

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**

*ЧАСТЬ 1*

**ОМСК 2018**

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

*Часть 1*

Утверждено методическим советом университета

Омск 2018

УДК 621.3 (075.8)  
ББК 31.21я73  
К89

**Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».** Часть 1 / А. А. Кузнецов, Т. В. Ковалева, Н. В. Пашкова, А. В. Пономарев, А. Ю. Тэттэр, В. Ю. Тэттэр; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. 50 с.

Разработано в соответствии с программой дисциплины «Теоретические основы электротехники». Включает в себя краткие теоретические сведения, порядок выполнения и оформления лабораторных работ по теме «Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока», а также контрольные вопросы к их защите.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления бакалавриата «Электроэнергетика и электротехника», специальности «Системы обеспечения движения поездов», а также для специализаций «Электрический транспорт железных дорог» и «Высокоскоростной наземный транспорт» специальности «Подвижной состав железных дорог» при изучении дисциплины «Электротехника и электроника».

Библиогр.: 4 назв. Табл. 17. Рис. 24.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор Л. Н. Степанова;  
доктор техн. наук, профессор К. И. Никитин;  
доктор техн. наук, профессор В. В. Харламов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
Лабораторная работа 1. Измерения приборами лабораторного стенда .....	7
1.1. Общие сведения.....	7
1.2. Порядок выполнения работы.....	7
1.3. Контрольные вопросы.....	9
1.4. Содержание отчета.....	9
1.5. Протокол измерений .....	9
Лабораторная работа 2. Линейная электрическая цепь постоянного тока .....	11
2.1. Общие сведения.....	12
2.2. Порядок выполнения работы.....	13
2.3. Контрольные вопросы.....	14
2.4. Содержание отчета.....	14
2.5. Протокол измерений .....	15
Лабораторная работа 3. Определение эквивалентных параметров пассивных двухполюсников .....	16
3.1. Общие сведения.....	16
3.2. Порядок выполнения работы.....	18
3.3. Контрольные вопросы.....	19
3.4. Содержание отчета.....	19
3.5. Протокол измерений .....	21
Лабораторная работа 4. Цепь синусоидального тока .....	21
4.1. Общие сведения.....	21
4.2. Порядок выполнения работы.....	23
4.3. Контрольные вопросы.....	24
4.4. Содержание отчета.....	25
4.5. Протокол измерений .....	25
Лабораторная работа 5. Цепь синусоидального тока с индуктивно связанными элементами .....	27
5.1. Общие сведения.....	27
5.2. Порядок выполнения работы.....	30
5.3. Контрольные вопросы.....	31
5.4. Содержание отчета.....	31
5.5. Протокол измерений .....	32

Лабораторная работа 6. Резонанс в цепи с последовательно соединенными элементами с параметрами $R, L, C$ .....	33
6.1. Общие сведения.....	34
6.2. Порядок выполнения работы .....	36
6.3. Контрольные вопросы.....	37
6.4. Содержание отчета .....	38
6.5. Протокол измерений .....	38
Лабораторная работа 7. Резонансные характеристики цепи с последовательно соединенными элементами с параметрами $R, L, C$ .....	40
7.1. Общие сведения .....	40
7.2. Порядок выполнения работы .....	41
7.3. Контрольные вопросы .....	42
7.4. Содержание отчета .....	43
7.5. Протокол измерений .....	43
Лабораторная работа 8. Режим резонанса при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора .....	44
8.1. Общие сведения.....	45
8.2. Порядок выполнения работы .....	46
8.3. Контрольные вопросы .....	47
8.4. Содержание отчета .....	47
8.5. Протокол измерений .....	47
Библиографический список .....	49

## ВВЕДЕНИЕ

### **В.1. Общие указания и правила выполнения лабораторных работ**

Выполнение лабораторных работ – важная часть учебного процесса, преследующая цель более глубокого усвоения теоретических положений изучаемой дисциплины и приобретения навыков исследовательской работы.

В первом семестре изучения ТОЭ выполняются работы по теме «Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока».

Настоящее учебно-методическое пособие разработано в соответствии с методическими указаниями к проведению лабораторных работ на стенде «Теория электрических цепей» [4].

Перед началом выполнения лабораторных работ студенты должны изучить правила и технику безопасности работы в лаборатории.

Прежде чем приступить к выполнению работы, студент должен ознакомиться с соответствующими указаниями, изучить теоретический материал темы, к которой относится данная работа, ясно представлять поставленную в работе задачу, способы ее решения и ожидаемые результаты и заранее подготовить *протокол измерений* к лабораторной работе.

Правильность получаемых экспериментальных результатов зависит от соответствия собранной электрической цепи схеме замещения, приведенной в протоколе измерений.

Если собираются сложные схемы, следует придерживаться определенного порядка: сначала последовательно соединяются цепи всех приборов с соответствующей аппаратурой, а затем добавляются все параллельные цепи приборов и аппаратура, относящаяся к ним. При соединении элементов цепи и измерительных приборов рекомендуется подключать к гнездам не более двух проводников. Соединяя элементы цепи, следует обратить внимание на соответствие включения зажимов приборов собираемой схеме. В работах, содержащих источники постоянного напряжения, необходимо обращать внимание на полярность подключения приборов.

**Обращение с приборами и оборудованием требует большой осторожности и внимательности. Подавать напряжение для выполнения опыта можно только после проверки собранной схемы преподавателем.**

## **В.2. Составление протокола измерений**

После выполнения каждой работы студент подписывает протокол измерений у преподавателя. Подписанный преподавателем протокол измерений хранится у студента до момента сдачи отчета по лабораторной работе. Протокол измерений надо вести с особой тщательностью, так как он является единственным документом, остающимся после окончания экспериментов.

Если проведение опыта требует выполнения предварительных расчетов, то в протоколе должны быть указаны формулы, по которым они производились, и числовые значения, подставленные в формулы.

После выполнения каждого пункта работы рекомендуется производить хотя бы ориентировочно требуемые расчеты и построения. Это дает возможность установить правильность проведения опыта.

**Результаты измерений предъявляются для просмотра преподавателю до разборки схемы исследуемой цепи.** Если результаты наблюдений оказываются неудовлетворительными, то опыт необходимо повторить.

## **В.3. Составление отчета**

Оформляется отчет в соответствии с содержанием, приведенным в каждой работе, и стандартом СТП ОмГУПС-1.2-2005 – «Общие требования и правила оформления текстовых документов» на основе данных из протокола измерений и соответствующих вычислений и построений.

На векторных диаграммах должны быть приведены масштабы соответствующих величин, например, тока и напряжения. Масштаб на векторных диаграммах обозначается указанием масштабного коэффициента. Например, если на диаграмме напряжений отрезку 1 см соответствует 5 В, то следует писать:  $m_U = 5 \text{ В/см}$ ; если на диаграмме токов отрезку 1 см соответствует 0,1 А, то следует писать:  $m_I = 0,1 \text{ А/см}$ .

**Отчет с обязательными ответами на контрольные вопросы и протоколом измерений представляется преподавателю к следующему лабораторному занятию.**

## ИЗМЕРЕНИЯ ПРИБОРАМИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Цель работы: измерение тока, напряжения и мощности приборами лабораторного стенда; экспериментальная проверка эквивалентных преобразований пассивных двухполюсников.

### 1.1. Общие сведения

Электрический ток, напряжение и мощность являются основными физическими величинами, характеризующими электромагнитные процессы в электрической цепи.

Напряжение на участке электрической цепи измеряется вольтметром, включенным параллельно этому участку.

Ток цепи измеряется амперметром, включенным последовательно с цепью.

Мощность измеряется ваттметром. Токовая цепь ваттметра включается последовательно с цепью, а цепь напряжения ваттметра – параллельно. Схема включения вольтметра  $V$ , амперметра  $A$  и ваттметра  $W$  показана на рис. 1.1.

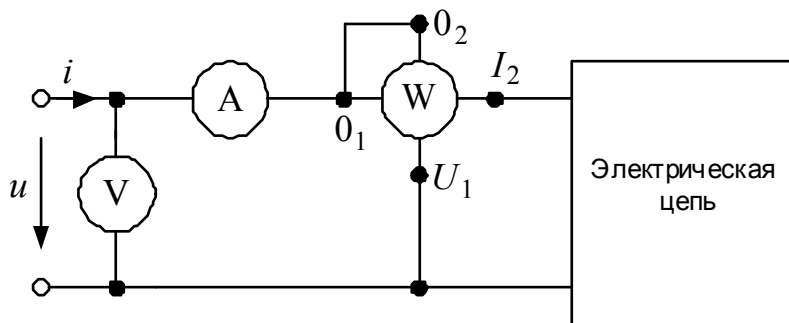


Рис. 1.1. Схема включения измерительных приборов

Ток и напряжение на участке электрической цепи с резистивным элементом  $R$  связаны законом Ома:  $I = U/R$ . Мощность  $P = I^2 R$ .

### 1.2. Порядок выполнения работы

Лабораторная работа состоит из двух частей, в которых выполняются измерения в цепях постоянного и синусоидального тока. При постоянном токе исследуется последовательное и параллельное соединения сопротивлений.



### 1.2.1. Измерения в цепи постоянного тока

В первой части работы измерительными приборами из блока *Цифровые индикаторы* (тумблеры  $SA1$ ,  $SA2$  – в положении «=») выполняют измерения в цепи постоянного тока.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1.2 протокола измерений.

2) Установить в блоке *Модуль резисторов* сопротивления  $R_1 = 100 - 330 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 68 - 330 \text{ Ом}$ . Занести значения сопротивлений в табл. 1.1 протокола измерений.

3) Включить тумблеры  $QF$  блока *Модуль питания* и  $SA1$  источника  $UZ1$ .

4) Приборами  $PA1$  и  $PV1$  блока *Цифровые индикаторы* постоянного тока измерить ЭДС  $E$ , напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , ток  $I$ . Измеренные значения занести в табл. 1.1.

5) Выключить тумблер  $SA1$  источника  $UZ1$ .

6) Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.

7) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1.3.

8) Установить в блоке *Модуль резисторов* сопротивления  $R_1 = 150 - 330 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 150 - 330 \text{ Ом}$  (значения занести в табл. 1.2).

9) Включить тумблер  $SA3$  источника  $UZ4$ . Установить регулятором напряжения блока *Модуль питания*  $UZ4$  величину  $E = 3 - 10 \text{ В}$ .

10) Приборами блока *Цифровые индикаторы* постоянного тока измерить ЭДС  $E$ , токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ . Измеренные значения занести в табл. 1.2.

11) Выключить тумблер  $SA3$  источника  $UZ4$ .

12) Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.

### 1.2.2. Измерения в цепи синусоидального тока

Во второй части работы используют источник  $UZ3$  регулируемого по величине переменного напряжения блока *Модуль питания* и измерительные приборы из блоков *Модуль измерителя фазы* и *Цифровые индикаторы* переменного тока (тумблеры  $SA1$  и  $SA2$  – в положении «~»).

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1.4. Тумблер  $SA2$  модуля *Измеритель фазы* установить в положение  $I_2$ .

- 2) Установить в блоке *Модуль резисторов* сопротивление  $R_1 = 100 - 330 \text{ Ом}$ . Занести значение сопротивления в табл. 1.3.
- 3) Установить регулятором напряжения блока *Модуль питания*  $UZ3$  величину  $U = 3...7 \text{ В}$ .
- 4) Приборами модуля *Измеритель фазы* измерить напряжение  $U$ , ток  $I$ , активную мощность  $P$ . Ток  $I$  также измерить амперметром  $PA1$  блока *Цифровые индикаторы* переменного тока. Напряжение  $U_1$  измерить вольтметром  $V$  блока *Модуль мультиметров*. Измеренные значения занести в табл. 1.3.
- 5) Выключить тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*.
- 6) Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.
- 7) Ответить на контрольные вопросы.
- 8) Утвердить протокол измерений у преподавателя.

### 1.3. Контрольные вопросы

- 1) Как формулируются законы Ома и Кирхгофа?
- 2) Как определить эквивалентные сопротивления при последовательном  $R_{Э1}$  и параллельном  $R_{Э2}$  соединении двух резисторов  $R_1$  и  $R_2$ ?
- 3) Как определить мощность, выделяемую в резисторе, если известны сопротивление резистора  $R$  и:
  - ток резистора  $I$ ;
  - напряжение на резисторе  $U$ ?

