?
5. Каков порядок расчета цепей при несинусоидальных периодических воздействиях?
6. Можно ли использовать векторные диаграммы для расчета цепей с несинусоидальными процессами?
7. Как рассчитывается действующее значение несинусоидального тока?
8. Как рассчитывается активная и полная мощности при несинусоидальных процессах?
9. Могут ли высшие гармоники превосходить по амплитуде низшие?

## Лабораторная работа № 6

### Исследование переходных процессов в RC и RL цепях

**Цель работы:** экспериментально исследовать влияние параметров цепи на характер переходного процесса при подаче на RC и RL цепи прямоугольного импульса напряжения.

**Используемое оборудование:**

- персональный компьютер с программой «Electronics Workbench»;
- генератор прямоугольных импульсов;
- осциллограф.

#### Теоретические сведения к расчетному заданию

Рассчитать классическим методом переходные процессы в RC цепи (рис.1), на входе которой действует напряжение прямоугольной формы  $E = 15$  В и длительностью  $t_{\text{и}} = 10$  мкс. Величины элементов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $C$  должны соответствовать вариантам заданий, выдаваемых преподавателем (см. таблицу вариантов). Для всех вариантов внутреннее сопротивление условного генератора принимается равным  $R = 100$  Ом, индуктивность  $L = 1$  мГн.

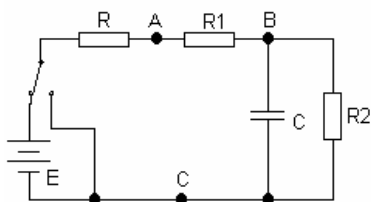


Рис.1.

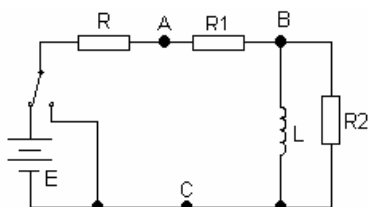


Рис.2.

1. Рассчитать  $u_C(t)$  на интервале действия импульса:

- составить дифференциальное уравнение цепи после коммутации относительно переменной  $u_C(t)$ ;
- записать однородное дифференциальное уравнение;
- записать характеристическое уравнение и найти его корни;
- найти частное решение неоднородного дифференциального уравнения (принужденное напряжение  $U_C$ );
- записать общее решение однородного дифференциального уравнения (свободное напряжение) и найти постоянную интегрирования;
- записать полное решение неоднородного дифференциального уравнения (переходное напряжение);
- задавая значения длительности импульса ( $t$ ) равными 0; 5; 10 мкс, рассчитать значения  $u_C(t)$  и занести расчетные данные в форму табл.1;
- построить график изменения напряжения  $u_C(t)$  на интервале действия импульса.

2. Рассчитать  $u_C(t)$  и построить график изменения  $u_C(t)$  на интервале действия паузы по методике п.1. Начало отсчета

паузы  $t_{II}$  соответствует моменту окончания действия импульса.

3. Используя выражения переходного напряжения  $u_C(t)$  на интервалах действия импульса и паузы, записать выражения и построить графики переходных напряжений  $u_{AB}(t)$  и  $u_{AC}(t)$ .

**Форма табл.1**

Наименование параметра	Значение параметра, В, во время действия (t)					
	импульса, мкс,			паузы, мкс,		
	0	5	10	0	5	10
$u_C(t)$						
$u_{AB}(t)$						
$u_{AC}(t)$						

**Рассчитать операторным методом переходные процессы в  $RL$  цепи (рис.2)**

1. Рассчитать  $u_L(t)$  на интервале действия импульса:

- изобразить операторную схему замещения цепи, определив предварительно начальные условия;
- составить систему уравнений в операторной форме;
- определить операторное напряжение  $U_L(p)$ ;
- найти оригинал  $u_L(t)$  по формулам разложения или по таблицам Лапласа;
- задавая значения времени (t) равными 0; 5; 10 мкс, рассчитать значения  $u_L(t)$ ; расчетные данные занести в форму табл.2;
- построить график изменения  $u_L(t)$  на интервале действия импульса.

2. Рассчитать и построить график изменения  $u_L(t)$  на интервале паузы по методике п.1.

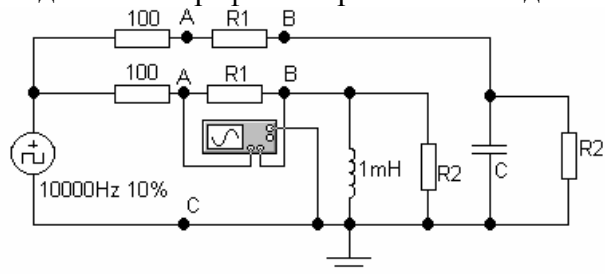
3. Используя выражения  $u_L(t)$  на интервалах действия импульса и паузы, записать выражения и построить графики переходных напряжений  $u_{AB}(t)$  и  $u_{AC}(t)$ .

