

Министерство связи и массовых коммуникаций

ГОУ ВПО
Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики

В.П. БАКАЛОВ
В.Д. ЧИРКОВ
Н.М. ГУСЕЛЬНИКОВА

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Часть 1

Методические указания
к компьютерным лабораторным работам

2-е издание,
переработанное и дополненное

Новосибирск
2010

УДК 621.382

Д.т.н., профессор Бакалов В.П., доцент Чирков В.Д., ст. преп. Гусельникова Н.М. Теория электрических цепей. Часть 1. Методические указания к компьютерным лабораторным работам. 2-е изд., перераб. и доп., СибГУТИ, Новосибирск, 2007, 38 с.

Настоящие методические указания предназначены для студентов 2 курса специальностей 210302, 210404, 210406, 210202.

В методических указаниях содержатся сведения по подготовке и выполнению лабораторных работ на ЭВМ по курсу «Основы теории цепей».

Кафедра ТЭЦ

Ил. 16, табл. 15

Рецензент: И.Н. Запасный

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве методических указаний.

© Сибирский государственный
университет телекоммуникаций
и информатики

Оглавление

	Стр.
Общие указания к выполнению лабораторных работ	4
Лабораторная работа № 1. Исследование источников электрической энергии	5
Лабораторная работа № 2. Законы Ома и Кирхгофа	8
Лабораторная работа № 3. Метод наложения и узловых напряжений	11
Лабораторная работа № 4. Метод эквивалентного генератора	14
Лабораторная работа № 5. Электрические цепи синусоидального тока ..	16
Лабораторная работа № 6. Исследование избирательных свойств последовательного контура	19
Лабораторная работа № 7. Переходные процессы в электрических цепях первого порядка	23
Лабораторная работа № 8. Реакция электрической цепи на воздействие сигнала произвольной формы (временной метод)	26
Лабораторная работа № 9. Реакция электрической цепи на воздействие сигнала произвольной формы (частотный метод)	30
Литература	34

Общие указания к выполнению лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются в часы занятий, установленные расписанием. При подготовке к выполнению лабораторных работ студенты должны изучить соответствующие разделы теоретического курса, освоить приемы работы в электронной лаборатории, уметь оценивать достоверность получаемых результатов и соотносить их с положениями теории.

По итогам работы каждым студентом оформляется отчет по лабораторной работе. В отчет заносятся исходные схемы, их предварительный расчет и данные экспериментов, строятся необходимые графики, заполняются таблицы, делаются выводы по работе.

По окончании работы с учетом результатов беседы с преподавателем по теоретическому материалу и отчету студент получает зачет по работе.

Лабораторные работы по курсу «Основы теории цепей» выполняются в электронной лаборатории.

В рабочем поле создается схема в соответствии с вариантом лабораторной работы. Необходимый для схемы элемент переносится из библиотеки компонентов на рабочее поле движением мыши при нажатой левой кнопке. Для фиксации элемента кнопка отпускается. При двойном щелчке левой кнопки по элементу в раскрывающемся диалоговом окне устанавливаются требуемые параметры элемента (величина, кратность и т.д.). Выбор подтверждается нажатием кнопки **Accept** с помощью курсора мыши или клавиши **Enter**.

После размещения элементов на рабочем поле производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу элемента можно подключить только один проводник, в случае разветвления схемы нужно использовать элементы «узлы». К узлу может быть подключено не более четырех проводников.

Для измерения электрических величин и исследования работы электрической схемы, в соответствии с заданием, к схеме подключаются контрольно-измерительные приборы. Способ их подключения такой же, как и способ создания схемы. При необходимости каждый из элементов схемы может быть развернут на 90° (**Ctrl-R**).

Моделирование начинается щелчком по выключателю, который находится в верхнем правом углу.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

«ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ»

1. Цель работы: исследование внешних характеристик $U_{\text{ист}} = f(I_{\text{ист}})$ реальных и идеальных источников напряжения и тока.

2. Экспериментальная часть

2.1. Исследование источника напряжения

- вынести из библиотеки компонентов на рабочее поле элементы источника напряжения \oplus , резистора R (используемого в качестве внутреннего сопротивления источника), резистора R (используемого в качестве сопротивления нагрузки);
- вынести из библиотеки компонентов на рабочее поле элементы измерительных приборов: амперметра A , вольтметра V ;
- соединить элементы схемы согласно рис. 1;

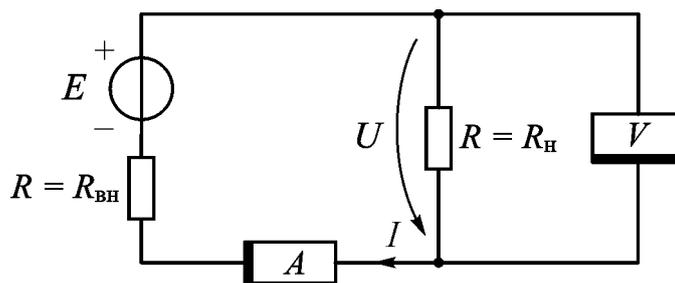


Рис. 1

- установить значение $R_{\text{вн}} = 10$ Ом; значение ЭДС $E = 10$ В;
- установить режим измерения амперметра и вольтметра «DC» (direct current – «постоянный ток»), сопротивление амперметра 1 мОм, сопротивление вольтметра 100 МОм;
- изменяя сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ согласно данных таблицы 1, измерить и записать значения тока в цепи I и напряжения на источнике U в соответствующие графы таблицы 1;
- установить значение $R_{\text{вн}} = 5$ Ом и повторить измерения тока I и напряжения U для разных значений $R_{\text{н}}$. Данные записать в таблицу 1;
- установить значение $R_{\text{вн}} = 0,01$ Ом (источник напряжения близкий к идеальному) и повторить измерения тока I и напряжения U для разных значений $R_{\text{н}}$. Данные записать в таблицу 1.

Таблица 1

$R_H, \text{ Ом}$		10	20	50	100	200	1000
$R_{BH} = 10 \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$						
	$U, \text{ В}$						
$R_{BH} = 5 \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$						
	$U, \text{ В}$						
$R_{BH} = 0,01 \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$						
	$U, \text{ В}$						

2.2. Исследование источника тока

- вынести из библиотеки компонентов на рабочее поле элементы источника тока \oplus , резистора R (используемого в качестве внутреннего сопротивления источника), резистора R (используемого в качестве сопротивления нагрузки);
- вынести из библиотеки компонентов на рабочее поле элементы измерительных приборов: амперметра A , вольтметра V ;
- соединить элементы схемы согласно рис. 2;

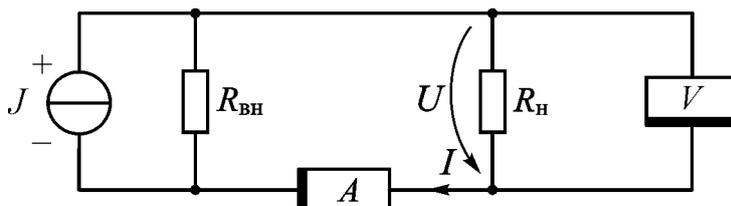


Рис. 2

- установить значение $R_{BH} = 500 \text{ Ом}$; значение источника тока $J = 100 \text{ mA}$;
- установить режим измерения амперметра и вольтметра «DC» («постоянный ток»), сопротивление амперметра 1 МОм , сопротивление вольтметра 100 МОм ;
- изменяя сопротивление нагрузки R_H согласно данным таблицы 2, измерить и записать значения тока в цепи I и напряжения на источнике U в соответствующие графы таблицы 2;

Таблица 2

$R_H, \text{ Ом}$		10	20	50	100	200	1000
$R_{BH} = 500 \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$						
	$U, \text{ В}$						
$R_{BH} = 1000 \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$						
	$U, \text{ В}$						
$R_{BH} = 10 \text{ МОм}$	$I, \text{ mA}$						
	$U, \text{ В}$						

- установить значение $R_{вн} = 1000$ Ом и повторить измерения тока I и напряжения U для разных значений $R_{н}$. Данные записать в таблицу 2;
- установить значение $R_{вн} = 10$ МОм (соответствует идеальному источнику тока) и повторить измерения тока I и напряжения U для разных значений $R_{н}$. Данные записать в таблицу 2.