### 1.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений.
- 2) Ответы на контрольные вопросы.

### 1.5. Протокол измерений

#### 1.5.1. Опыт 1. «Последовательное соединение в цепи постоянного тока»

Т а б л и ц а 1.1

Результаты измерений для опыта 1

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$E, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$U_1, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$

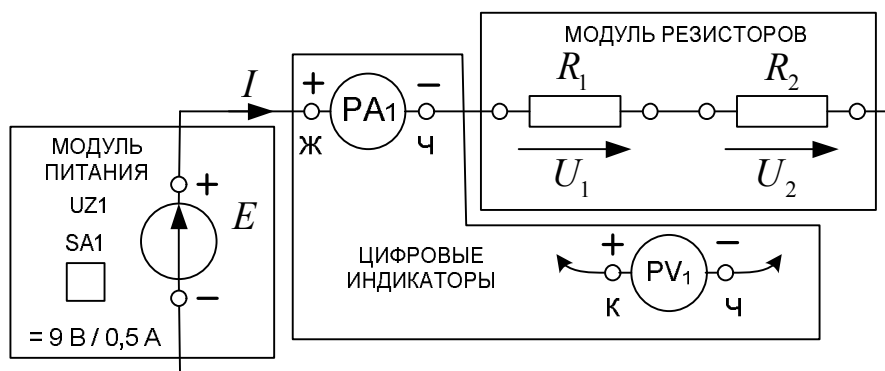


Рис. 1.2. Схема опыта 1

1) Проверка уравнения второго закона Кирхгофа:  $U_1 + U_2 = E$ ,

2) Расчет по закону Ома величин сопротивлений:

$$R_1 = U_1 / I = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}; \quad R_2 = U_2 / I = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$$

3) Эквивалентное сопротивление цепи:  $R = E / I = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$

4) Проверка выражения:  $R = R_1 + R_2$ ,  $R = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$

#### 1.5.2. Опыт 2. «Параллельное соединение в цепи постоянного тока»

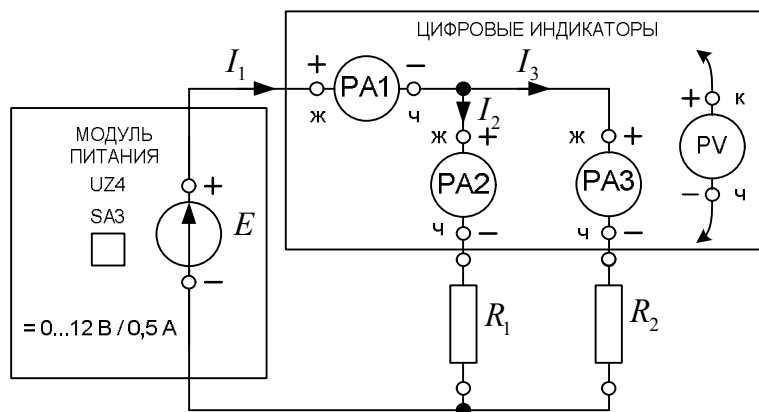


Рис. 1.3. Схема опыта 2

Т а б л и ц а 1.2

Результаты измерений для опыта 2

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$E$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА

1) Проверка уравнения первого закона Кирхгофа:  $I_2 + I_3 = I_1$ ,

2) Расчет по закону Ома величин сопротивлений:

$$R_1 = E/I_2 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}; \quad R_2 = E/I_3 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$$

3) Эквивалентное сопротивление цепи:  $R = E/I_1 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$

4) Проверка выражения  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ :  $R = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$

### 1.5.3. Опыт 3. «Измерения в цепи синусоидального тока»

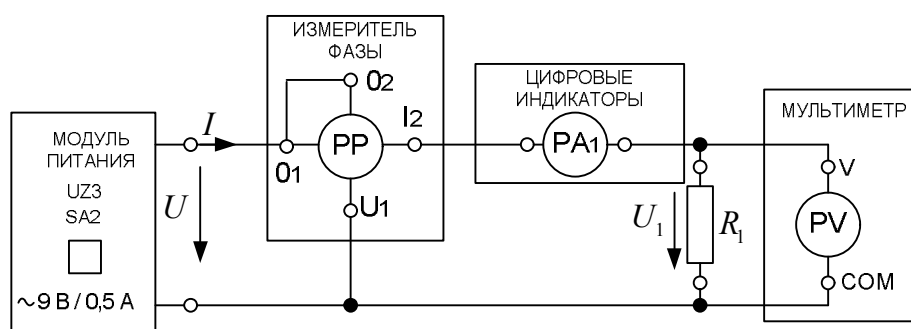


Рис. 1.4. Схема опыта 3

Таблица 1.3

Результаты измерений для опыта 3

$R_1, \text{ Ом}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$		$P, \text{ Вт}$	$U_1, \text{ В}$
		$PP$	$PA1$		

1) Расчет по закону Ома сопротивления:  $Z_1 = R_1 = U_1/I = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$

2) Расчет суммарного внутреннего сопротивления  $R_{\text{вн}}$  амперметра  $PA_1$  и

Измерителя фазы  $PP$ :  $R_{\text{вн}} = \frac{U - U_1}{I} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$

3) Расчет мощности:  $P_{\text{ист}} = UI = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Вт};$

$$P_{\text{потр}} = I^2 (R_1 + R_{\text{вн}}) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Вт}.$$

## Лабораторная работа 2

### ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальная проверка законов Кирхгофа, принципов наложения, взаимности и метода эквивалентного генератора.

## 2.1. Общие сведения

Законы Кирхгофа являются основными законами электрических цепей.

**Первый закон Кирхгофа** устанавливает связь между токами ветвей, подключенных к узлу цепи: *алгебраическая сумма токов ветвей, подключенных к узлу электрической цепи, равна нулю (или: сумма подходящих к узлу токов равна сумме токов, отходящих от узла).*

**Второй закон Кирхгофа** устанавливает связь между ЭДС и напряжениями в контуре электрической цепи: *алгебраическая сумма напряжений на пассивных элементах контура равна алгебраической сумме ЭДС этого контура.*

**Принцип наложения** применим к линейным электрическим цепям и формулируется следующим образом: *ток ветви разветвленной линейной электрической цепи с несколькими источниками равен алгебраической сумме токов, вызываемых в этой ветви действием каждого источника в отдельности.*

**Принцип взаимности** справедлив в линейной электрической цепи с одним источником и заключается в следующем: *если ЭДС  $E_1 = E$ , действуя в ветви 1 сколь угодно сложной цепи, вызывает в другой ветви 2 ток  $I_2 = I$ , то такая же ЭДС  $E_2 = E$ , действуя в ветви 2, вызовет в ветви 1 ток  $I_1 = I$ .* Если же ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  различны, то соблюдается равенство:

$$I_2 / I_1 = E_1 / E_2. \quad (2.1)$$

**Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)** позволяет определить ток в любой ветви  $ab$  линейной цепи, заменив часть цепи (активный двухполюсник **A** на рис. 2.1, а) по отношению к данной ветви эквивалентным генератором, состоящим из ЭДС  $E_r$  и внутреннего сопротивления  $R_r$  (рис. 2.1, б).

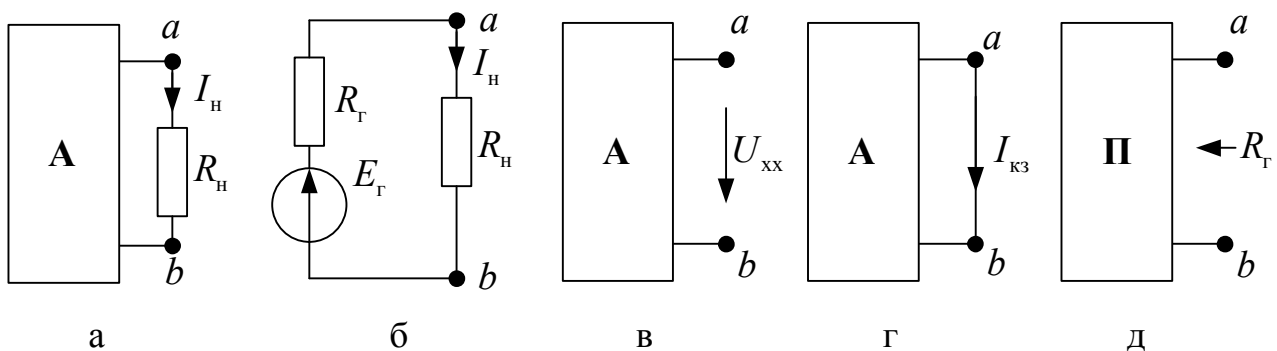


Рис. 2.1. Иллюстрация метода эквивалентного генератора

Величина  $E_r$  равна напряжению холостого хода  $U_{x.x}$  на разомкнутой ветви  $ab$ :  $E_r = U_{x.x}$  (рис. 2.1, в). Сопротивление  $R_r$  можно определить экспериментально из опытов холостого хода (рис. 2.1, в) и короткого замыкания (рис. 2.1, г) ветви  $ab$ :

$$R_r = U_{x.x} / I_{к.з} \quad (2.2)$$

или расчетом сопротивления относительно зажимов  $ab$  схемы, из которой удалены источники с сохранением их внутренних сопротивлений (рис. 2.1, д).

В большинстве случаев режим короткого замыкания является аварийным. При этом  $E_r$  и  $R_r$  определяют из опыта двух нагрузок

$$E_r = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}; \quad R_r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}. \quad (2.3)$$

Из выражения  $\frac{dP}{dR_n} = 0$  определяется величина сопротивления  $R_n$ , при которой в нагрузке выделяется максимальная мощность:

$$R_n = R_r. \quad (2.4)$$

## 2.2. Порядок выполнения работы

Для исследования электрической цепи по схеме рис. 2.2 протокола измерений используют источники постоянного напряжения из блока *Модуль питания*: ЭДС  $E_1 = 9$  В ( $UZ1$ ) и  $E_2 = 12$  В ( $UZ2$ ), измерительные приборы постоянного тока из блока *Цифровые индикаторы*. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блока *Модуль резисторов*.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 2.2. Рекомендуемые значения:  $R_1 = 68 - 330$  Ом;  $R_2 = 100 - 330$  Ом;  $R_3 = 10 - 150$  Ом. Величины сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  занести в табл. 2.1 протокола измерений.

2) Включить тумблеры  $QF$  блока *Модуль питания*,  $SA1$  источников напряжения  $UZ1$  и  $UZ2$ , «Сеть» блока *Цифровые индикаторы*.

3) В протоколе измерений фиксировать знаки токов в соответствии с направлениями, указанными на схеме замещения (см. рис. 2.2). В последующих опытах фиксировать изменения знаков токов.

### **Проверка выполнения законов Кирхгофа**

Измерить величины ЭДС  $E_1$  источника  $UZ1$  и  $E_2$  источника  $UZ2$ . Измерить значения токов ветвей и напряжений на сопротивлениях цепи. Все измеренные значения занести в табл. 2.1 протокола измерений.

### **Проверка выполнения принципов наложения и взаимности**

1) Исключить из цепи ЭДС  $E_2$  источника  $UZ2$ . Измерить значения токов ветвей. Измеренные значения занести в табл. 2.1. Восстановить схему цепи.

2) Исключить из цепи ЭДС  $E_1$  источника  $UZ1$ . Измерить значения токов ветвей. Измеренные значения занести в табл. 2.1. Восстановить схему цепи.

### **Определение параметров эквивалентного генератора**

1) В режиме короткого замыкания ( $R_3 = 0$ ) измерить ток  $I_{3кз}$ .

2) В режиме холостого хода (ветвь с  $R_3$  разомкнута) измерить напряжение  $U_{ab \text{ х.х.}}$ . Данные измерений занести в табл. 2.2. Восстановить схему цепи.

### **Определение экспериментальных зависимостей $I_3 = f(R_3)$ и $U_3 = f(R_3)$**

1) Измерить ток  $I_3$  и напряжение  $U_3$  для указанных в табл. 2.3 значений сопротивления  $R_3$ . Данные измерений занести в табл. 2.3 протокола.

2) Выключить питание тумблерами  $SA1$ , «Сеть» блока *Цифровые индикаторы* и  $QF$  блока *Модуль питания*.

3) Утвердить протокол измерений у преподавателя.

## **2.3. Контрольные вопросы**

1) Как формулируются законы Кирхгофа, принцип наложения и принцип взаимности?

2) Как определяются при замене цепи эквивалентным генератором ЭДС  $E_{\Gamma}$  и сопротивление  $R_{\Gamma}$ ?

3) Каким должно быть сопротивление нагрузки  $R_n$  эквивалентного генератора для передачи максимальной мощности в нагрузку?

## **2.4. Содержание отчета**

При оформлении отчета необходимо произвести следующие действия.

1) Используя данные табл. 2.1, проверить справедливость

– первого закона Кирхгофа – для случаев действия  $E_1$  и  $E_2$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ;

– второго закона Кирхгофа – для действия  $E_1$  и  $E_2$ ;

- принципа наложения;
- принципа взаимности (2.1).

2) Используя опытные данные из табл. 2.2, по формуле (2.2) определить  $R_{\Gamma}$ .

3) По схеме замещения цепи (рис. 2.2) определить  $E_{\Gamma}$  и  $R_{\Gamma}$  относительно ветви с  $R_3$ , полученные значения занести в табл. 2.2.

4) Используя две пары значений  $U_3$  и  $I_3$  из табл. 2.3, по формулам (2.3) определить  $E_{\Gamma}$  и  $R_{\Gamma}$ , полученные значения занести в табл. 2.2.