**Форма табл.2**

Наименование параметра	Значение параметра, В, во время действия (t)					
	импульса, мкс,			паузы, мкс,		
	0	5	10	0	5	10
$u_L(t)$						
$u_{AB}(t)$						
$u_{AC}(t)$						

### Лабораторное задание и методика выполнения работы

1. Исследовать на персональном компьютере с помощью системы схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» переходные процессы в RC и RL цепях по схеме, приведенной на рис.3. Сравнить результаты исследований с графиками расчетного задания.



*Рис.3.*

2. Исследовать переходные процессы в RC и RL цепях на лабораторном стенде по схеме, приведенной на рис.4.



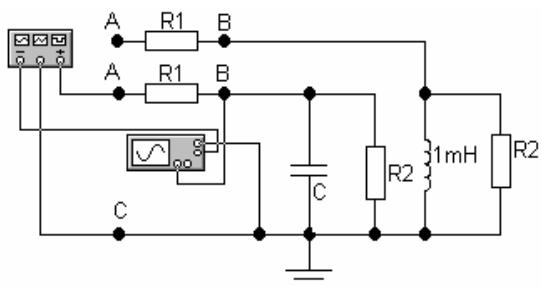


Рис.4

Осциллографом, в режиме синхронизации с генератором импульсов, производятся измерения осциллограмм переходных процессов на конденсаторе и на катушке индуктивности. Результаты измерений в точках 0, 5 и 10 мкс наносятся на графики переходных процессов расчетного задания.

**Таблица вариантов**

Номер вариан та	$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$C$ , мкФ	Номер вариан та	$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$C$ , мкФ
1	51	-	0,03	15	240	-	0,015
2	51	120	0,03	16	240	300	0,015
3	120	-	0,03	17	51	-	0,01
4	120	160	0,03	18	51	120	0,01
5	160	-	0,03	19	120	-	0,01
6	160	240	0,03	20	120	160	0,01
7	240	-	0,03	21	160	-	0,01
8	240	300	0,03	22	160	240	0,01
9	51	-	0,015	23	240	-	0,03
10	51	120	0,015	24	240	300	0,03
11	120	-	0,015	25	160	-	0,03
12	120	160	0,015	26	160	160	0,03
13	160	-	0,015	27	240	-	0,03
14	160	240	0,015	28	240	240	0,03
$L = 1 \text{ мГ}$ для всех вариантов							

### Контрольные вопросы

1. Как определить постоянные времени RC и RL цепей?
2. Изобразить семейство зависимостей  $u(t)$  для RC и RL цепей при различных величинах сопротивлений резисторов.
3. Изобразить семейство зависимостей  $u(t)$  при наличии ненулевых начальных условий на емкостном и на индуктивном элементах.
4. Записать аналитические выражения токов через  $R1$ ,  $R2$  и  $C$  элементы.
5. Записать аналитические выражения напряжений на  $R1$ ,  $R2$  и  $L$  элементах.
6. Объяснить влияние сопротивлений  $R1$  и  $R2$  на переходные процессы.
7. Объяснить влияние внутреннего сопротивления генератора импульсов на переходный процесс.

## Лабораторная работа № 7

### Исследование переходных процессов в

### RLC цепях

**Цель работы:** экспериментально исследовать влияние параметров цепи на характер переходного процесса при подаче на RLC цепь прямоугольного импульса напряжения.

**Используемое оборудование:**

- персональный компьютер с программой «Electronics Workbench»;
- генератор прямоугольных импульсов;
- осциллограф.

#### Теоретические сведения к расчетному заданию

Рассчитать классическим и операторным методами переходные процессы в RLC цепи (рис.1), на входе которой действует напряжение прямоугольной формы  $E = 15$  В, длительностью 10 мкс. Величины элементов должны соответствовать вариантам заданий (см. таблицу вариантов к лабораторной работе № 6). Условное внутреннее сопротивление генератора для всех вариантов  $R = 100$  Ом.

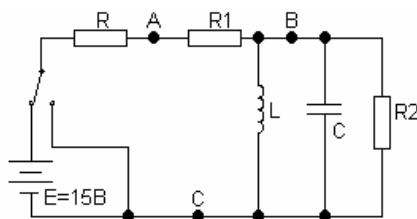


Рис.1.