3. Требования к отчету

В отчете привести схемы измерений вольтамперных (внешних) характеристик источников напряжения и тока, таблицы 1 и 2 измеренных в процессе работы значений тока и напряжения. По результатам измерений в масштабе построить 2 графика внешних характеристик источников $U = f(I)$ для разных значений $R_{вн}$ – один для источника напряжений (для $R_{вн} = 10$ Ом, $R_{вн} = 5$ Ом, $R_{вн} = 0,01$ Ом), – второй – для источника тока (для $R_{вн} = 500$ Ом, $R_{вн} = 1000$ Ом, $R_{вн} = 10$ МОм). Сделать выводы по работе

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Графическое обозначение идеальных и реальных источников напряжения и тока.
- 4.2. Влияние внутренних сопротивлений на свойства источников, на величины тока и напряжения во внешней цепи.
- 4.3. Переход от источников напряжения к источнику тока и наоборот.
- 4.4. Замена группы источников одним эквивалентным.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

«ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА»

1. **Цель работы:** экспериментальная проверка закона Ома и законов Кирхгофа при определении токов и напряжений в электрических цепях.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Для схемы рис. 3, в соответствии с данными своего варианта, при согласном и встречном включении источников ЭДС E_1 и E_2 определить по закону Ома: ток I в цепи, напряжения U_{R_1}, U_{R_2}, \dots на элементах цепи, напряжение между точками $ab - U_{ab}$. Результаты расчета записать в таблицу 3. Проверить результаты по ЗНК для контура.

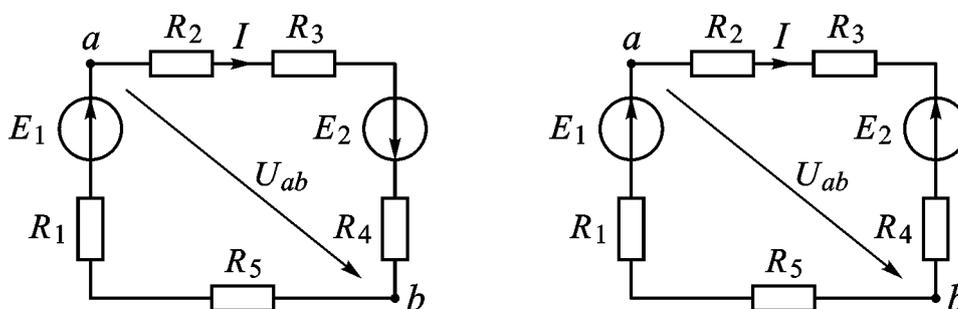


Рис. 3

Данные элементов схемы:

$E_1 = 100$ В, $E_2 = (50 + N_{гр})$ В, $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 2$ кОм, $R_3 = 3$ кОм, $R_4 = 4$ кОм, $R_5 = (5 + 0,1 \cdot N_{ст})$ кОм, где $N_{гр}$ – последняя цифра номера группы; $N_{ст}$ – номер лабораторного макета (стенда).

Таблица 3

		$I, \text{ мА}$	$U_{R_1}, \text{ В}$	$U_{R_2}, \text{ В}$	$U_{R_3}, \text{ В}$	$U_{R_4}, \text{ В}$	$U_{R_5}, \text{ В}$	$U_{ab}, \text{ В}$
Согласн. E_1 и E_2	Расчит.							
	Измер.							
Встреч. E_1 и E_2	Расчит.							
	Измер.							

2.2. Для схемы рис. 4, в соответствии с данными своего варианта, используя эквивалентные преобразования сопротивлений, определить токи в

ветвях электрической цепи и напряжения на ее элементах. Проверить результаты расчета по ЗТК для каждого узла и ЗНК для каждого контура.

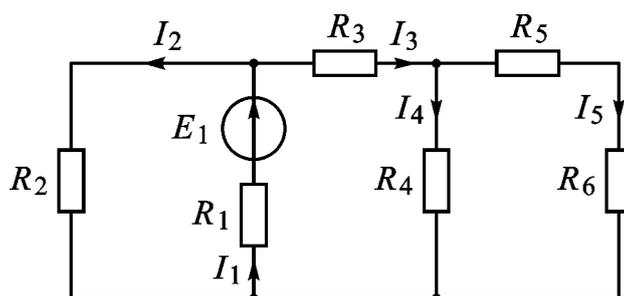


Рис. 4

Результаты расчета записать в таблицу 4.

Данные элементов схемы:

$E_1 = (100 + N_{гр})$ В, $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 2$ кОм, $R_3 = 3$ кОм, $R_4 = 4$ кОм, $R_5 = 5$ кОм, $R_6 = (5 + 0,1 \cdot N_{ст})$ кОм, где $N_{гр}$ – последняя цифра номера группы; $N_{ст}$ – номер лабораторного макета (стенда).

Таблица 4

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	U_{R_1}	U_{R_2}	U_{R_3}	U_{R_4}	U_{R_5}	U_{R_6}
	мА	мА	мА	мА	мА	В	В	В	В	В	В
Расчит.											
Измер.											

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему (рис. 3) согласного включения ЭДС E_1 и E_2 . Установить заданные значения элементов схемы $E_1, E_2, R_1 \dots R_5$.

С помощью амперметра, включаемого последовательно в цепь, измерить ток в цепи и записать его значение в таблицу 3. С помощью вольтметра, подключаемого параллельно к элементам цепи, измерить напряжения на них и записать их значения в таблицу 3 (режим работы приборов «DC» – постоянный ток). При подключении приборов необходимо соблюдение «полярности» их включения – к точке с большим потенциалом подключается «+» прибора, к точке с меньшим потенциалом подключается «-» прибора.

3.2. Собрать схему (рис. 3) встречного включения ЭДС E_1 и E_2 . Измерить ток в цепи и напряжения на элементах. Результаты измерений записать в таблицу 3. Сравнить их с расчетными значениями.

3.3. Собрать схему (рис. 4). Установить заданные значения $E_1, R_1 \dots R_6$.

С помощью амперметра, соблюдая полярность включения, измерить и записать в таблицу 4 значения тока в каждой ветви схемы. С помощью вольт-

тметра измерить и записать в таблицу 4 значения напряжения на каждом элементе схемы. Сравнить их с расчетными значениями.

4. Требования к отчету

В отчете должны быть представлены схемы исследуемых цепей, полностью выполненный предварительный расчет, таблицы 3 и 4 рассчитанных и измеренных величин, выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Закон Ома (три его формы) для электрической цепи.
- 5.2. Законы Кирхгофа.
- 5.3. Порядок расчета цепи по законам Кирхгофа.
- 5.4. Мощность в электрической цепи. Баланс мощностей. Расчет мощностей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ И УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ»

1. **Цель работы:** исследование расчета токов и напряжений в электрической цепи методом наложения (принцип суперпозиции) и методом узловых напряжений (узловых потенциалов).

2. Подготовка к выполнению работы

2.1. Для схемы (рис. 5) в соответствии с данными своего варианта рассчитать токи $I_1 \dots I_5$ в ветвях и напряжения $U_{R_2} \dots U_{R_6}$ на элементах схемы методом наложения. Проверить результаты расчета по каждой частичной схеме и результирующие ответы по ЗТК для каждого узла схемы и по ЗНК для каждого контура. Результаты расчета записать в таблицу 5.