5) По значениям  $U_3$  и  $I_3$  из табл. 2.3 рассчитать мощность  $P_3$ , полученные значения занести в табл. 2.3.

6) Построить зависимость  $P_3(R_3)$ , определить величину  $R_3$ , при которой  $P_3$  максимально.

7) Ответить на контрольные вопросы.

## 2.5. Протокол измерений

Т а б л и ц а 2.1

Проверка законов Кирхгофа, принципов наложения и взаимности

$R_1 =$ Ом $R_2 =$ Ом $R_3 =$ Ом							
Включены обе ЭДС $E_1 =$ В и $E_2 =$ В				Включена ЭДС $E_1 =$ В		Включена ЭДС $E_2 =$ В	
$I_1$ , мА		$U_{R1}$ , В		$I'_1$ , мА		$I''_1$ , мА	
$I_2$ , мА		$U_{R2}$ , В		$I'_2$ , мА		$I''_2$ , мА	
$I_3$ , мА		$U_{R3}$ , В		$I'_3$ , мА		$I''_3$ , мА	

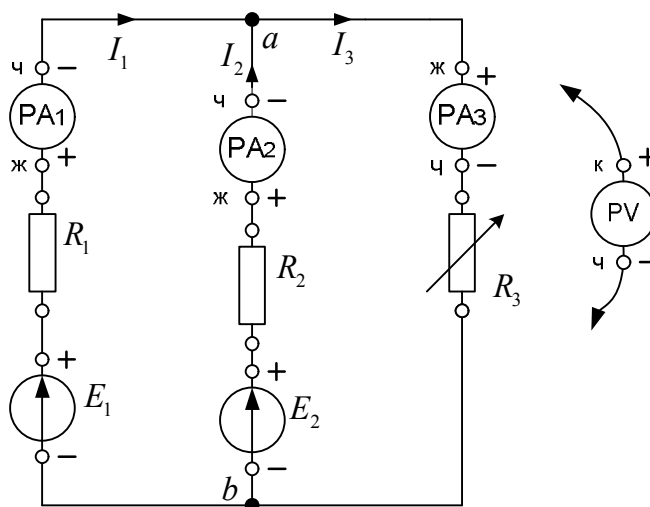


Рис. 2.2. Схема замещения цепи



Т а б л и ц а 2.2

## Определение параметров эквивалентного генератора

Способ определения параметров	$I_{3кз}$ , мА	$U_{abxx} = E_r$ , В	$R_r$ , Ом
Опыт			
Расчет по схеме замещения			
Расчет из опыта двух нагрузок			

Т а б л и ц а 2.3

Зависимости  $I_3 = f(R_3)$ ,  $U_3 = f(R_3)$  и  $P_3 = f(R_3)$ 

Опыт	$R_3$ , Ом	0	10	20	30	47	68	100	150
	$I_3$ , мА								
	$U_3$ , В								
Расчет	$P_3$ , Вт								

## Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПАССИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы: экспериментальное определение полных и комплексных сопротивлений и проводимостей пассивных двухполюсников  $R-L-C$  в установившемся режиме синусоидальных напряжений и токов.

## 3.1. Общие сведения

На входе пассивного двухполюсника (рис. 3.1, а) в установившемся режиме мгновенные значения напряжения  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  и тока  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  отличаются по фазе на угол  $\varphi = \psi_u - \psi_i$  (рис. 3.1, б).

Проекции напряжения на линию тока  $U_{ак} = U \cos \varphi$  и на перпендикуляр к линии тока  $U_p = U \sin \varphi$  определяют активную и реактивную составляющие напряжения.

Проекции тока на линию напряжения  $I_{ак} = I \cos \varphi$  и на перпендикуляр к линии напряжения  $I_p = I \sin \varphi$  определяют активную и реактивную составляющие тока.

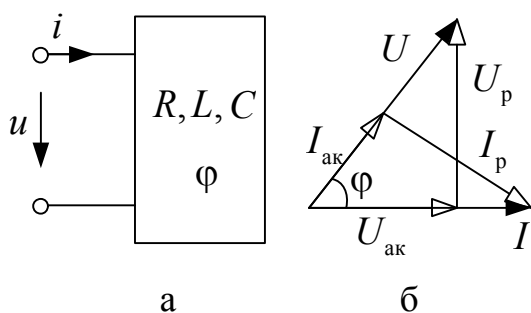


Рис. 3.1. Напряжение и ток пассивного двухполюсника

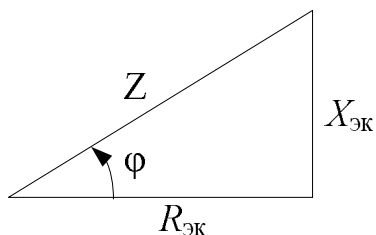


Рис. 3.2. Треугольник сопротивлений

В цепи синусоидального тока для пассивного двухполюсника вводятся следующие расчетные величины (эквивалентные параметры).

1. Эквивалентные полное  $Z$ , активное  $R_{\text{эк}}$  и реактивное  $X_{\text{эк}}$  сопротивления (рис. 3.2):

$$Z = \frac{U}{I}; \quad (3.1)$$

$$R_{\text{эк}} = \frac{U_{\text{ак}}}{I} = Z \cos \varphi; \quad (3.2)$$

$$X_{\text{эк}} = \frac{U_{\text{р}}}{I} = Z \sin \varphi; \quad (3.3)$$

$$Z = \sqrt{R_{\text{эк}}^2 + X_{\text{эк}}^2}; \quad (3.4)$$

индуктивное сопротивление  $X_L = \omega L$ ; емкостное сопротивление  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ .

2. Эквивалентные полная  $Y$ , активная  $G_{\text{эк}}$  и реактивная  $B_{\text{эк}}$  проводимости:

$$Y = \frac{I}{U}; \quad (3.5)$$

$$G_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{ак}}}{U} = Y \cos \varphi; \quad (3.6)$$

$$B_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{р}}}{U} = Y \sin \varphi; \quad (3.7)$$

$$Y = \sqrt{G_{\text{эк}}^2 + B_{\text{эк}}^2}; \quad (3.8)$$

индуктивная проводимость  $B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}$ ; емкостная проводимость  $B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$ .

3. Комплексное сопротивление  $\underline{Z} = R_{\text{эк}} + jX_{\text{эк}} = Z e^{j\varphi}$ , где  $\varphi = \arctg \frac{X_{\text{эк}}}{R_{\text{эк}}}$

(см. рис. 3.2).

4. Комплексная проводимость  $\underline{Y} = G_{\text{эк}} - jB_{\text{эк}} = Y e^{-j\varphi}$ .

Для указанных выше величин выполняются отношения:  $Z = 1/Y$ ;  $Y = 1/Z$ ;  $\underline{Z} = 1/\underline{Y}$ ;  $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$ .

Эквивалентные параметры определяются из физического эксперимента, в котором для заданного двухполюсника измеряют действующие значения тока и напряжения, активную мощность  $P = UI \cos \varphi$  или угол сдвига фаз  $\varphi$  между мгновенными значениями напряжения и тока (рис. 3.3).

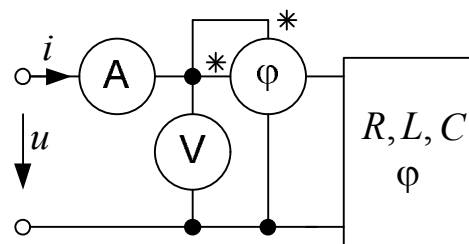


Рис. 3.3. Схема измерений

### 3.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуют резистор  $R$ , катушку индуктивности ( $L - R_k$ ), конденсатор ( $R_C - C$ ) и последовательное соединение катушки, резистора и конденсатора ( $L - R_k - R - C - R_C$ ) (рис. 3.4), где  $R_k$  – сопротивление провода катушки, а  $R_C$  – сопротивление, отражающее потери в диэлектрике конденсатора. Пассивные элементы электрических схем двухполюсников выбирают из *Модуля резисторов* и модуля *Реактивные элементы*.

Источником синусоидального напряжения частотой  $f = 50$  Гц является *Модуль питания UZ3*. Измерения действующих значений тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз  $\varphi$  между мгновенными значениями напряжения и тока выполняют приборами *Модуля измерителя фазы*.

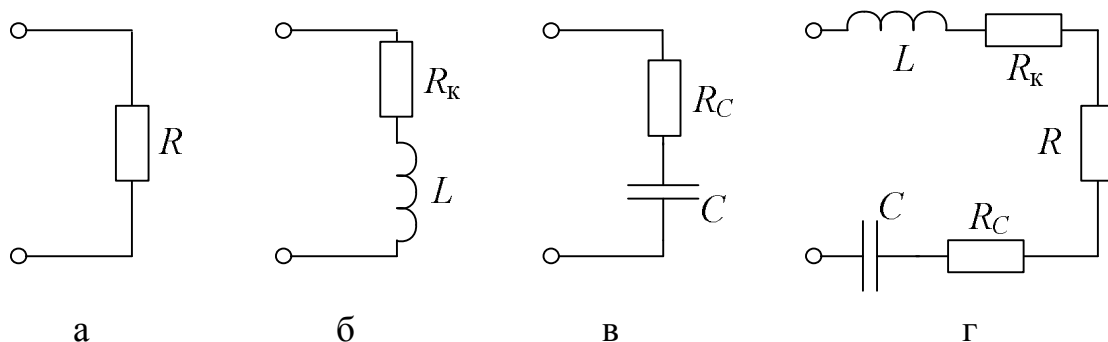


Рис. 3.4. Схемы двухполюсников

Численные значения параметров элементов двухполюсников назначает преподаватель. Рекомендуемые значения параметров:  $L = 60, 70, 80$  или  $90$  мГн,  $C = 32, 47, 57$  или  $69$  мкФ,  $R = 47, 68$  или  $100$  Ом.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 3.5 протокола измерений. Тумблер  $SA2$  модуля *Измеритель фазы* установить в положение  $I2$ .

2) Подключить к схеме резистор  $R$ .

3) Включить тумблер  $QF$  модуля питания и тумблер  $SA2$  источника  $UZ3$ .

4) Установить регулятором напряжения *Модуля питания*  $UZ3$  напряжение  $U = 7 \dots 8$  В.

5) Выполнить измерение мощности  $P$ , действующих значений напряжения  $U$ , тока  $I$  и угла сдвига фаз  $\varphi$ . Измеренные величины занести в табл. 3.1 протокола измерений.

6) Повторить измерения для катушки индуктивности, конденсатора и последовательного соединения элементов.

7) Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений, занести их в табл. 3.1.

8) Выключить тумблер  $SA2$  источника  $UZ3$  и тумблер  $QF$  модуля питания.

9) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

10) Ответить на контрольные вопросы.

### 3.3. Контрольные вопросы

1) Записать в алгебраической и показательной форме

– комплексное сопротивление  $\underline{Z}$ ;

– комплексную проводимость  $\underline{Y}$ .

2) Как по известным напряжению  $U$ , току  $I$  и активной мощности  $P$  двухполюсника определить его полное  $Z$ , активное  $R$  и реактивное  $X$  сопротивления?

3) Вывести формулы преобразования эквивалентных параметров  $R_3$  и  $X_3$  последовательной схемы замещения двухполюсника в  $G_3$  и  $B_3$  параллельной схемы замещения и наоборот.

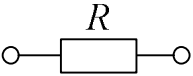
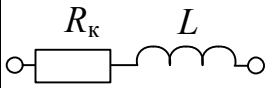
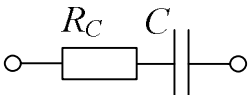
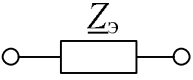
### 3.4. Содержание отчета

1) Схемы замещения резистора, катушки, конденсатора.

2) Расчет  $Z$ ,  $R_3$ ,  $X_3$ ,  $\underline{Z}$ ,  $P$  для каждого двухполюсника по опытным данным.