1. Рассчитать классическим методом переходные процессы  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$  на интервале действия импульса:

- составить характеристическое уравнение  $Z(p) = 0$  или  $Y(p) = 0$ , найти корни и по их значениям определить характер переходного процесса (апериодический, критический или колебательный);
- записать общее решение  $u_C(t)$ ,  $i_L(t)$  для определенного характера переходного процесса;
- найти принужденную составляющую переходного процесса;
- найти постоянные интегрирования, используя начальные условия  $u_C(0)$ ,  $i_C(0)$ ,  $i_L(0)$ ,  $u_L(0)$ , соответственно;
- записать решения переходных процессов  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$  во время действия импульса;
- задавая значения  $t = 0, 5, 10$  мкс, рассчитать значения  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$ ; расчетные данные занести в форму табл.1;
- построить графики изменения  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$  на интервале действия импульса.

**Форма табл.1**

Наименование параметра	Значение параметра во время действия ( $t$ )					
	импульса, мкс			паузы, мкс		
	0	5	10	0	5	10
$u_C(t)$ , В						
$i_L(t)$ , А						

2. Рассчитать операторным методом переходные процессы  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$  на интервале действия паузы:

- составить схему замещения (начальные условия соответствуют значениям в момент окончания действия импульса);
- найти изображения  $U_C(p)$  и  $I_L(p)$ ;
- в зависимости от характера переходного процесса выбрать соответствующую формулу разложения и произвести переход к оригиналам  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$ ;
- задавая значения  $t = 0, 5, 10$  мкс рассчитать значения  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$ , расчетные данные занести в форму табл.1;
- построить графики изменений  $u_C(t)$  и  $i_L(t)$  на интервале действия паузы.

### Лабораторное задание и методика выполнения работы

1. Исследовать на персональном компьютере с помощью системы схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» переходные процессы  $u_{LC}(t)$  по схеме, приведенной на рис.2. Сравнить результаты исследований с графиками расчетного задания.

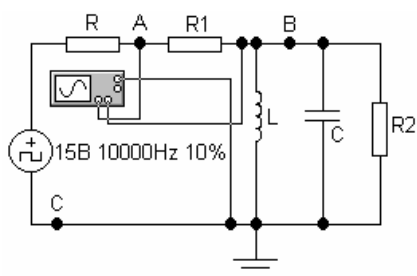


Рис.2.

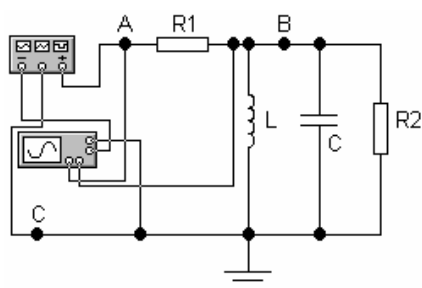


Рис.3.

2. Исследовать переходные процессы  $u_{LC}(t)$  на лабораторном стенде по схеме, приведенной на рис.3. Произвести измерения в точках 0, 5, 10 мкс. Результаты измерений нанести на графики расчетного задания.

### Контрольные вопросы

1. Как определить постоянные времени в RLC цепях?
2. Физические и математические понятия постоянных времени.
3. Как определить физическую постоянную времени?
4. Объяснить влияние сопротивлений резисторов на характер переходных процессов.
5. Изобразить семейство характеристик переходных процессов для различных значений сопротивлений резисторов.
6. Как влияют величины  $L$  и  $C$  на характер переходных процессов?

## Оглавление

<b>Лабораторная работа № 1.</b> Исследование электрической цепи постоянного тока .....	3
<b>Лабораторная работа № 2.</b> Исследование электрической цепи синусоидального тока .....	10
<b>Лабораторная работа № 3.</b> Резонанс напряжений в последовательной RLC цепи.....	14
<b>Лабораторная работа № 4.</b> Определение постоянных коэффициентов четырехполюсника .....	18
<b>Лабораторная работа № 5.</b> Исследование линейной электрической цепи при несинусоидальных периодических воздействиях.....	26
<b>Лабораторная работа № 6.</b> Исследование переходных процессов в RC и RL цепях.....	29
<b>Лабораторная работа № 7.</b> Исследование переходных процессов в RLC цепях .....	33

*Лисова Марина Филипповна*  
*Горбач Александр Васильевич*  
*Волков Юрий Иванович*  
*Самохин Виктор Иванович*

**Сборник лабораторных работ по теории электрических  
цепей**

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать с оригинала-макета 10.12.03. Формат  
60×84 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура  
Times New Roman. Усл. печ. л. 2,09.  
Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 600 экз. Заказ 303.

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.  
124498, Москва, МИЭТ.