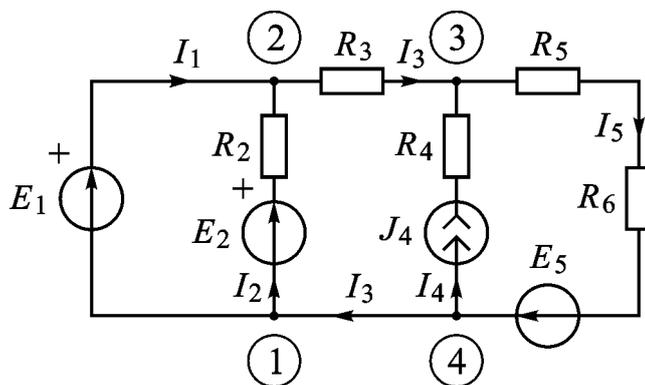


Рис. 5

Данные элементов схемы:

$E_1 = 10$ В, $E_2 = 5$ В, $J_4 = (10 + N_{гр})$ мА, $E_5 = 15$ В, $R_2 = (0,2 + 0,1 \cdot N_{ст})$ кОм, $R_3 = 0,3$ кОм, $R_4 = 0,4$ кОм, $R_5 = 0,5$ кОм, $R_6 = 0,6$ кОм, где $N_{гр}$ – последняя цифра номера группы; $N_{ст}$ – номер лабораторного макета (стенда).

2.2. Составить уравнения по методу узловых напряжений. Определить напряжения $V_1 \dots V_4$ (потенциалы узлов) и, используя закон Ома, найти токи $I_1 \dots I_5$ в ветвях схемы и напряжения $U_{R_2} \dots U_{R_6}$ на элементах схемы. Сравнить полученные результаты с результатами расчета методом наложения – при несовпадении проверить расчеты вновь. Результаты расчета записать в таблицу 6.

2.3. Рассчитать мощности, отдаваемые каждым источником E_1, E_2, J_4, E_5 в электрическую цепь и мощности, потребляемые каждым резистором $P_{R_1} \dots P_{R_6}$. Проверить выполнение баланса мощности $P_{ист} = P_{нагр}$.

Таблица 5 Метод наложения

		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	U_{R_2}	U_{R_3}	U_{R_4}	U_{J_4}	U_{R_5}	U_{R_6}
		мА	мА	мА	мА	мА	В	В	В	В	В	В
E_1	Расч.											
	Измер.											
E_2	Расч.											
	Измер.											
J_4	Расч.											
	Измер.											
E_5	Расч.											
	Измер.											
E_1 E_2 J_4 E_5	Расч.											
	Измер.											

Таблица 6 Метод узловых напряжений

		V_1	V_2	V_3	V_4	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
		В	В	В	В	мА	мА	мА	мА	мА
Рассчитано										
Измерено										

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему (рис. 5). Установить заданные значения элементов схемы.

3.1.1. Проверка метода наложения.

– установить $E_1 = 10$ В, $E_2 = 0$, $J_4 = 0$, $E_5 = 0$ и измерить токи в ветвях и напряжения на элементах, создаваемые источником E_1 . Результаты измерений записать в табл. 5;

– установить $E_1 = 0$, $E_2 = 5$ В, $J_4 = 0$, $E_5 = 0$ и измерить токи в ветвях и напряжения на элементах, создаваемые источником E_2 . Результаты измерений записать в табл. 5;

– установить $E_1 = 0$, $E_2 = 0$, $J_4 = (10 + N_{гр})$ мА, $E_5 = 0$ и проделать те же измерения и записи;

– установить $E_1 = 0$, $E_2 = 0$, $J_4 = 0$, $E_5 = 15$ В и проделать те же измерения и записи;

– установить заданные параметры для всех источников и измерить результирующие токи в ветвях схемы и напряжения на элементах и записать результаты измерений в табл. 5.

3.1.2. Метод узловых напряжений.

– в схеме (рис. 5) измерить вольтметром потенциалы узлов $V_1 \dots V_4$ относительно узла, потенциал которого принят равным 0. Сравнить с рассчитанными значениями. Результаты измерений записать в табл. 6;

– измерить амперметром токи $I_1 \dots I_5$ в ветвях схемы. Сравнить с рассчитанными значениями. Результаты измерений записать в табл. 6.

4. Требования к отчету

В отчете должны быть представлены схемы исследуемых цепей, полностью выполненный предварительный расчет методом наложения (в т.ч. и для частичных схем) и методом узловых напряжений, таблицы 5 и 6 рассчитанных и измеренных величин, выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

5.1. Расчет электрических цепей методом наложения.

5.2. Расчет электрических цепей методом узловых напряжений.

5.3. Мощности источников, нагрузок. Баланс мощностей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

«МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА»

1. **Цель работы:** изучение расчета электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжения и методом эквивалентного генератора тока.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Для схемы (рис. 6) в соответствии с данными своего варианта рассчитать ток I_3

- а) методом эквивалентного генератора напряжения;
- б) методом эквивалентного генератора тока.

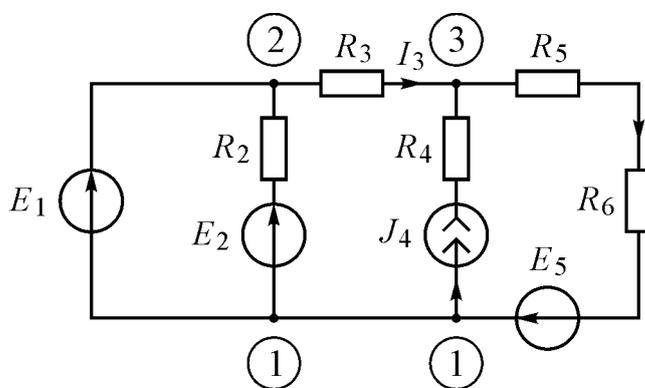


Рис. 6

Данные элементов схемы:

$E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$, $J_4 = (10 + N_{\text{гр}}) \text{ мА}$, $E_5 = 15 \text{ В}$, $R_2 = (0,2 + 0,1 \cdot N_{\text{ст}}) \text{ кОм}$, $R_3 = 0,3 \text{ кОм}$, $R_4 = 0,4 \text{ кОм}$, $R_5 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_6 = 0,6 \text{ кОм}$, где $N_{\text{гр}}$ – последняя цифра номера группы; $N_{\text{ст}}$ – номер лабораторного макета (стенда).

Результаты расчета параметров эквивалентных генераторов – $E_{\text{ЭГ}}$ (или $U_{\text{ХХ}}$), $J_{\text{ЭГ}}$ (или $J_{\text{кз}}$), $R_{\text{ВН ЭГ}}$, тока I_3 в резисторе R_3 занести в таблицу 7.

Таблица 7

	$E_{\text{ЭГ}}$	$J_{\text{ЭГ}}$	$R_{\text{ВН ЭГ}}$	I_3	U_3
	В	мА	кОм	мА	В
Рассчитано					
Измерено					

Сравнить полученное значение тока I_3 с результатом расчетов в лабораторной работе № 3 (т.к. схемы и данные элементов для работ № 3 и № 4 одинаковы).

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему (рис. 6). Установить заданные значения элементов схемы.

– Исключить резистор R_3 (режим ХХ) и измерить вольтметром напряжение холостого хода между узлами 2 и 3 – напряжение $U_{\text{ХХ}}$ (или $E_{\text{ЭГ}}$). Результат измерения записать в таблицу 7. Сравнить с предварительным расчетом.

– Включить между узлами 2 и 3 амперметр (режим КЗ, т.к. $r_A \approx 0$) и измерить ток короткого замыкания $J_{\text{КЗ}} = J_{\text{ЭГ}}$. Результат измерения записать в таблицу 7. Сравнить с предварительным расчетом.

– Определить внутреннее сопротивление эквивалентного генератора по измеренным $U_{\text{ХХ}}$ и $J_{\text{ЭГ}}$:

$$R_{\text{вн ЭГ изм}} = \frac{U_{\text{ХХ изм}}}{J_{\text{ЭГ изм}}}$$

и записать его значение в таблицу 7. Сравнить с предварительным расчетом.