Таблица 3.1

Эквивалентные параметры исследуемых двухполюсников

Двухполюсник	Схема замещения	Опыт				Расчет				
		$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , Вт	$\varphi$ , град.	$Z = \frac{U}{I}$ , Ом	$R_3 = Z \cos \varphi$ , Ом	$X_3 = Z \sin \varphi$ , Ом	$\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$	$P = I^2 R_3$
Резистор $R = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом					0		$R = Z =$	0		
Катушка индуктивности $L = \underline{\hspace{1cm}}$ мГн							$R_k =$	$X_L =$		
Конденсатор $C = \underline{\hspace{1cm}}$ мкФ							$R_C =$	$X_C =$		
Последовательное соединение резистора, катушки индуктивности и конденсатора							$R_3 =$	$X_3 =$		

$$R + R_k + jX_L + R_C - jX_C = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} + j \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} e^{j\underline{\hspace{1cm}}}$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3 = \underline{\hspace{1cm}} + j \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} e^{j\underline{\hspace{1cm}}}$$

- 3) Построенные в масштабе треугольники сопротивлений катушки индуктивности и конденсатора.
- 4) Расчет  $Z_{\Sigma}$  последовательного соединения резистора, катушки индуктивности и конденсатора по найденным  $R_{\Sigma}$  и  $X_{\Sigma}$  каждого двухполюсника.
- 5) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

### 3.5. Протокол измерений

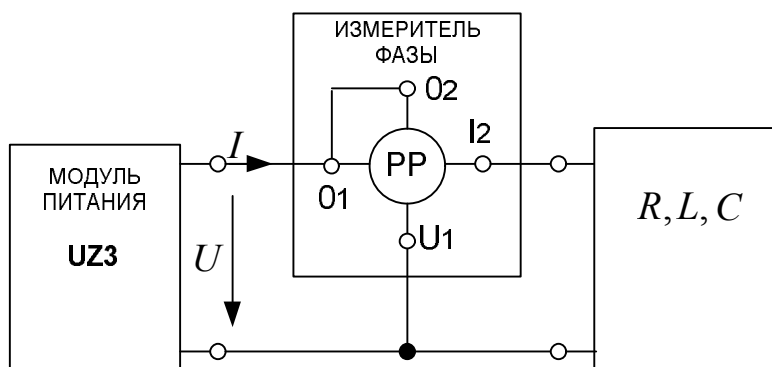


Рис. 3.5. Схема исследуемой электрической цепи

Результаты измерений и расчета представлены в табл. 3.1.

## Лабораторная работа 4

### ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: получение экспериментальных данных для расчета комплексных сопротивлений, токов и построения векторных диаграмм разветвленной цепи синусоидального тока; закрепление навыков расчета комплексным методом.

#### 4.1. Общие сведения

При расчетах установившихся режимов линейных электрических цепей синусоидального тока мгновенным значениям синусоидальных функций времени, например, тока  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ , ставят в соответствие вектор  $I_m e^{j\psi_i} e^{j\omega t}$  длиной  $I_m$ , расположенный на комплексной плоскости при  $t = 0$  под углом  $\psi_i$  к оси действительных чисел и вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  против часовой стрелки.

Величины

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}; \quad \dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_i} \quad (4.1)$$

называют комплексными амплитудным и действующим значениями синусоидального тока соответственно. Аналогично определяются комплексные амплитудные и действующие значения синусоидальных напряжений, ЭДС.

Для любого пассивного участка электрической цепи, содержащего элементы  $R$ ,  $L$  и  $C$ , можно определить комплексное сопротивление

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = Z e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z e^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jX \quad (4.2)$$

и комплексную проводимость

$$\underline{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{I e^{j\psi_i}}{U e^{j\psi_u}} = Y e^{-j(\psi_u - \psi_i)} = Y e^{-j\varphi} = Y \cos \varphi - jY \sin \varphi = G - jB. \quad (4.3)$$

Переход к комплексным действующим значениям напряжения и тока, комплексным сопротивлениям и проводимостям позволяет при расчетах использовать следующее:

- 1) уравнения, по форме совпадающие с законом Ома  $\dot{U} = \underline{Z}\dot{I}$ ;
- 2) первый закон Кирхгофа для любого узла схемы замещения цепи  $\sum_k \dot{I}_k = 0$  (алгебраическая сумма токов всех  $k$  ветвей узла);
- 3) второй закон Кирхгофа для любого контура схемы замещения цепи:  $\sum_n \dot{I}_n \underline{Z}_n = \sum_n \dot{E}_n$  (алгебраические суммы напряжений и ЭДС всех  $n$  ветвей контура);
- 4) методы расчета разветвленных цепей постоянного тока.

Мощности источников и пассивных участков цепи также представляются в комплексной форме:

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = S e^{j\varphi} = S \cos \varphi + jS \sin \varphi = P + jQ, \quad (4.4)$$

где  $\underline{S}$  — полная комплексная мощность;

$\dot{I}^* = I e^{-j\psi_i}$  — сопряженное комплексное действующее значение тока.

В цепи синусоидального тока выполняется баланс комплексных, активных и реактивных мощностей источников и потребителей:

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{S}_{\text{пот}}; \quad P_{\text{ист}} = P_{\text{пот}}; \quad Q_{\text{ист}} = Q_{\text{пот}}. \quad (4.5)$$

## 4.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе используют источник синусоидального напряжения из модуля *Функциональный генератор*, измерительные приборы блока *Модуль измерителя фазы*, *Цифровые индикаторы* синусоидального тока (амперметры  $PA2$  и  $PA3$ , вольтметры  $PV1$  и  $PV2$ ). Пассивные элементы цепи  $L$ ,  $L_2$  и  $C$  выбирают из блока *Модуль реактивных элементов*,  $R_3$  – из блока *Модуль резисторов*. Для наблюдения формы напряжения и тока в цепи используют *Осциллограф*.

Частоту  $f$  и параметры пассивных элементов задает преподаватель. Рекомендуемые значения представлены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Значения параметров

$f = 100$ Гц		$f = 150$ Гц		$f = 200$ Гц		$f = 250$ Гц	
$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$C$ , мкФ
80	57	60	57	40	22	40	22
90	69	70	69	50	32	50	32
100	79	80	79	60	47	60	47

Лабораторная работа состоит из двух частей. В первой части определяют параметры элементов: катушек индуктивности  $L$  и  $L_2$ , конденсатора  $C$ , резистора  $R_3$ . Полученные результаты используют для расчета токов в исследуемой цепи. Во второй части проводят измерения в цепи с последовательно-параллельным соединением элементов.

### 4.2.1. Первая часть работы

1) Установить заданные преподавателем величины:  $L$ ,  $C$  в блоке *Модуль реактивных элементов*,  $R_3 = 10$  Ом в блоке *Модуль резисторов*. Их значения записать в протокол измерений. Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 4.1 протокола измерений.

2) Включить тумблер  $QF$  блока *Модуль питания* и тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* установить в положение « $\sim 10$  В». Установить заданные преподавателем значения  $f$  и  $U = 2 - 3$  В.



3) Поочередно подключая к зажимам  $I_2$  и  $U_1$  Измерителя фазы исследуемые элементы, провести измерения  $U$ ,  $I$  и  $\varphi$ . Полученные значения занести в табл. 4.2 протокола измерений.

#### 4.2.2. Вторая часть работы

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 4.2 протокола измерений. Включить Осциллограф.

2) Регулятором Частота модуля Функциональный генератор установить заданное преподавателем значение частоты  $f$ . Регулятором Амплитуда установить заданное преподавателем значение напряжения  $U = 8 - 10$  В.

3) Измерить действующие значения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$ ; токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ ; активную мощность  $P$ , потребляемую цепью, угол сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением и током на входе цепи. Измеренные значения занести в табл. 4.3.

4) Снять на кальку (сфотографировать) зависимости  $u(t)$  и  $u_{R_3}(t)$ , записать масштабы  $m_u$  и  $m_{u_{R_3}}$  и определить по ним действующие значения напряжения  $U$ , тока  $I$  и угол  $\varphi$ . Результаты измерений занести в табл. 4.2 протокола измерений. На осциллограммах пометить  $u(t)$  и  $u_{R_3}(t)$ .

5) Выключить тумблер Сеть модуля Функциональный генератор и тумблер QF Модуля питания.

6) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

#### 4.3. Контрольные вопросы

1) Записать в общем виде мгновенное значение тока  $i$ , комплексное амплитудное  $\dot{I}_m$  и комплексное действующее  $\dot{I}$  значения.

2) Записать законы Кирхгофа в комплексной форме для действующих значений токов, напряжений и ЭДС.

3) Как определяется мощность в комплексной форме?

4) В чем отличие  $\dot{I}^*$  от  $\dot{I}$ ?

5) Как записывается баланс мощностей в цепи синусоидального тока?

6) Записать единицы измерения  $S$ ,  $P$ ,  $Q$ .

#### 4.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений, осциллограммы  $u(t)$  и  $u_{R_3}(t)$ ,  $m_u$ ,  $m_{u_{R_3}}$ .
- 2) Схема замещения исследуемой электрической цепи с указанием величин  $R_k$ ,  $X_L$ ,  $R_{k2}$ ,  $X_{L2}$ ,  $R$ ,  $X_C$ ,  $R_3$ , рассчитанных по данным табл. 4.2.
- 3) Расчет токов и напряжений методом преобразования. При расчете из табл. 4.3 взять входное напряжение  $U$  (начальную фазу принять равной нулю), а из табл. 4.2 – комплексные сопротивления ветвей. Все расчеты проводить в комплексной форме. Найти  $\varphi$  и  $P$ . Результаты расчета занести в табл. 4.3 протокола измерений и сравнить с экспериментальными данными.
- 4) Уравнения баланса активных и реактивных мощностей. Проверить выполнение баланса, используя результаты, полученные в п. 3.
- 5) Топографическая векторная диаграмма напряжений ( $\dot{U}_{R_3}$ ,  $\dot{U}_{R_{k2}}$ ,  $\dot{U}_{L_2}$ ,  $\dot{U}_R$ ,  $\dot{U}_C$ ,  $\dot{U}_{R_k}$ ,  $\dot{U}_L$ ) и лучевая диаграмма токов ( $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $\dot{I}_3$ ). Комплексный потенциал точки  $k$  принять равным нулю.
- 6) Уравнения в комплексной форме для исследуемой цепи по законам Кирхгофа.
- 7) Ответы на контрольные вопросы.

#### 4.5. Протокол измерений

Заданные параметры: частота  $f = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц, индуктивность катушки  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  мГн; емкость конденсатора  $C = \underline{\hspace{2cm}}$  мкФ; сопротивление  $R_3 = 10$  Ом.

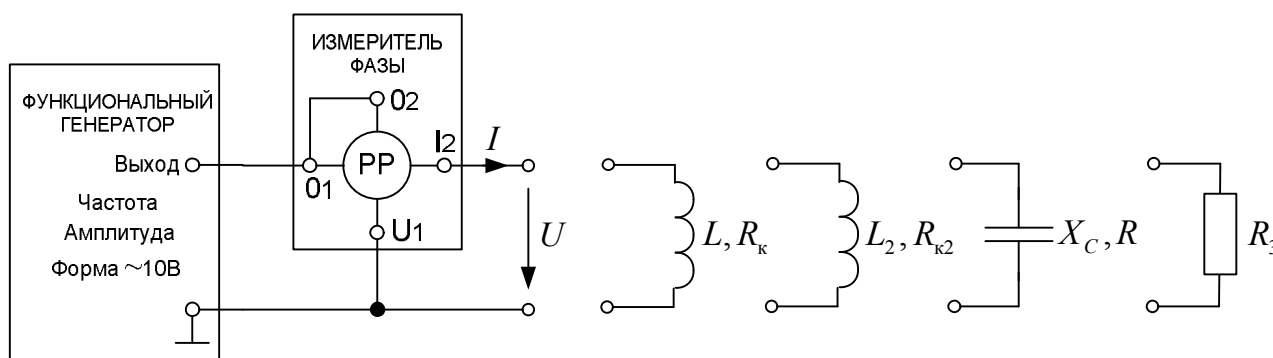


Рис. 4.1. Определение параметров элементов

Т а б л и ц а 4.2

## Опытное определение параметров элементов

Элемент	$U$ , В	$I$ , мА	$\varphi$ , град.	$Z = \frac{U}{I}$ , Ом	$Z \cos \varphi$ , Ом	$Z \sin \varphi$ , Ом
Катушка индуктивности $L$					$R_k =$	$X_L =$
Катушка индуктивности $L_2$					$R_{k2} =$	$X_{L2} =$
Конденсатор $C$					$R =$	$X_C =$
Резистор $R_3$			0		$R_3 =$	0

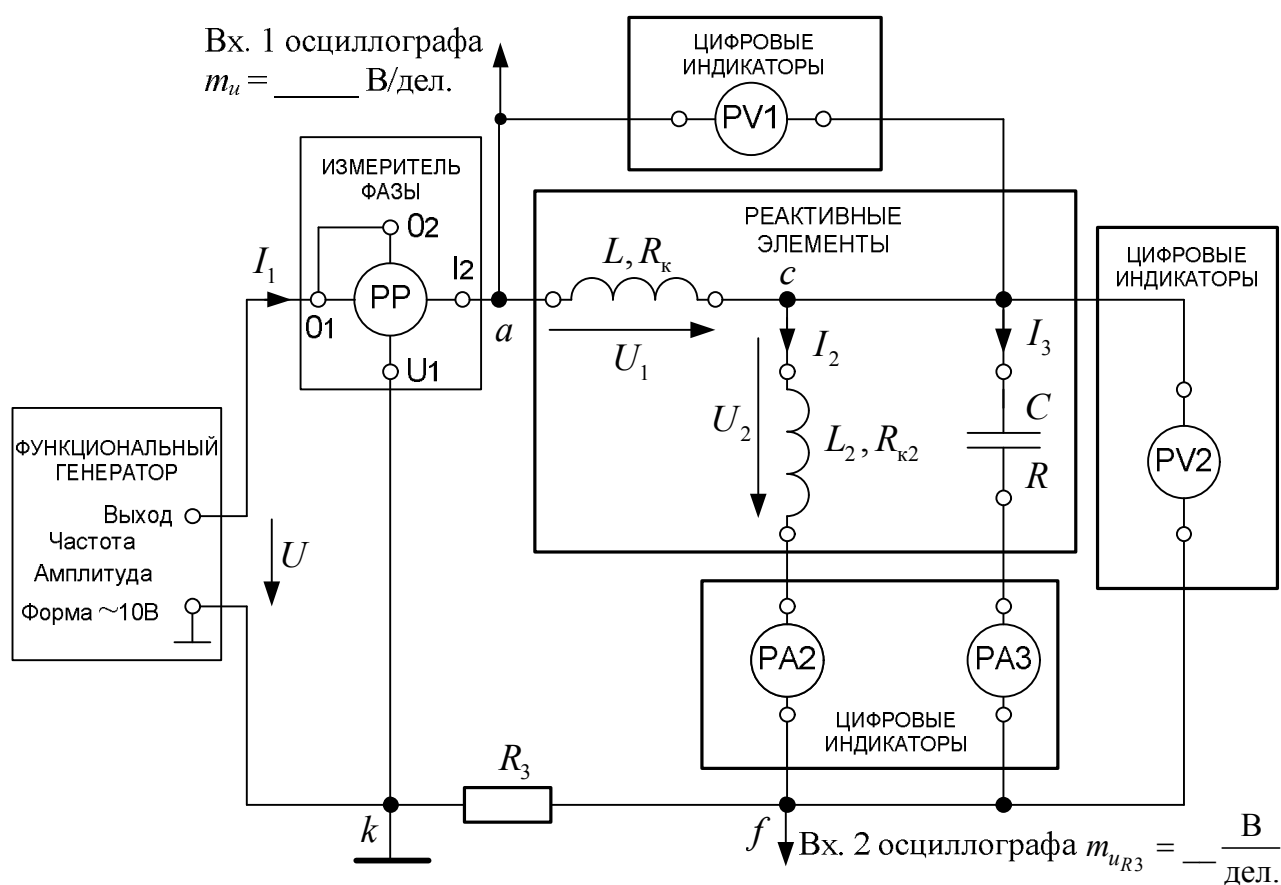


Рис. 4.2. Схема исследуемой электрической цепи

Т а б л и ц а 4.3

## Результаты измерений

Способ определения	$U$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$\varphi$ , град.	$P$ , Вт
Опыт								
Расчет								
Осциллограф								

## ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы: экспериментальное исследование цепи синусоидального тока, содержащей участки с индуктивно связанными элементами.

### 5.1. Общие сведения

На рис. 5.1, а показан контур 1 с электрическим током  $i_1$ . Магнитный поток, создаваемый этим током и сцепленный с этим контуром, называется потоком самоиндукции  $\Phi_{1L}$ .

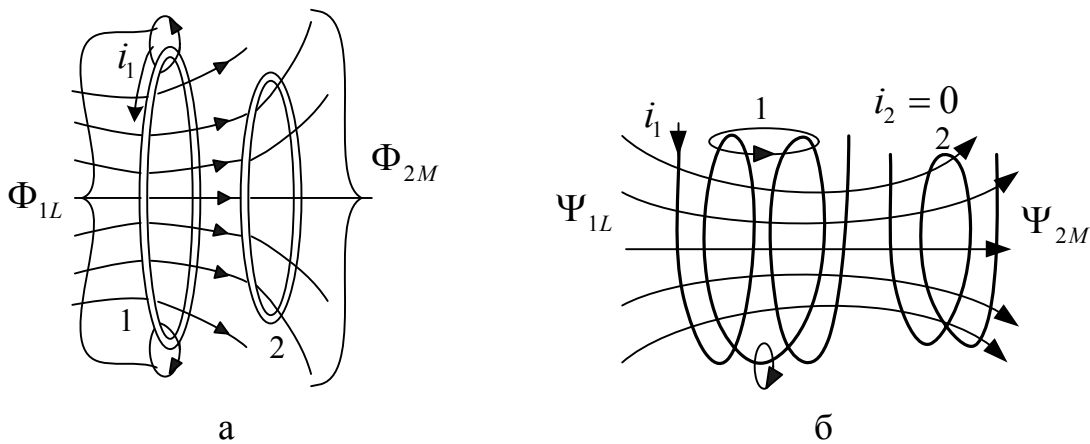


Рис. 5.1. Индуктивно связанные контуры

Расчетная величина потокосцепления самоиндукции контура 1 обозначается  $\Psi_{1L} = w_1 \Phi_{1L}$ , где  $w_1$  – количество витков первого контура (рис. 5.1, б). В линейной электрической цепи потокосцепление  $\Psi_{1L} = L_1 i_1$ , где  $L_1$  – собственная индуктивность или просто индуктивность контура 1.

При протекании переменного тока в окружающем контур пространстве создается переменный магнитный поток. В контуре индуцируется ЭДС самоиндукции

$$e_{1L} = -\frac{d\Psi_{1L}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt}, \quad (5.1)$$

что приводит к появлению на зажимах первого контура (рис. 5.1, б) напряжения самоиндукции

$$u_{1L} = -e_{1L} = L_1 \frac{di_1}{dt}. \quad (5.2)$$

Если часть магнитного потока катушки с индуктивностью  $L_1$  сцепляется с витками контура 2, в нем возникает магнитный поток взаимной индукции  $\Phi_{2M}$ . В линейной электрической цепи потокоцепление взаимной индукции определяется выражением  $\Psi_{2M} = M_{21}i_1$ , где  $M_{21}$  – взаимная индуктивность контуров 1 и 2.

При изменении магнитного потока взаимной индукции во втором контуре возникает ЭДС взаимоиндукции  $e_{2M} = -\frac{d\Psi_{2M}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$ , что приводит к появлению на зажимах второго контура напряжения взаимоиндукции

$$u_{2M} = -e_{2M} = M_{21} \frac{di_1}{dt}. \quad (5.3)$$

Напряжения на индуктивно связанных элементах электрической цепи определяются составляющими напряжений само- и взаимоиндукции. При замыкании второго контура за счет ЭДС взаимоиндукции  $e_{2M}$  в нем появится ток  $i_2 \neq 0$ . Это приведет к появлению ЭДС самоиндукции  $e_{2L}$  в контуре 2 и ЭДС взаимоиндукции  $e_{1M}$  в контуре 1. Если обозначить собственную индуктивность второго контура  $L_2$ , а напряжения на зажимах индуктивно связанных контуров  $u_1$  и  $u_2$ , то в установившемся режиме в комплексной форме записи получаем:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1L} \pm \dot{U}_{1M} = j\omega L_1 \dot{I}_1 \pm j\omega M_{12} \dot{I}_2; \quad (5.4)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2L} \pm \dot{U}_{2M} = j\omega L_2 \dot{I}_2 \pm j\omega M_{21} \dot{I}_1; \quad (5.5)$$

$$M_{12} = M_{21} = M. \quad (5.6)$$

Знак «+» соответствует согласному включению, «–» – встречному.

Для *последовательного согласного* включения индуктивно связанных катушек (рис. 5.2, а) при  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}$  можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (R_{k1} + j\omega L_1) \dot{I} + j\omega M \dot{I} + (R_{k2} + j\omega L_2) \dot{I} + j\omega M \dot{I} = \\ &= (R_{k1} + R_{k2}) \dot{I} + j\omega (L_1 + L_2 + 2M) \dot{I}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Комплексное эквивалентное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\text{согл}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = (R_{k1} + R_{k2}) + j\omega (L_1 + L_2 + 2M). \quad (5.8)$$

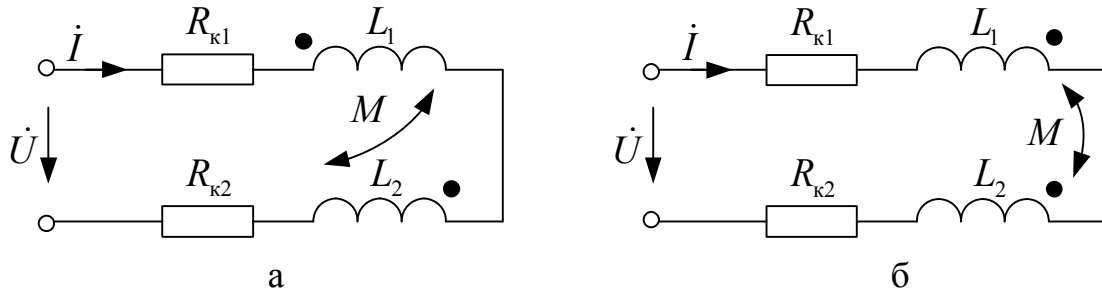


Рис. 5.2. Согласное (а) и встречное (б) включение катушек

Эквивалентное активное и реактивное сопротивления цепи:

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}}; \quad (5.9)$$

$$X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M). \quad (5.10)$$

Для *последовательного встречного* включения индуктивно связанных катушек (рис. 5.2, б)

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (R_{\text{к1}} + j\omega L_1)\dot{I} - j\omega M\dot{I} + (R_{\text{к2}} + j\omega L_2)\dot{I} - j\omega M\dot{I} = \\ &= (R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}})\dot{I} + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)\dot{I}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Комплексное эквивалентное сопротивление цепи

$$Z_{\text{встр}} = (R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}}) + j\omega(L_1 + L_2 - 2M), \quad (5.12)$$

эквивалентное активное и реактивное сопротивления цепи:

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{к1}} + R_{\text{к2}}; \quad (5.13)$$

$$X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M). \quad (5.14)$$

Поскольку  $X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M)$  больше  $X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M)$ , то полное сопротивление  $Z_{\text{согл}} = \sqrt{R_{\text{эк}}^2 + X_{\text{согл}}^2}$  больше  $Z_{\text{встр}} = \sqrt{R_{\text{эк}}^2 + X_{\text{встр}}^2}$ . Это позволяет экспериментально определить одноименные зажимы индуктивно связанных катушек, их включение – согласное или встречное, а также величину

$$X_M = \omega M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4}. \quad (5.15)$$

Активная мощность на участке с индуктивностью  $L_1$  за счет индуктивной связи с индуктивностью  $L_2$  определяется как  $P_{1M} = \text{Re}\left(j\omega M \dot{I}_2^* \dot{I}_1\right)$ .

Аналогично – для участка с индуктивностью  $L_2$ :  $P_{2M} = \operatorname{Re} \left( j\omega M \dot{I}_1^* I_2 \right)$ .

Причем  $P_{1M} = -P_{2M}$ .

## 5.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе используют источник синусоидального напряжения из модуля *Функциональный генератор*, измерительные приборы блока *Измеритель фазы*, вольтметры блока *Цифровые индикаторы*. Пассивные элементы цепи  $L_1$  и  $L_2$  выбирают из блока *Модуль реактивных элементов*.

### 5.2.1. Определение параметров индуктивно связанных катушек

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 5.3 протокола измерений. Тумблер *SA2* модуля *Измеритель фазы* установить в положение *I2*.

2) Включить тумблер *QF* блока *Модуль питания* и тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* установить в положение « $\sim 10$  В». Установить регулятором *Частота* значение частоты  $f = 100 \dots 200$  Гц. Частоту  $f$  записать в протокол.

3) Регулятором *Амплитуда* модуля *Функциональный генератор* установить действующее значение напряжения  $U_1 = 8 - 10$  В.

4) Измерить приборами из блока *Измеритель фазы* действующее значение напряжения  $U_1$ , тока  $I_1$  и угол сдвига фаз  $\varphi_1$ . Действующее значение напряжения  $U_2$  измерить мультиметром *PV1*. Полученные значения занести в табл. 5.1.

5) Повторить измерения, поменяв местами индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ . Измеренные величины занести в табл. 5.1.

6) Выключить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*.

7) Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.

### 5.2.2. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 5.4.

2) Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*.

3) Экспериментально определить вид включения катушек.

4) Соединить катушки последовательно *согласно*. Регулятором *Амплитуда* модуля *Функциональный генератор* установить напряжение  $U = 10$  В.

5) Приборами из блока *Измеритель фазы* измерить действующие значения напряжения  $U$ , тока  $I$ , угол сдвига фаз  $\varphi$ . Напряжения  $U_1$  и  $U_2$  измерить мультиметром *PVI*. Измеренные значения занести в табл. 5.2.

6) Соединить катушки последовательно *встречно*. Выполнить измерения п. 5. Полученные значения занести в табл. 5.2.

7) Выключить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*.

8) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 5.3. Контрольные вопросы

1) Как направлены магнитные потоки самоиндукции и взаимоиндукции

– при согласном включении катушек индуктивности;

– при встречном включении катушек индуктивности?

2) Как изменится ток в цепи, состоящей из двух последовательно соединенных индуктивно связанных катушек, если их встречное включение изменить на согласное?

3) При изменении направления магнитного потока взаимоиндукции ток в цепи, состоящей из двух последовательно соединенных катушек, увеличился. Как изменился вид их включения?