– Включить резистор R_3 заданной величины и измерить амперметром ток I_3 . Записать его значение в таблицу 7. Сравнить с предварительным расчетом.

4. Требования к отчету

В отчете должны быть представлены полностью выполненные расчеты тока I_3 методом ЭГН и ЭГТ, расчетные схемы, таблица 7 рассчитанных и измеренных величин. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

5.1. Порядок расчета электрических цепей методом ЭГН.

5.2. Порядок расчета электрических цепей методом ЭГТ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА»

1. **Цель работы:** исследование разветвленной цепи синусоидального тока. Приобретение навыков расчета цепи символическим методом (методом комплексных чисел).

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Для схемы (рис. 7) в соответствии с данными своего варианта рассчитать комплексные действующие значения токов в ветвях схемы и напряжения на элементах схемы. Модули и фазы рассчитанных величин записать в таблицу 8.

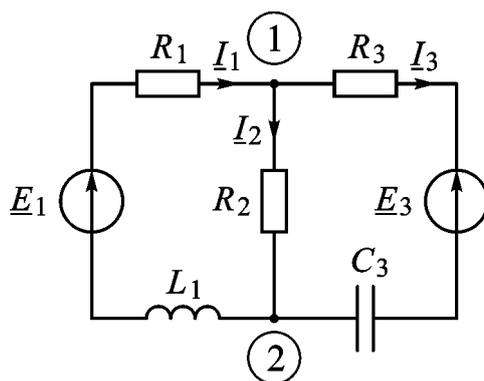


Рис. 7

Данные элементов схемы:

$\underline{E}_1 = (10 + N_{гр}) e^{j0^\circ}$ В, $\underline{E}_3 = 5e^{j90^\circ}$ В, $f = 10$ кГц, $R_1 = 0,1$ кОм, $R_3 = 0,3$ кОм, $L_1 = 1,5915$ мГн, $C_3 = 53,05$ нФ, $R_2 = (0,1 + 0,1 \cdot N_{ст})$ кОм, где $N_{гр}$ – последняя цифра номера группы; $N_{ст}$ – номер лабораторного макета (стенда).

2.2. По результатам расчета выполнить проверку по ЗТК для узла 1 и по ЗНК для контура $\underline{E}_1 R_1 R_3 \underline{E}_3 C_3 L_1$.

2.3. По результатам расчета построить векторные диаграммы токов для узла и напряжений для контура.

2.4. Рассчитать комплексные мощности источников \underline{S}_{E_1} и \underline{S}_{E_3} и мощности нагрузок, проверить выполнение баланса комплексных мощностей.

Таблица 8

	I_1	φ_1	I_2	φ_2	I_3	φ_3	U_{R_1}	φ_{R_1}
	мА	град	мА	град	мА	град	В	град
Рассчит.								
Измер.								
	U_{L_1}	φ_{L_1}	U_{R_2}	φ_{R_2}	U_{R_3}	φ_{R_3}	U_{C_3}	φ_{C_3}
	В	град	В	град	В	град	В	град
Рассчит.								
Измер.								

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему (рис. 7). Установить заданные значения элементов схемы, величины напряжения и начальные фазы источников питания. Установить режим измерения амперметра и вольтметра «АС» (alternating current – «переменный ток»), сопротивление амперметра 1 МОм, сопротивление вольтметра 100 МОм.

3.2. Измерить амперметром действующие значения токов в ветвях схемы, вольтметром – напряжения на элементах схемы. Сравнить измеренные значения с предварительно рассчитанными. Результаты измерений записать в таблицу 8.

3.3. Используя 2-х канальный осциллограф, получить на его экране изображение ЭДС E_1 (имеющей фазу 0°) с помощью канала А, и изображение напряжения U_{L_1} с помощью канала В. По смещению двух изображений (рис. 8) друг относительно друга, составив пропорцию, можно определить фазу φ_{L_1} напряжения U_{L_1} и сравнить его с предварительно рассчитанным.

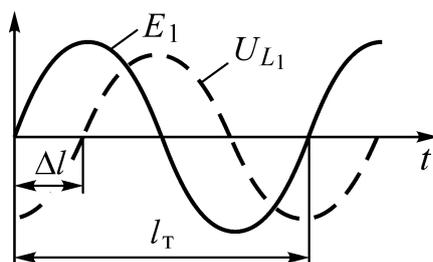


Рис. 8

$$l_T - 360^\circ;$$

$$\Delta l - \varphi_{L_1},$$

$$\text{отсюда } \varphi_{L_1} = -\frac{\Delta l \cdot 360^\circ}{l_T}.$$

4. Требования к отчету

Отчет должен содержать полностью выполненный предварительный расчет, векторные диаграммы токов и напряжений, таблицу 8 рассчитанных и измеренных величин, выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Способы изображения синусоидальных функций времени.
- 5.2. Способы изображения комплексных чисел. Переход от алгебраической формы к показательной и наоборот.
- 5.3. Методы расчета электрических цепей синусоидального тока (законы Ома, Кирхгофа, методы наложения, контурных токов, узловых напряжений, эквивалентного генератора). Векторные диаграммы токов, напряжения.
- 5.4. Мощность в цепи синусоидального тока. Мощности источников, нагрузок. Баланс мощностей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

«ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТУРА»

1. **Цель работы:** исследование режимов резонанса напряжений в последовательном контуре, амплитудно- и фазочастотных характеристик контура, избирательных свойств контура, влияния нагрузки на свойства контура.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Данные элементов схемы (рис. 9):

$U_{\text{вх}} = 1$ В; $L = (10 + N_{\text{гр}})$ мГн; $C = (50 + N_{\text{ст}})$ нФ; $R = 50$ Ом, где $N_{\text{гр}}$ – последняя цифра номера группы, $N_{\text{ст}}$ – номер лабораторного макета (стенда).

Для схемы последовательного контура (рис. 9) в соответствии с данными своего варианта определить:

- резонансную частоту ω_0 , $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$;
- характеристическое сопротивление контура ρ ;
- добротность контура Q ;
- абсолютную полосу пропускания контура S_a ,
- сопротивление контура на частоте резонанса Z_0 ;

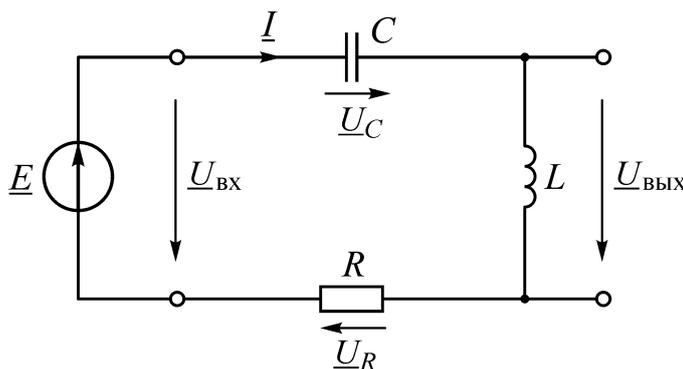


Рис. 9

- $U_{L0} = U_{\text{вых}0}$ – напряжение на выходе контура на частоте резонанса f_0 ;
- U_{R0}, U_{C0} – напряжения на резисторе и конденсаторе на частоте резонанса f_0 .

Результаты предварительного расчета контура для резонансной частоты f_0 записать в таблицу 9.

Таблица 9

ω_0	f_0	ρ	Q	S_a	Z_0	U_{R0}	U_{L0}	U_{C0}
рад/с	Гц	Ом	–	Гц	Ом	В	В	В

Рассчитать частотную характеристику выходного напряжения последовательного контура $U_{\text{ВЫХ}} = U_L = f(f)$ на частотах f_0 , $f_0 \pm S_a/2$, $f_0 \pm 2S_a$, $f_0 \pm 4S_a$, $f = 0$ и $f = 30$ кГц (см. Указания). Результаты расчета записать в таблицу 10. На этих же частотах рассчитать фазу полного сопротивления φ_k . По результатам расчета в масштабе построить графики $U_L = f(f)$, $\varphi_k = f(f)$ в диапазоне частот $0 \div f_0 + 4S_a$. Построить качественно (без расчета) ожидаемые графики $U_R = f(f)$, $U_C = f(f)$.