### 5.4. Содержание отчета

1) Расчет параметров катушек и взаимной индуктивности  $M = M_{12} = M_{21}$  по экспериментальным данным (табл. 5.1 протокола измерений).

2) Схема замещения с указанием  $L_1, R_{k1}, L_2, R_{k2}$  для согласного и встречного включения катушек по рис. 5.4.

3) Расчет действующих значений напряжений  $U_{Rk1}, U_{L1}, U_{Rk2}, U_{L2}, U_M$ ,  
 $U_1 = \sqrt{U_{Rk1}^2 + (U_{L1} \pm U_M)^2}$ ,  $U_2 = \sqrt{U_{Rk2}^2 + (U_{L2} \pm U_M)^2}$  по данным п. 2 и действующему значению тока  $I$  из табл. 5.2. Расчет выполнить отдельно для согласного и встречного включения катушек.

4) Построение векторной диаграммы напряжений для каждого из исследуемых режимов с указанием масштаба. Начальную фазу тока принять равной нулю. Потенциал точки  $s$  принять равным нулю.

5) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.



## 5.5. Протокол измерений

Частота  $f = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц, угловая частота  $\omega = \underline{\hspace{2cm}}$  рад/с.

### 5.5.1. Определение параметров индуктивно связанных катушек

В табл. 5.1 величины с индексом 1 относятся к катушке, подключенной к выходу функционального генератора, с индексом 2 – к гнездам мультиметра.

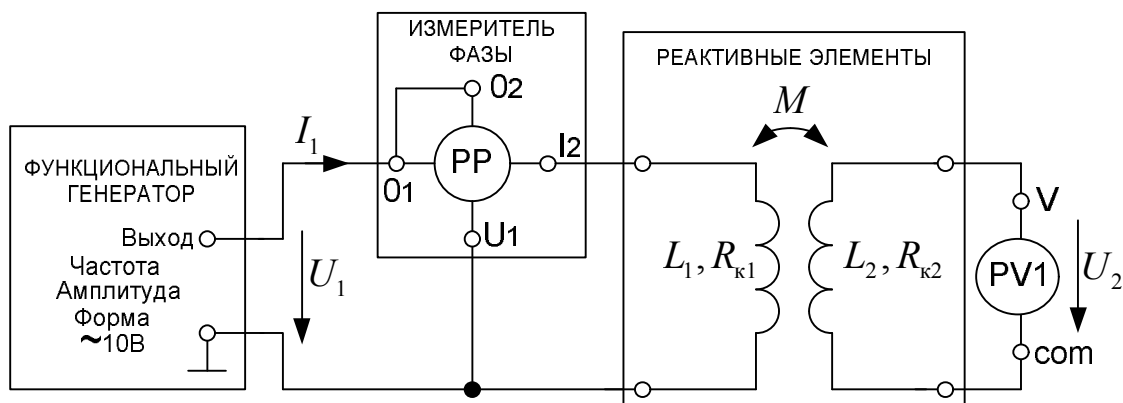


Рис. 5.3. Определение взаимной индуктивности  $M$

Т а б л и ц а 5.1

### Результаты измерений

К выходу генератора подключена катушка							
$L_1$				$L_2$			
$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$\varphi_1$ , град.	$U_2$ , В	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$\varphi_1$ , град.	$U_2$ , В

### Предварительные расчеты параметров катушек

1) К выходу генератора подключена катушка  $L_1$ :

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \quad \quad \quad = \quad \text{Ом}; \quad R_{k1} = Z_1 \cos \varphi_1 = \quad \quad \quad = \quad \text{Ом};$$

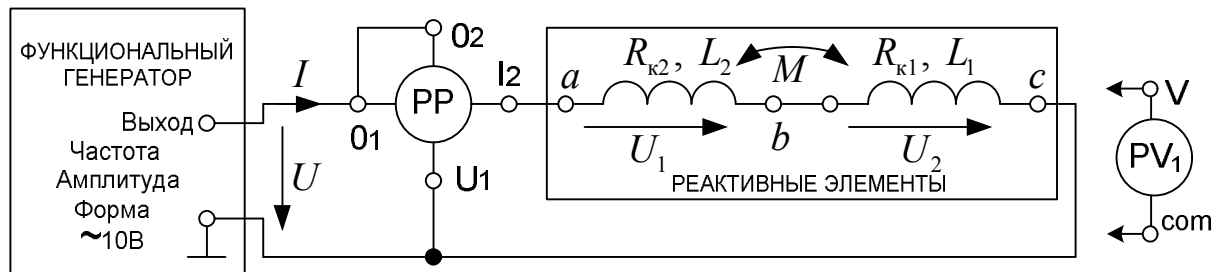
$$X_{L1} = Z_1 \sin \varphi_1 = \quad \quad \quad = \quad \text{Ом}; \quad X_{M1} = \frac{U_2}{I_1} = \quad \quad \quad = \quad \text{Ом};$$

$$M_{12} = \frac{X_{M1}}{\omega} = \quad \quad \quad \text{Гн.}$$

2) К выходу генератора подключена катушка  $L_2$ :

$$Z_2 = \frac{U_1}{I_1} = \quad \quad \quad = \quad \text{Ом}; \quad R_{k2} = Z_2 \cos \varphi_2 = \quad \quad \quad = \quad \text{Ом};$$

$$M_{21} = \frac{X_{M2}}{\omega} = \Gamma_H.$$



Соединение катушек									
согласное					встречное				
$U$ , В	$I$ , мА	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$\varphi$ , град.	$U$ , В	$I$ , мА	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$\varphi$ , град.
$Z_{\text{согл}}^{\text{экс}} = U / I = \quad \quad \quad = \quad \quad \quad \text{Ом}$					$Z_{\text{встр}}^{\text{экс}} = U / I = \quad \quad \quad = \quad \quad \quad \text{Ом}$				

## 6.1. Общие сведения

Резонансом называется явление совпадения начальных фаз мгновенных значений синусоидального напряжения и тока на участке электрической цепи, содержащем элементы с параметрами  $R, L, C$ .

В состоянии резонанса угол сдвига фаз  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ . Имеют место следующие выражения:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 = Z_0 \cos \varphi + jZ_0 \sin \varphi = R_0; \operatorname{Im}(\underline{Z}) = 0; X_0 = 0; \quad (6.1)$$

$$\underline{Y} = \underline{Y}_0 = Y_0 \cos \varphi - jY_0 \sin \varphi = G_0; \operatorname{Im}(\underline{Y}) = 0; B_0 = 0. \quad (6.2)$$

В линейной электрической цепи режим резонанса можно получить путем изменения частоты  $f$  питающего напряжения  $u(t)$  или величин параметров элементов  $R, L, C$ . В работе исследуют контур с последовательным соединением участков с параметрами  $R, L$  и  $C$  (рис. 6.1).

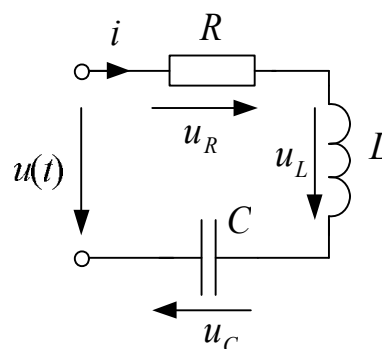


Рис. 6.1. Контур с последовательным соединением  $R, L$  и  $C$

На частоте резонанса  $\omega_0$  эквивалентное реактивное сопротивление

$$X_0 = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0, \quad (6.3)$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad (6.4)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (6.5)$$

Величина  $\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = \rho$  имеет размерность сопротивления и носит название *волнового (характеристического) сопротивления* контура.

Резонансные свойства контура характеризует *добротность*

$$Q = \frac{U_{L0}}{U_{R0}} = \frac{U_{C0}}{U_{R0}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{\rho}{R}. \quad (6.6)$$

При резонансе напряжение на входе контура  $U = U_{R0}$ . Добротность  $Q$  показывает, во сколько раз напряжения на реактивных элементах  $U_{L0} = U_{C0}$  отличаются от напряжения  $U$ . Такой резонанс называют *резонансом напряжений*.

Ток при резонансе достигает наибольшего значения  $I = I_0 = \frac{U}{R}$ .

Зависимости  $X_L(f)$ ;  $X_C(f)$ ;  $X(f) = X_L(f) - X_C(f)$ ;  $Z(f) = \sqrt{R^2 + (X(f))^2} = |R + jX(f)|$  называются *частотными характеристиками* цепи (контура).

Зависимость  $\varphi(f) = \arctg(X(f)/R)$  называется *фазочастотной характеристикой* (ФЧХ) цепи (контура).

Зависимости от частоты действующих значений тока  $I(f)$  и напряжений  $U_R(f)$ ,  $U_L(f)$ ,  $U_C(f)$  называются *амплитудно-частными характеристиками* (АЧХ).

Диапазон частот, при которых выполняется отношение

$$\frac{I(f)}{I_0} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (6.7)$$

называется *полосой пропускания*.

Отношение (6.7) выполняется точно на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , где  $|X(f)| = R$ . На частоте  $f_1 < f_0$  угол сдвига фаз  $\varphi(f_1) = -45^\circ$ , на частоте  $f_2 > f_0$   $\varphi(f_2) = +45^\circ$ . Частоты  $f_1$  и  $f_2$  называются нижней и верхней граничными частотами полосы пропускания  $\Delta f = f_2 - f_1$ . Выполнение условий  $\varphi(f_1) = -45^\circ$  и  $\varphi(f_2) = +45^\circ$  позволяет экспериментально определить граничные частоты, поэтому полосу пропускания можно определить по фазочастотной характеристике.

Значения граничных частот определяются выражением

$$f_{1,2} = \frac{f_0}{2Q} \left( \sqrt{1 + 4Q^2} \mp 1 \right). \quad (6.8)$$

Избирательные частотные свойства контура характеризуются полосой пропускания

$$\Delta f = f_2 - f_1 = f_0 / Q. \quad (6.9)$$

## 6.2. Порядок выполнения работы

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 6.3. Источником синусоидального напряжения с частотой, изменяемой в диапазоне от 100 до 540 Гц, является *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* установить в положение « $\sim$  10 В». Для измерения входных напряжения  $U$ , тока  $I$ , угла сдвига фаз между ними  $\varphi$ , потребляемой мощности  $P$  используют *Измеритель фазы*. Напряжения на катушке  $U_k$  и конденсаторе  $U_{кон}$  измеряют *Мультиметрами* в режиме вольтметров. Катушку индуктивности и конденсатор выбирают из блока *Модуль реактивных элементов*. Рекомендуемые значения индуктивности катушки  $L$  и емкости конденсатора  $C$  представлены в табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6.1

Индуктивность катушки и емкость конденсатора

$L$ , мГн	20	30	40	50	60	70	80
$C$ , мкФ	22	15	15; 10	10; 6,8	6,8	6,8; 4,7	4,7; 3,3

- 1) Установить заданные преподавателем величины индуктивности  $L$  катушки и емкости  $C$  конденсатора. Занести их значения в протокол измерений.
- 2) Включить тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*. Измерить *мультиметром* в режиме омметра активное сопротивление катушки  $R_k$  и занести его в протокол измерений.
- 3) Рассчитать резонансную частоту  $f_0$  и характеристическое сопротивление  $\rho$ .
- 4) Для определения сопротивления потерь в конденсаторе  $R_C$  собрать электрическую цепь, приведенную на рис. 6.2.
- 5) Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. При заданном напряжении  $U = 6 \dots 9$  В и рассчитанной резонансной частоте  $f_0$  зафиксировать показанные на экране *Измерителя фазы* значения  $I$  и  $P$ . Выключить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*.
- 6) Рассчитать сопротивление потерь в конденсаторе  $R_C$ , добротность контура  $Q$  и полосу пропускания  $\Delta f$ .
- 7) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 6.3. Для измерения действующих значений напряжений на катушке  $U_k$  и на конденсаторе  $U_{кон}$  подключить *мультиметры*. Для наблюдения формы входных тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$  подключить осциллограф.

8) Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* установить в положение « $\sim 10\text{ В}$ ». Регулятором *Частота* установить на выходе модуля *Функциональный генератор* рассчитанную частоту  $f_0$ .

9) Регулятором *Амплитуда* установить заданное преподавателем значение напряжения  $U$ . Подстроить частоту так, чтобы угол  $\varphi \cong 0$ . Напряжение  $U$  поддерживать в работе неизменным.

10) Измерить на частоте  $f_0$  действующие значения тока  $I$ , напряжения на катушке  $U_K$  и конденсаторе  $U_{\text{кон}}$ , активную мощность  $P$ . Измеренные значения занести в табл. 6.2.

11) Уменьшая частоту, определить частоту  $f_1$  – нижнюю граничную частоту полосы пропускания ( $\varphi_1 = -45^\circ$ ).

12) Измерить на частоте  $f_1$  действующие значения тока  $I$ , напряжения на катушке  $U_K$  и конденсаторе  $U_{\text{кон}}$ , активную мощность  $P$ . Измеренные значения занести в табл. 6.2.