Указания. Напряжение на катушке индуктивности U_L на любой частоте в пределах полосы пропускания S_a может быть рассчитано по приближенной формуле:

$$U_L = \frac{U_{L0}}{\sqrt{1 + \xi^2}},$$

где $\xi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{X_{\text{э}}}{R} = Q \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \approx 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$ – обобщенная расстройка. То-

гда на частоте: $f_0 \rightarrow \xi = 0$; $f_0 \pm \frac{S_a}{2} \rightarrow \xi = \pm 1$.

Фаза сопротивления последовательного контура φ_k определяется:

$$\varphi_k = \arctg[(X_L - X_C)/R] = \arctg(X_{\text{э}}/R_{\text{э}}) = \arctg \xi.$$

Таблица 10

f , кГц		f_1	$f_0 - 4S_a$	$f_0 - 2S_a$	$f_0 - \frac{S_a}{2}$	f_0	$f_0 + \frac{S_a}{2}$	$f_0 + 2S_a$	$f_0 + 4S_a$	f_9
		0								30
U_L , В ($R_H = \infty$)	Рассч.									
	Измер.									
φ_k , °	Рассч.									
	Измер.									
U_C , В	Измер.									
U_R , В	Измер.									
U_L , В (с нагр.)	Измер.									

3. Экспериментальная часть

3.1. Исследование последовательного контура.

– Собрать схему (рис. 9). Для измерения напряжений U_R , U_L , U_C параллельно каждому элементу включить вольтметры (режим работы «АС» – переменный ток, внутреннее сопротивление $R_V = 100 \text{ МОм}$).

– Установить заданные значения R , L , C , напряжение источника \underline{E} .

– Устанавливая значения частоты f источника (см. таблицу 10) в диапазоне рассчитанных частот, измерить и записать в таблицу 10 значения напряжений U_R , U_L , U_C на элементах схемы.

– Значения фазы полного сопротивления для рассчитанных частот измерить с помощью измерительной линейки прибора «Vode Plotter» (схема подключения изображена на рис. 10). Установить в приборе режим измерения фазы «PHASE»; линейную развертку по вертикали (LIN) с масштабом: min – -135° ; max – $+135^\circ$; линейную развертку по горизонтали (LIN) с масштабом: min – 0,1 мГц; max – 30 кГц. Результаты измерения записать в таблицу 10.

– По результатам измерений построить в масштабе графики $U_{L \text{ измер}}$, $\varphi_{\text{к измер}} = f(f)$, совместив их с расчетными графиками (например, другим цветом).

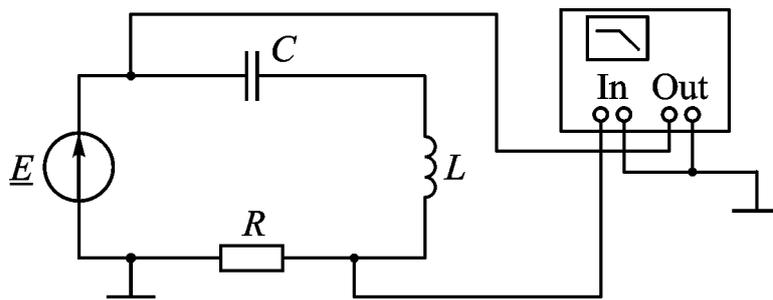


Рис. 10

– Параллельно катушке индуктивности подключить сопротивление нагрузки $R_H = 5 \text{ кОм}$ и исследовать зависимость $U_{L \text{ нагр}} = f(f)$, данные измерений записать в таблицу 10. По результатам измерений построить график.

4. Требования к отчету

В отчете должны быть приведены требуемые расчеты, таблицы расчетов и измерений, расчетные и экспериментальные графики, построенные совместно или раздельно, но в одном масштабе, выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

5.1. Объяснить вид частотных характеристик последовательного контура.

- 5.2. Как влияет добротность контура на его избирательные свойства.
- 5.3. Почему резонанс в последовательном контуре называется резонансом напряжений? Условие резонанса.
- 5.4. Почему последовательный контур должен работать с источником напряжения?
- 5.5. Как влияют нагрузка и внутреннее сопротивление генератора на резонансные свойства последовательного контура?
- 5.6. Применение последовательного контура как избирательной системы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

«ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА»

1. **Цель работы:** исследование переходных процессов в электрических цепях с одним реактивным элементом.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Данные элементов схемы (рис. 11):

$E = 1$ В; $R_1 = (100 + 10 \cdot N_{гр})$ Ом, $R_2 = (200 + 10 \cdot N_{ст})$ Ом, $C = 30$ нФ, $L = 2$ мГн, где $N_{гр}$ – последняя цифра номера группы, $N_{ст}$ – номер лабораторного макета (стенда).

Для двух схем (рис. 11) в соответствии с данными своего варианта определить для двух случаев:

- а) замыкание ключа;
- б) размыкание ключа

напряжения $u_{R_1}(t)$, $u_{R_2}(t)$ и $u_C(t)$ – для цепи RC ;

$u_{R_1}(t)$, $u_{R_2}(t)$, $u_L(t)$ – для цепи RL (см. указания).

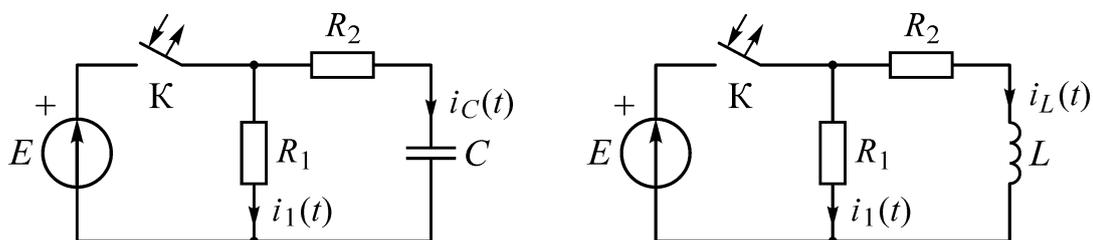


Рис. 11

По результатам расчета построить в одном масштабе 1 В/см и 10 мкс/см графики рассчитанных величин, разместив их один под другим и отметив моменты замыкания и размыкания ключа.

Указания. Любой ток $i(t)$ и напряжение $u(t)$ при возникновении переходных процессов в цепях 1-го порядка (т.е. в цепях с одним реактивным элементом L или C) подчиняется общей формуле:

$$f(t) = f_{пр} + f_{св}(t) = f_{пр} + Ae^{Pt} = f_{пр} + [f(0_+) - f_{пр}]e^{Pt}.$$

Следовательно, для получения функции времени $i(t)$, $u(t)$, описывающей закон изменения тока или напряжения и построения графиков необходимо знать значение тока (напряжения) в 3 момента времени: $t(0_-)$ – значение тока (напряжения) в установившемся режиме до коммутации; $t(0_+)$ –

значение тока (напряжения) в момент коммутации; $t(\infty)$ – значение тока (напряжения) в установившемся режиме после коммутации. Расчетные значения для RC -цепи свести в таблицу 11, для RL -цепи – в таблицу 12.

Корень характеристического уравнения p определяется:

$$p = -\frac{1}{CR_{\text{экв}C}} \text{ – для цепи } RC;$$

$$p = -\frac{R_{\text{экв}L}}{L} \text{ – для цепи } RL, \text{ где } R_{\text{экв}C}, R_{\text{экв}L} \text{ – эквивалентное сопротивление}$$

схемы для цепи после коммутации, рассчитанное относительно C или L .