13) Увеличивая частоту, определить частоту  $f_2$  – верхнюю граничную частоту полосы пропускания ( $\varphi_2 = 45^\circ$ ).

14) Измерить на частоте  $f_2$  действующее значение тока  $I$ , напряжения на катушке  $U_K$  и конденсаторе  $U_{\text{кон}}$ , активную мощность  $P$ . Измеренные значения занести в табл. 6.2.

15) Изменяя частоту, выполнить аналогичные измерения для  $f > f_0$  и  $f < f_0$ . Измеренные значения занести в табл. 6.2.

16) Перенести на кальку (сфотографировать) с экрана осциллографа кривые  $u(t)$  и  $u_{R_1}(t)$  при  $f = f_1, f = f_0, f = f_2$ . Пометить на осциллограммах  $u(t)$  и  $u_{R_1}(t)$ . Записать масштабы  $m_u$  и  $m_{u_{R_1}}$ .

17) Выключить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор* и тумблер *QF* модуля питания.

18) Выполнить расчет  $U_L(f)$ , полученные значения занести в табл. 6.2.

19) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 6.3. Контрольные вопросы

В цепи с последовательным соединением элементов с параметрами  $R$ ,  $L$  и  $C$ :

1) При каком условии возникает резонанс?

2) Чему равняется входное сопротивление при резонансе?

- 3) Как определяется волновое сопротивление  $\rho$ ?
- 4) Что характеризует добротность контура  $Q$ ?
- 5) Как определяется полоса пропускания  $\Delta f$ ?
- 6) Влияет ли величина  $R$  на резонансную частоту?

#### 6.4. Содержание отчета

- 1) Осциллограммы  $u(t)$  и  $u_{R_1}(t)$  при частотах  $f=f_1, f=f_0, f=f_2$ .
- 2) Частотные характеристики  $I(f)$ ,  $U_k(f)$ ,  $U_L(f)$ ,  $U_C(f)$ ,  $\varphi(f)$ ,  $P(f)$  по данным табл. 6.2.
- 3) Определение полосы пропускания по графику  $\varphi(f)$ .
- 4) Схема замещения исследуемой цепи с указанием значений  $R_1$ ,  $R_k$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R$ .
- 5) Расчет граничных частот  $f_1, f_2$  (6.8) полосы пропускания  $\Delta f$  (6.9) и тока  $I$  на частотах  $f_1, f_0, f_2$  при заданных значениях  $U$ ,  $R_1$ ,  $R_k$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R$  (начальную фазу напряжения принять равной нулю).
- 6) Расчет напряжений на  $R_1, R_k, L, C, R$  на частотах  $f_1, f_0, f_2$ .
- 7) Топографические диаграммы напряжений для частот  $f_1, f_0, f_2$ . Потенциал точки  $d$  принять равным нулю.
- 8) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

#### 6.5. Протокол измерений

Параметры цепи:  $L = \underline{\hspace{1cm}}$  мГн;  $C = \underline{\hspace{1cm}}$  мкФ;  $R_k = \underline{\hspace{1cm}}$  Ом;  $R_1 = 10$  Ом;  $U = \underline{\hspace{1cm}}$  В.

Предварительные расчеты:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \underline{\hspace{1cm}} \quad \text{Гц}; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \underline{\hspace{1cm}} \quad \text{Ом}.$$

$$R_C = \frac{P}{I^2} = \underline{\hspace{1cm}} \quad \text{Ом}; \quad Q = \frac{\rho}{R_C + R_k + R_1} = \underline{\hspace{1cm}} \quad ;$$

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \underline{\hspace{1cm}} \quad \text{Гц}.$$

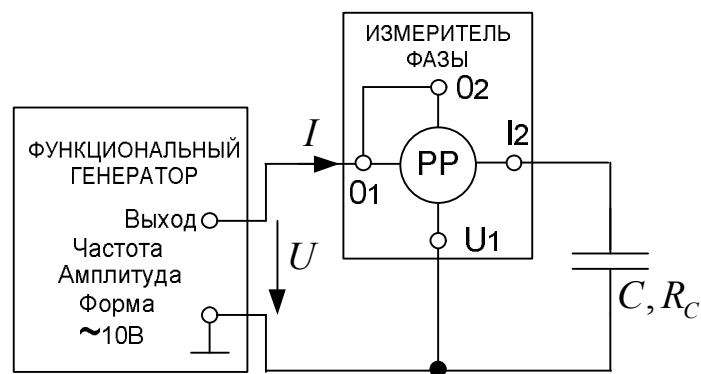


Рис. 6.2. Схема электрической цепи для определения сопротивления потерь в конденсаторе  $R_C$

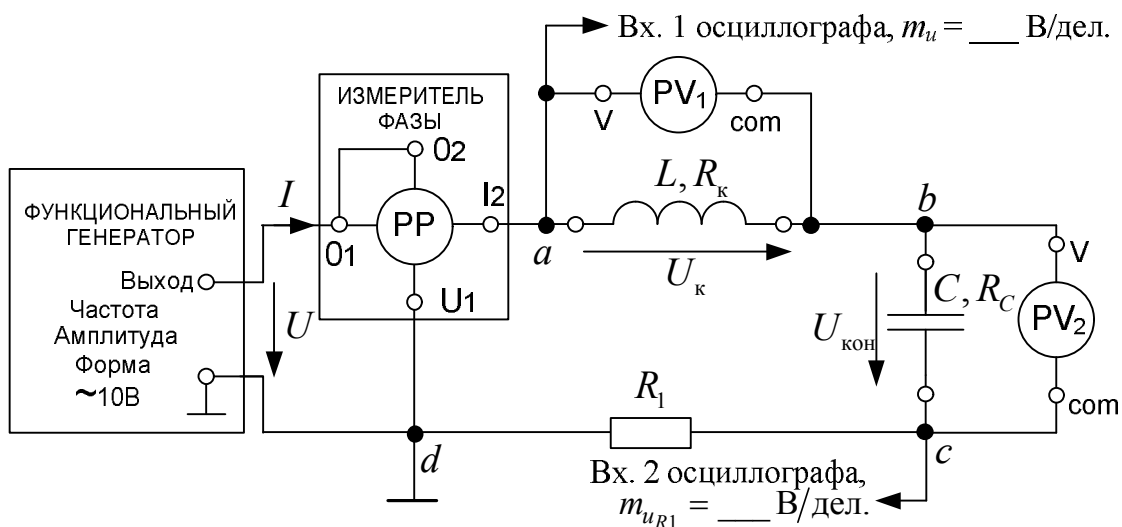


Рис. 6.3. Схема электрической цепи для исследования резонанса напряжений

Т а б л и ц а 6.2

Экспериментальные данные

$f$ , Гц	$I$ , мА	$U_K$ , В	$U_L = \sqrt{U_K^2 - (R_K I)^2}$ , В	$U_{\text{кон}} \approx U_C$ , В	$\varphi$ , град.	$P$ , Вт	Примечания
100							$f < f_1$
					$\approx -45^\circ$		$f_1$
							$f_1 < f < f_0$
					$\approx 0$		$f_0$
							$f_2 > f > f_0$
					$\approx 45^\circ$		$f_2$
540							$f > f_2$

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \quad \text{Гц.}$$



## РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ С ПАРАМЕТРАМИ $R$ , $L$ , $C$

Цель работы: исследование резонансных явлений и резонансных характеристик электрической цепи, содержащей последовательно соединенные элементы с параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $C$ .

### 7.1. Общие сведения

В работе исследуются резонансные характеристики в цепи по схеме рис. 7.1. Резонанс достигается изменением величины емкости  $C$  конденсатора. При резонансе эквивалентное реактивное сопротивление цепи

$$X_0 = \omega L - \frac{1}{\omega C_0} = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC_0} = 0. \quad (7.1)$$

Тогда резонансная емкость

$$C_0 = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}. \quad (7.2)$$

Резонансными характеристиками в этом случае называют зависимости от величины емкости  $C$  действующих значений тока

$$I(C) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (7.3)$$

и напряжения:

$$U_R(C) = RI(C); \quad (7.4)$$

$$U_L(C) = \omega LI(C); \quad (7.5)$$

$$U_C(C) = \frac{I(C)}{\omega C}. \quad (7.6)$$

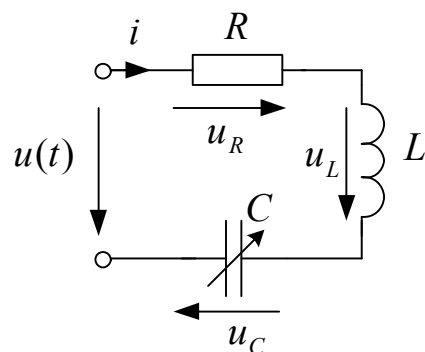


Рис. 7.1. Схема исследования резонанса напряжений

К резонансным характеристикам также относятся зависимости активной  $P(C) = RI^2(C)$ , реактивной  $Q(C) = \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I^2(C)$ , полной  $S(C) = UI(C)$  мощностей и угла сдвига фаз

$$\varphi(C) = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (7.7)$$

При резонансе напряжение на входе цепи  $U = I(C_0)R = U_{R0}$ , ток  $I(C_0) = I_0 = \frac{U}{R}$ ; напряжение  $U_L(C_0) = U_C(C_0)$ . Отношение

$$Q = \frac{U_L(C_0)}{U} = \frac{U_C(C_0)}{U} \quad (7.8)$$

определяет добротность контура  $Q$ , которую также можно определить по параметрам цепи:

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}}{R}. \quad (7.9)$$

## 7.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе используют источник синусоидального напряжения из модуля *Функциональный генератор*, измерительные приборы из блоков *Измеритель фазы* и *Модуль мультиметров*.

Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блока *Модуль реактивных элементов*. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром. Опыты на частоте  $f = 150$  Гц выполняют с катушкой индуктивности  $L = 50$  мГн; на частоте  $f = 200$  Гц при  $L = 20$  или  $30$  мГн; на частоте  $f = 250$  Гц при  $L = 20$  мГн.

1) Установить в блоке *Модуль реактивных элементов* назначенную преподавателем величину индуктивности катушки  $L$ . Включить мультиметр в режим измерения сопротивления. Измерить активное сопротивление  $R_k$  катушки. Записать значения  $L$ ,  $R_k$ ,  $U$  и  $f$  в протокол измерений.

2) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 7.2 протокола измерений. Тумблер *SA2* модуля *Измеритель фазы* установить в положение *I2*. Включить мультиметры в режим измерения переменного напряжения.

3) Для указанной преподавателем частоты  $f$  по формуле (7.3) рассчитать величину резонансной емкости  $C_0$ . Установить в блоке *Модуль реактивных элементов* величину емкости  $C$ , ближайшую к  $C_0$ .

4) Переключатель *Форма* модуля *Функциональный генератор* установить в положение « $\sim 10$  В». Включить тумблер *QF* блока *Модуль питания* и тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Регулятором *Частота* установить на выходе модуля заданную частоту  $f$ .

5) Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения напряжения  $U = 6 - 9$  В. Напряжение  $U$  поддерживать неизменным при выполнении всех опытов.

6) Убедиться в том, что угол  $\varphi$  *примерно* равен нулю. Записать значение  $C$  в табл. 7.1 протокола измерений.

7) Для указанных в табл. 7.1 протокола измерений значений емкости  $C$  измерить действующие значения тока  $I$ , напряжений  $U_k$ ,  $U_C$ ; активную мощность  $P$  и угол  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ . Измеренные значения занести в табл. 7.1. При переключении значений емкости  $C$  необходимо следить за изменением частоты  $f$  и при необходимости восстанавливать ее заданное значение.

8) Выключить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор* и тумблер *QF* модуля питания. Утвердить протокол измерений у преподавателя.

### 7.3. Контрольные вопросы

1) Что характеризует добротность контура?

2) Вычислить добротность контура, состоящего из последовательно соединенных элементов:  $R = 2$  Ом;  $L = 20$  мГн;  $C = 50$  мкФ.

3) Как изменяется значение добротности  $Q$  при изменении активного сопротивления цепи?

4) При каком соотношении  $R$  и  $r$  резонансные свойства цепи с последовательным соединением элементов с параметрами  $R$ ,  $L$  и  $C$  выражены наиболее отчетливо?