Таблица 11

		Замыкание ключа			Размыкание ключа		
		$t(0_-)$	$t(0_+)$	$t(\infty)$	$t(0_-)$	$t(0_+)$	$t(\infty)$
U_{R_1}	Рассч.						
	Измер.						
U_{R_2}	Рассч.						
	Измер.						
U_C	Рассч.						
	Измер.						

Таблица 12

		Замыкание ключа			Размыкание ключа		
		$t(0_-)$	$t(0_+)$	$t(\infty)$	$t(0_-)$	$t(0_+)$	$t(\infty)$
U_{R_1}	Рассч.						
	Измер.						
U_{R_2}	Рассч.						
	Измер.						
U_L	Рассч.						
	Измер.						

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать заданную схему (рис. 11) и установить значения элементов схемы согласно своего варианта.

В качестве ключа «К» использовать контакты электромагнитного ключа,

подключив к обмотке электромагнита генератор прямоугольного напряжения с амплитудой напряжения $U_m = 10$ В и частотой $f_r = 10$ кГц (рис. 12).

– Подключая поочередно осциллограф к элементам схемы, зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений $U_{R_1}(t)$, $U_{R_2}(t)$, $U_C(t)$, $U_L(t)$.

– Измерить значения напряжений в моменты времени $t(0_-)$, $t(0_+)$, $t(\infty)$, сравнить их с данными предварительного расчета и записать в таблицу 11.

– Измерить время переходного процесса $t_{пер}$ на уровне $0,1U_{max}$ или $0,9U_{max}$ при замыкании и размыкании ключа «К» и сравнить с данными предварительного расчета.

– Уменьшить значение C (или L) в 2 раза и зарисовать осциллограммы напряжений $U_{R_1}(t)$, $U_{R_2}(t)$, $U_C(t)$, $U_L(t)$ для этого случая, разместив их на предыдущих осциллограммах (показать, например, другим цветом, штрихом). Объяснить полученную в осциллограммах разницу.

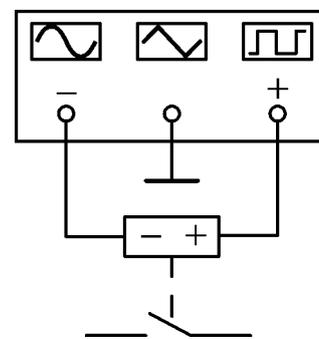


Рис. 12

4. Требования к отчету

В отчете должны быть представлены полностью выполненный предварительный расчет 2-х переходных процессов – при замыкании и размыкании ключа, получены выражения тока и напряжений, построены графики (расчетные и экспериментальные), выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Понятие переходных процессов.
- 5.2. Порядок расчета переходных процессов в электрических цепях (классический, операторный метод).
- 5.3. Влияние параметров элементов схемы на характеристику переходных процессов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

«РЕАКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СИГНАЛА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ» (временной метод)

1. **Цель работы:** изучение методов определения реакции электрической цепи (отклика) на воздействие сигнала произвольной формы.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Данные элементов схемы (рис. 13, *a-h*) приведены в табл. 13. Входной сигнал изображен на рис. 14.

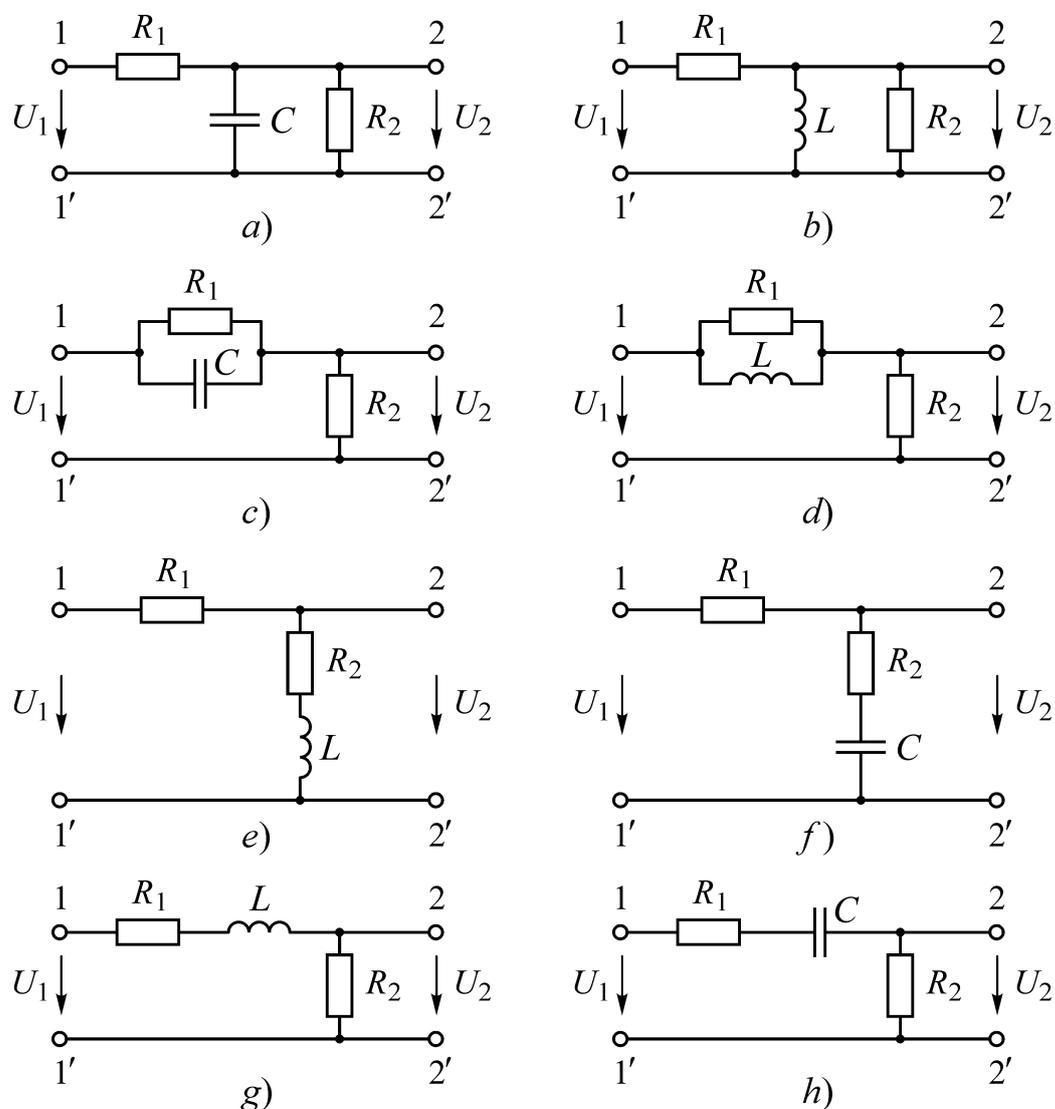


Рис. 13

Таблица 13

Номер варианта (стенда)	Схема рис. 15	L , мГн	C , нФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм
1	<i>a</i>	–	151	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
2	<i>b</i>	52	–	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
3	<i>c</i>	–	153	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
4	<i>d</i>	54	–	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
5	<i>e</i>	55	–	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
6	<i>f</i>	–	156	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
7	<i>g</i>	57	–	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
8	<i>h</i>	–	158	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
9	<i>a</i>	–	159	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
10	<i>b</i>	60	–	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
11	<i>c</i>	–	161	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
12	<i>d</i>	62	–	1	$1+0,1 \cdot N_{гр}$
13	<i>e</i>	63	–	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
14	<i>f</i>	–	164	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
15	<i>g</i>	65	–	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$
16	<i>h</i>	–	166	0,25	$0,25+0,01 \cdot N_{гр}$

$N_{гр}$ – последняя цифра номера группы

2.2. Для заданной цепи (рис. 13) и входного сигнала (рис. 14), в соответствии с данными своего варианта (таблица 13) определить:

– переходную характеристику цепи по напряжению $g_{U_2}(t)$;

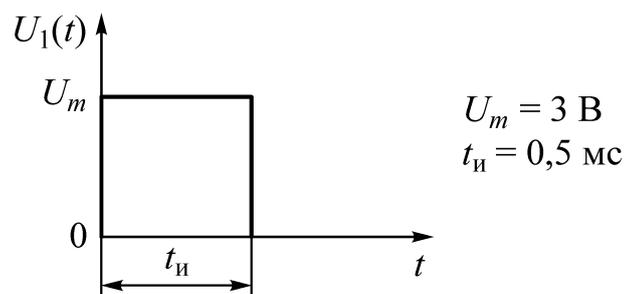


Рис. 14

– реакцию цепи $U_2(t)$ на заданное воздействие $U_1(t)$, используя интеграл Дюамеля;

– построить график $U_2(t)$ для заданного воздействия $U_1(t)$. Расчет значений $U_2(t)$ производить для значений времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau$ при включении прямоугольного импульса и для $t = 0,5 \text{ мс}, 0,5 \text{ мс} + \tau, 0,5 \text{ мс} + 2\tau, 0,5 \text{ мс} + 3\tau, 0,5 \text{ мс} + 4\tau$ при выключении прямоугольного импульса, где τ – постоянная времени цепи;

– данные расчета $U_2(t)$ свести в таблицу 14 и по ним построить график $U_2(t)$.

Таблица 14

$t, \text{ мс}$	0	τ	2τ	3τ	4τ	0,5	$0,5 + \tau$	$0,5 + 2\tau$	$0,5 + 3\tau$	$0,5 + 4\tau$
	0									
$U_1(t)$										
$U_2(t)$ рассч.										
$U_2(t)$ измер.										

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать заданную схему (рис. 13) и установить значения элементов схемы согласно своего варианта.

Схема подключения входного сигнала $U_1(t)$ изображена на рис. 15. Функциональный генератор (ФГ) включить в режим прямоугольного напряжения и установить амплитуду напряжения (Amplitude) 1,5 В, смещение (Offset) 1,5 В, частоту f 1 кГц.

Примечание: в ФГ десятые доли величин вводить через запятую.

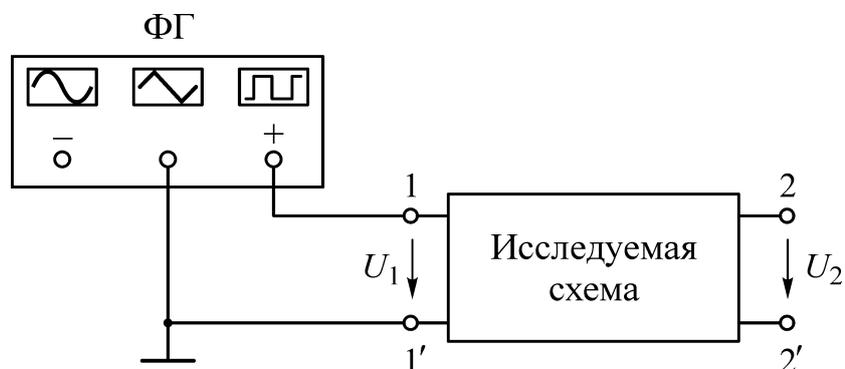


Рис. 15

– Подключить канал А осциллографа ко входу цепи, канал В к выходу исследуемой цепи (время развертки по оси x – 0,1 мс/дел, развертка по оси y – 1 В/дел).

– Измерить значения напряжения $U_2(t)$ в выбранные моменты времени ($0 \div 1$ мс). Данные измерений записать в табл. 14.

– Построить график $U_2(t)$, разместив его на графике, построенном в предварительном расчете. Сравнить полученные результаты.

3.2. Увеличить значение сопротивления R_1 в 2 раза. Зарисовать $U_2(t)$ на тех же графиках (например, другим цветом).

3.3. Уменьшить значение сопротивления R_1 в 2 раза. Зарисовать $U_2(t)$ на тех же графиках (например, другим цветом). Проанализировать и объяснить полученные результаты.

4. Требования к отчету

- В отчете должны быть представлены:
- расчет переходной характеристики цепи;
 - расчеты реакции цепи $U_2(t)$ на воздействие $U_1(t)$, сведенные в таблицу;
 - совмещенные графики расчетного $U_2(t)$ и экспериментального $U_2(t)$, построенные в одном масштабе (при заданных параметрах и при измененных R);
 - выводы.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Понятие переходных характеристик цепей. Определение их классическим и операторным методом.
- 5.2. Импульсные характеристики цепи. Методы их расчета.
- 5.3. Расчет реакций цепей на сигнал любой формы с помощью интеграла Дюамеля, интеграла наложения.
- 5.4. Дифференцирующие и интегрирующие цепи. Применение их в электрических цепях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

«РЕАКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СИГНАЛА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ» (частотный метод)

1. **Цель работы:** изучение амплитудных и фазовых спектров сигналов, амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик цепи, прохождение сигналов через цепь, спектрального метода расчета

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Схема, данные элементов схемы и параметры сигнала соответствуют данным лабораторной работы № 8.

2.2. Для заданной цепи (рис. 13), в соответствии с данными своего варианта (таблица 13) выполнить:

– рассчитать амплитудный спектр $U_1(f)$ входного сигнала (до 10 гармоники включительно) по формулам:

Постоянная составляющая:

$$U_{(0)} = U_m \frac{t_{\text{и}}}{T} = \frac{U_m}{q},$$

где $q = T/t_{\text{и}}$ – скважность.

Действующее значение n -й гармоники:

$$U_{(n)} = \frac{2}{\sqrt{2}T} U_m t_{\text{и}} \frac{\sin \frac{n\omega t_{\text{и}}}{2}}{\frac{n\omega t_{\text{и}}}{2}} = \frac{1,414 U_m}{q} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi n f t_{\text{и}}}{2}}{\frac{2\pi n f t_{\text{и}}}{2}}, \quad n=1, 2, \dots, 10.$$

Учитывая исходные данные $q = T/t_{\text{и}} = 1 \text{ мс}/0,5 \text{ мс} = 2$, $2\pi = 6,283$, $t_{\text{и}}/2 = 0,5 \text{ мс}/2 = 0,25 \text{ мс}$, $f = 1000 \text{ Гц}$ получим расчетные формулы

$$U_{(0)} = U_m \cdot 0,5 \text{ [В]},$$

$$U_{(n)} = 0,707 \cdot U_m \frac{\sin(n \cdot 1,571) \text{ (рад)}}{n \cdot 1,571}, \quad n=1, 2, \dots, 10 \text{ [В]}.$$

Данные расчета записать в таблицу 15.

– получить формулу амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цепи и рассчитать ее на частотах 0, 1, 2, ..., 10 кГц. Данные расчета записать в таблицу 15.

– рассчитать амплитудный спектр $U_2(f)$ выходного сигнала (до 10 гармоники включительно) по формулам:

$$U_2(f) = U_1(f)H(f), \text{ т.е. } U_{2(n)}(f) = U_{1(n)}(f)H_{(n)}(f).$$

Таблица 15

		$f, \text{кГц}$										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_1, \text{В}$	расч.											
	измер.											
H	расч.											
	измер.											
$U_2, \text{В}$	расч.											
	измер.											

Данные расчета записать в таблицу 15.

– построить в масштабе графики амплитудного спектра, входного и выходного сигналов, амплитудно-частотной характеристики цепи.

3. Экспериментальная часть

Собрать заданную схему, установить заданные значения и вынести на рабочее поле дополнительные приборы согласно рис. 16. Функциональный генератор (ФГ) установить в режим прямоугольного напряжения с амплитудой напряжения (Amplitude) 1,5 В, смещением (Offset) 1,5 В и частотой 1 кГц.

Примечание: в ФГ десятые доли величин вводить через запятую.

3.1. Исследование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цепи.

Подключить прибор «Vode-Plotter» (рис. 16) к исследуемой цепи, т.е. клеммы «In» прибора подключить к точкам 1–1', клеммы «Out» к зажимам 2–2'. Установить в приборе линейный масштаб по вертикали с пределами: min – 0, max – 1; по горизонтали: min – 0,1 мГц, max – 10 кГц. С помощью измерительной линейки на частотах 0, 1, 2, ..., 10 кГц измерить и записать значения передаточной функции H в таблицу 15. Отключить прибор от исследуемой цепи.

3.2. Исследование формы и амплитудного спектра входного сигнала $U_1(t)$.

3.2.1. Подключить к точкам 1–1' цепи осциллограф (канал А) и зарисовать форму входного сигнала (масштаб осциллографа: 1 В/дел; 0,1 мс/дел).

3.2.2. Подключить к точке 1 вход анализатора спектра (АС), измерить вольтметрами и записать в таблицу 15 значения отдельных спектральных составляющих входного сигнала.

Примечание: так как скважность $q = T/t_{и} = 1/0,5 = 2$, то гармоники кратные скважности – 2, 4, 6 и т.д. – отсутствуют и показания вольтметров для этих гармоник равны 0.

3.2.3. Подключить осциллограф к выходу сумматора (SUM) и убедиться в полном восстановлении формы входного сигнала $U_1(t)$ при сложении спектральных составляющих (время восстановления сигнала 3...4 мин).

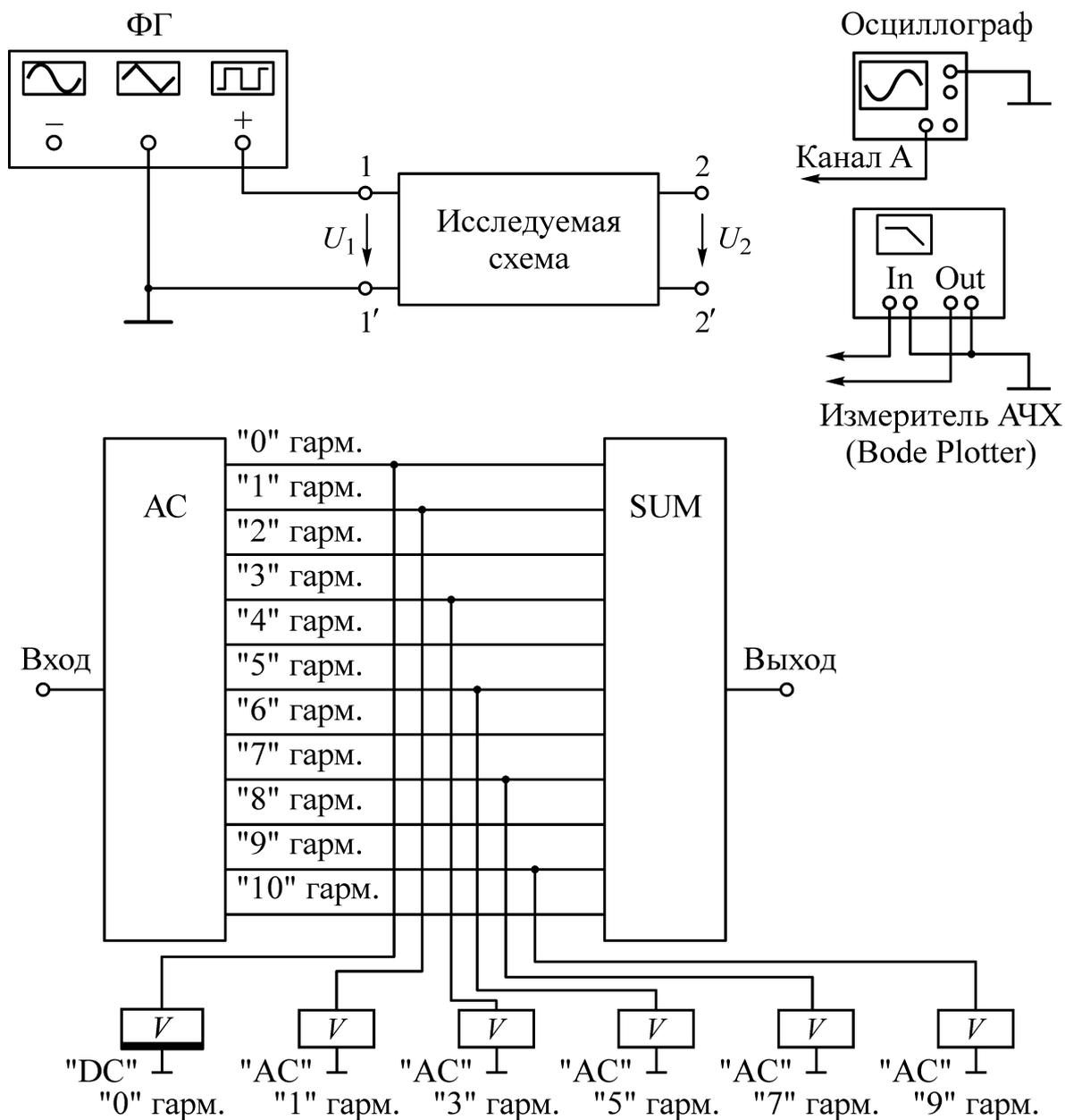


Рис. 16

3.3. Исследование формы и амплитудного спектра выходного сигнала $U_2(t)$.

3.3.1. Подключить к точкам 2–2' цепи осциллограф (канал А) и зарисовать форму выходного сигнала $U_2(t)$.

3.3.2. Подключить к точке 2 вход анализатора спектра (АС), измерить вольтметрами и записать в таблицу 15 значения отдельных спектральных составляющих входного сигнала.

3.3.3. Подключить осциллограф к выходу сумматора (SUM) и убедиться в полном восстановлении формы входного сигнала $U_2(t)$ при сложении спектральных составляющих (время восстановления сигнала 3...4 мин).

4. По результатам измерений в одном масштабе и на одном графике построить амплитудный спектр входного сигнала $U_1(f)$, амплитудный спектр выходного сигнала $U_2(f)$ для частот 0, 1, 2, ..., 10 кГц. Для этих же частот на другом графике построить АЧХ цепи $H(f)$.

4. Требования к отчету

Отчет по работе должен содержать:

– расчетные формулы и результаты предварительных расчетов в виде таблиц и графиков АЧХ и амплитудных спектров входного и выходного сигналов;

– результаты измерений в виде таблиц, осциллограмм, графиков, построенных в масштабе;

– выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

5.1. Как определяется комплексная передаточная функция цепи?

5.2. На какие составляющие можно разложить любой периодический сигнал?

5.3. Как рассчитываются постоянная составляющая, основная составляющая и высшие гармоники периодического сигнала?

5.4. В чем суть анализа спектрального состава периодических сигналов?

5.5. Как изменение параметров периодического сигнала влияет на его спектр?

Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. Учебник – М.: Радио и связь, 2000 – 589 с.
2. Бакалов В.П., Воробийенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1998. – 494 с.
3. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники. – М.: Радио и связь, 1989. – 528 с.
4. Шебес М.Р., Каблукова Н.В. Задачник по теории электрических цепей: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.
5. Воробийенко П.П. Теория электрических цепей. Сборник задач и упражнений. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.

**Валерий Пантелеевич Бакалов
Виктор Дмитриевич Чирков
Наталья Михайловна Гусельникова**

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ
Часть 1

Методические указания
к компьютерным лабораторным работам

2-е изд., переработанное и дополненное

Редактор: О.Б. Журавлева
Корректор: Д.С. Шкитина

Подписано в печать
формат бумаги 62x84 1/16, отпечатано на ризографе, шрифт № 10,
изд. л. , заказ № , тираж – 600, типография СибГУТИ
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86