## 7.4. Содержание отчета

- 1) Схема замещения исследуемой электрической цепи с указанием значений параметров  $R_k$ ,  $L$ ,  $C$  и частоты  $f$ .
- 2) Таблица 7.1 протокола измерений с результатами расчета резонансных характеристик  $U_{R_k}(C) = R_k I(C)$ ;  $U_L(C) = \sqrt{U_k^2(C) - U_{R_k}^2(C)}$ ;  $S(C) = UI(C)$  и  $Q(C) = S(C) \sin \varphi$ .
- 3) Построение зависимостей  $U_{R_k}(C)$ ,  $U_L(C)$ ,  $U_C(C)$  по данным табл. 7.1 на одной координатной плоскости. Определение добротности  $Q$  контура по графикам в соответствии с выражением (7.4). Сравнение полученного значения  $Q$  со значением, рассчитанным по параметрам цепи на основе формулы (7.5).
- 4) Расчет значений  $U_{R_k} = R_k I$ ,  $U_L = \sqrt{U_k^2 - U_{R_k}^2}$ ,  $S = UI$  и  $Q = S \sin \varphi$  при резонансном значении емкости  $C$ .
- 5) Построение на одном рисунке зависимостей  $P(C)$ ,  $Q(C)$ ,  $S(C)$  и  $\varphi(C)$  по данным табл. 7.1.
- 6) Построение в масштабах векторных диаграмм тока и напряжений при резонансной емкости и емкостях 10 и 47 мкФ.
- 7) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

## 7.5. Протокол измерений

Схема исследуемой электрической цепи представлена на рис. 7.2.

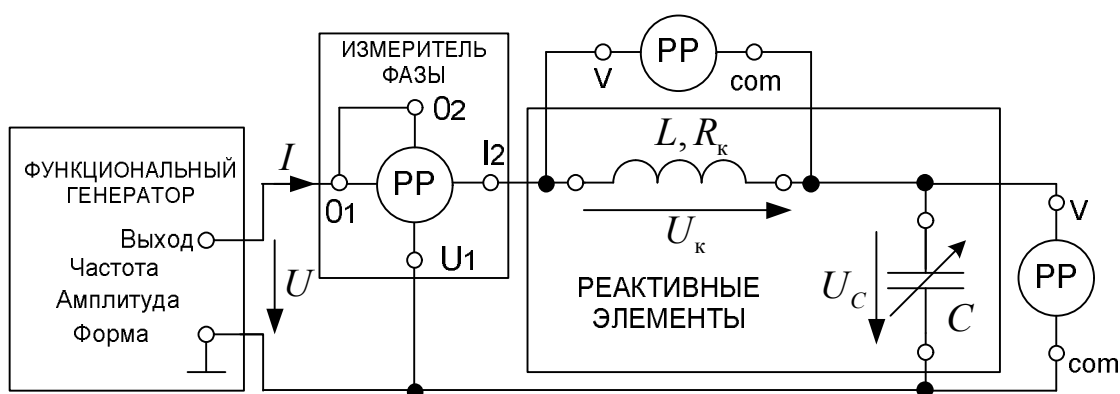


Рис. 7.2. Схема электрической цепи

Параметры входного напряжения:  $U =$  В;  $f =$  Гц.

Параметры элементов:  $R_k =$  Ом;  $L =$  мГн;

$$C_0 = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \approx \text{мкФ.}$$

Результаты измерений и расчетов представлены в табл. 7.1.

Т а б л и ц а 7.1

Результаты измерений и расчетов

Параметр	Значения										
$C$ , мкФ	3,3	4,7	6,8	10	15	22	32	47	57	69	79
Результаты измерений											
$I$ , мА											
$U_K$ , В											
$U_C$ , В											
$\varphi$ , град.											
$P$ , Вт											
Результаты расчетов											
$U_{R_K} = R_K I$ , В											
$U_L = \sqrt{U_K^2 - U_{R_K}^2}$ , В											
$S = UI$ , ВА											
$Q = S \sin \varphi$ , вар											

### Лабораторная работа 8

#### РЕЖИМ РЕЗОНАНСА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: исследование резонансных явлений и частотных характеристик электрической цепи, содержащей параллельно соединенные элементы с параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (резонанс токов).

## 8.1. Общие сведения

В лабораторной работе исследуются резонансные явления в цепи, схема замещения которой представлена на рис. 8.1. Резонанс в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора называют резонансом токов. В данной работе резонанс достигается изменением частоты  $\omega = 2\pi f$  синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$ . Условием резонанса токов в электрической цепи является равенство нулю мнимой части комплексной входной проводимости (эквивалентной реактивной проводимости цепи).

Если пренебречь потерями в конденсаторе, то комплексная проводимость исследуемой цепи

$$\underline{Y} = \frac{1}{R_k + j\omega L} + j\omega C = \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L - \omega C(R_k^2 + (\omega L)^2)}{R_k^2 + (\omega L)^2} = G - jB. \quad (8.1)$$

Для записи условия резонанса приравняем к нулю числитель мнимой части полученного выражения:

$$\omega_0 L - \omega_0 C(R_k^2 + (\omega_0 L)^2) = 0. \quad (8.2)$$

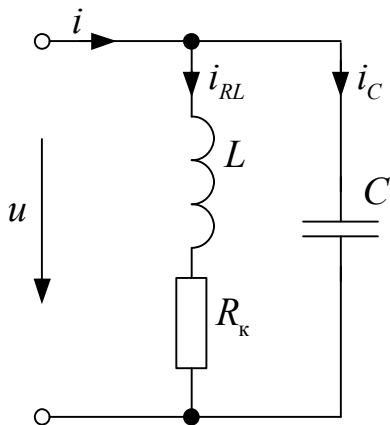


Рис. 8.1. Контур с параллельным соединением элементов с параметрами  $R$ ,  $L$  и  $C$

Резонансная частота

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L - R_k^2 C}{L^2 C}}; \quad (8.3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L - R_k^2 C}{L^2 C}}. \quad (8.4)$$

При резонансе токов в рассматриваемой цепи согласно выражению (8.1) комплексная проводимость

$$\underline{Y} = \underline{Y}_0 = G_0 = \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega_0 L)^2}, \quad (8.5)$$

а входное сопротивление

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{Y}_0} = \frac{R_k^2 + (\omega_0 L)^2}{R_k}. \quad (8.6)$$

## 8.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе используют источник синусоидального напряжения из модуля *Функциональный генератор*, измерительные приборы из блоков *Измеритель фазы* и *Цифровые индикаторы*.

Параметры пассивных элементов задает преподаватель. Рекомендуемые значения представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Индуктивность катушки и емкость конденсатора

$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$C$ , мкФ
110	3,3	90	4,7	70	4,7	50	6,8
100		80		60	6,8	40	10

1) Установить заданные преподавателем величины индуктивности  $L$  катушки и емкости  $C$  конденсатора в блоке *Модуль реактивных элементов*. Включить тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*. Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_k$  катушки. Записать эти значения в протокол измерений.

2) Выполнить предварительный расчет резонансной частоты.

3) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 8.2 протокола измерений. Тумблер  $SA2$  модуля *Измеритель фазы* установить в положение  $I2$ .

4) Переключатель *Форма* установить в положение « $\sim 10$  В». Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения напряжения  $U = 5 - 7$  В, занести это значение в протокол измерений. Действующее значение напряжения  $U$  поддерживать одинаковым во всех опытах.

5) Экспериментально уточнить резонансную частоту  $f_0$  ( $\varphi_0 = 0$ ). Занести полученное значение в протокол измерений.

6) Выполнить измерения для указанных в табл. 8.2 протокола измерений относительных частот  $\nu = f/f_0$ , где  $f_0$  – частота резонанса в эксперименте. Для измерения действующих значений токов  $I_{RL}$  и  $I_C$  использовать амперметры  $PA1$  и  $PA2$  блока цифровые индикаторы ( $SA1$  установить в положение  $\sim$ ).

7) Выключить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор* и тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*.

8) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 8.3. Контрольные вопросы

В цепи с параллельным соединением элементов с параметрами  $R$ ,  $L$  и  $C$ :

- 1) При каком условии возникает резонанс?
- 2) Чему равняются входная реактивная проводимость и входное сопротивление при резонансе?
- 3) Что характеризует добротность контура  $Q$ ?
- 4) Чему равна реактивная мощность цепи при резонансе?
- 5) Влияет ли величина  $R_k$  на резонансную частоту?
- 6) При какой частоте входной ток цепи имеет минимальное значение и почему?
- 7) Привести вывод формулы (8.3).

### 8.4. Содержание отчета

- 1) Схема замещения исследуемой цепи с указанием величин  $R_k$ ,  $L$ ,  $C$ .
- 2) Расчет резонансной частоты  $f_0$ .
- 3) Расчет токов  $I$ ,  $I_{RL}$ ,  $I_C$  для частот  $0,5f_0$ ,  $f_0$ ,  $2f_0$ , где  $f_0$  – уточненная в результате эксперимента частота резонанса. При расчетах принять начальную фазу напряжения равной нулю. Результаты расчета занести в табл. 8.2 и сравнить с экспериментальными значениями.
- 4) Построение векторных диаграмм токов на частотах  $0,5f_0$ ,  $f_0$ ,  $2f_0$ .
- 5) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

### 8.5. Протокол измерений

Параметры цепи:  $L =$  мГн;  $R_k =$  Ом;  $C =$  мкФ;  $U =$  В.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L - R_k^2 C}{L^2 C}} = \quad = \quad \approx \quad \text{Гц.}$$

Схема исследуемой электрической цепи представлена на рис. 8.2. Экспериментальные данные представлены в табл. 8.2.



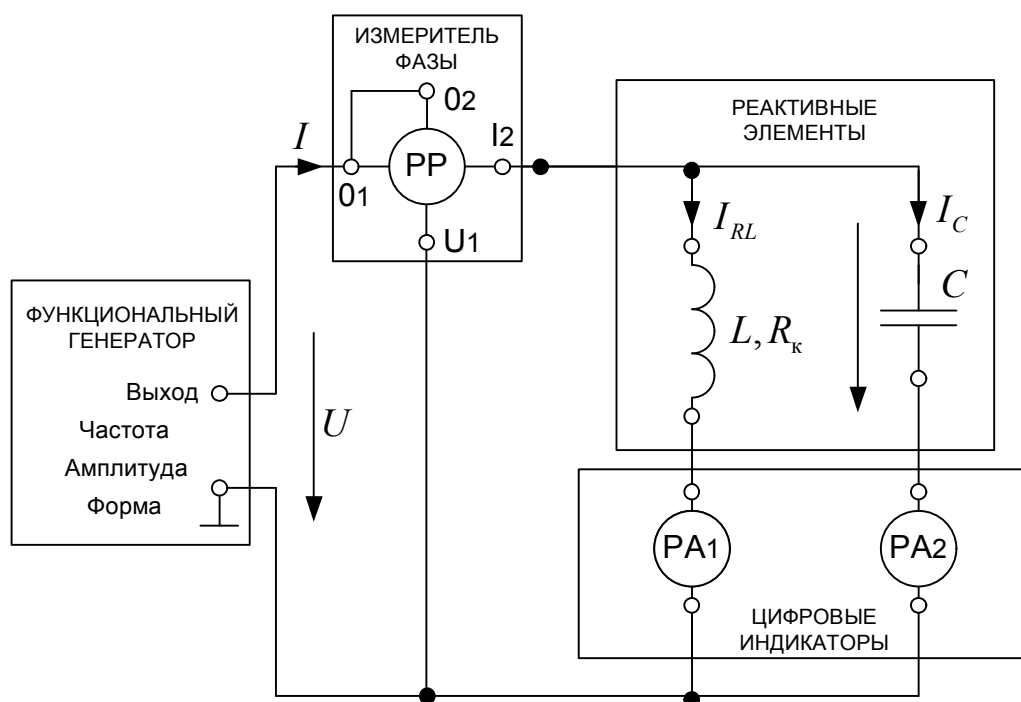


Рис. 8.2. Схема электрической цепи

Таблица 8.2

Результаты измерений и расчетов

Параметр	Значение		
Результаты измерений			
$\nu = \frac{f}{f_0}$	0,5	1	2
$f$ , Гц			
$I$ , мА			
$I_{RL}$ , мА			
$I_C$ , мА			
$\varphi$ , град.			
Результаты расчета			
$\dot{I}_{RL}$ , мА			
$\dot{I}_C$ , мА			
$\dot{I}$ , мА			
$\varphi$ , град.			

### Библиографический список

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие / Г. И. Атабеков. СПб: Лань, 2009. 592 с.
2. Тэттер А. Ю. Режимы постоянного и синусоидального тока в линейных электрических цепях: Учебное пособие / А. Ю. Тэттер, Т. В. Ковалева, А. В. Пономарев / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 180 с.
3. Тэттер А. Ю. Основы теории цепей постоянного и переменного тока: Учебное пособие / А. Ю. Тэттер, А. В. Пономарев / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. 143 с.
4. Непалов В. Н. Теория электрических цепей: Методические указания к проведению лабораторных работ / В. Н. Непалов, В. И. Сафонов, В. В. Шулдяков. Челябинск: Учтех-Профи, 2013. 113 с.

*Учебное издание*

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, КОВАЛЕВА Татьяна Владимировна,  
ПАШКОВА Наталья Викторовна, ПОНОМАРЕВ Антон Витальевич,  
ТЭТТЭР Александр Юрьевич, ТЭТТЭР Владимир Юрьевич

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

*Часть 1*

---

Редактор Н. А. Майорова

\*\*\*

Подписано в печать 02.02.2018. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 3,5.  
Тираж 300 экз. Заказ .

\*\*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35