

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

***ЧАСТЬ 2***

**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 2*

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 2 / 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 темам «Цепи несинусоидального тока», «Трёхфазные цепи», «Переходные процессы», 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.: 5 назв. Табл. 6. Рис. 32.

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. Влияние реактивных элементов на форму кривой тока при несинусоидальном входном напряжении .....	6
1.1. Общие сведения.....	6
1.2. Порядок выполнения работы .....	8
1.3. Контрольные вопросы .....	10
1.4. Содержание отчета.....	10
1.5. Протокол измерений .....	10
Лабораторная работа 2. Линейные электрические цепи несинусоидального периодического тока .....	12
2.1. Порядок выполнения работы .....	12
2.2. Контрольные вопросы .....	16
2.3. Содержание отчета.....	16
2.4. Протокол измерений .....	17
Лабораторная работа 3. Трехфазная цепь, соединенная звездой .....	18
3.1. Общие сведения.....	18
3.2. Порядок выполнения работы .....	20
3.3. Контрольные вопросы .....	22
3.4. Содержание отчета.....	22
3.5. Указания по построению векторных диаграмм .....	22
3.6. Протокол измерений .....	25
Лабораторная работа 4. Трехфазная цепь, соединенная треугольником .....	25
4.1. Общие сведения.....	25
4.2. Порядок выполнения работы .....	26
4.3. Контрольные вопросы .....	28
4.4. Содержание отчета.....	28
4.5. Указания по построению векторных диаграмм .....	28
4.6. Протокол измерений .....	30
Лабораторная работа 5. Переходные процессы в $R$ - $C$ - и $R$ - $L$ -цепи .....	31
5.1. Общие сведения.....	31
5.2. Порядок выполнения работы .....	32
5.3. Контрольные вопросы .....	35
5.4. Содержание отчета.....	35

5.5. Протокол измерений .....	36
Лабораторная работа 6. Переходный процесс в цепи с $R-L-C$ .....	37
6.1. Общие сведения.....	37
6.2. Порядок выполнения работы .....	39
6.3. Контрольные вопросы .....	41
6.4. Содержание отчета.....	41
6.5. Протокол измерений .....	41
Лабораторная работа 7. Экспериментальное определение $A$ -параметров четырехполюсника .....	43
7.1. Общие сведения .....	43
7.2. Порядок выполнения работы .....	44
7.3. Контрольные вопросы .....	45
7.4. Содержание отчета.....	46
7.5. Протокол измерений .....	46
Библиографический список.....	49

## ВВЕДЕНИЕ

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

Во втором семестре изучения ТОЭ выполняются работы по темам: «Цепи несинусоидального тока», «Трехфазные цепи», «Переходные процессы» и «Четырехполюсники».

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

Описание лабораторного стенда, основных принципов работы с ним, а также требования к оформлению отчета представлены в учебно-методическом пособии [5]. Среди основных положений можно выделить следующие.

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.

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

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.

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.

## ВЛИЯНИЕ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМУ КРИВОЙ ТОКА ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ ВХОДНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Цель работы: определение влияния индуктивности и емкости на форму кривой тока при несинусоидальном входном напряжении.

### 1.1. Общие сведения

Периодическую несинусоидальную функцию, например напряжение  $u(t) = u(t + T)$ , где  $T$  – период, можно представить тригонометрическим рядом Фурье

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_k \sin k\omega t + C_k \cos k\omega t), \quad (1.1)$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая;

$B_k \sin k\omega t$ ,  $C_k \cos k\omega t$  – гармонические составляющие.

Гармоническая составляющая, период  $T$  которой равен периоду  $u(t)$ , называется основной или первой. Остальные гармоники называются высшими.

Расчет линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока основан на принципе наложения. Расчет цепи ведут отдельно для постоянной составляющей, основной и высших гармоник.

Для расчета токов и напряжений гармонических составляющих используют комплексный метод расчета. При этом следует иметь в виду, что комплексные сопротивления индуктивности  $\underline{Z}_L(k\omega) = jk\omega L$  и емкости  $\underline{Z}_C = 1/jk\omega C = -j/k\omega C$  зависят от номера  $k$  гармоники. Принцип наложения справедлив только для мгновенных значений несинусоидальных токов и напряжений. Ток и напряжение ветви вычисляются по уравнениям:

$$\begin{cases} i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n i_k(k\omega t); \\ u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n u_k(k\omega t), \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $n$  – номер последней высшей гармоники, принятой в расчете.

Действующее значение тока  $I$  рассчитывается по формуле

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2}, \quad (1.3)$$

где  $I_0$  – постоянная составляющая,

$I_k$  – действующее значение  $k$ -й гармоники.

Активная мощность цепи равна сумме активных мощностей постоянной и гармонических составляющих

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (1.4)$$

Реактивная и полная мощность определяется по формулам:

$$Q = \sum_{k=1}^n U_k I_k \sin \varphi_k; \quad (1.5)$$

$$S = UI, \quad (1.6)$$

где  $U = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2}$ ,  $I = \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}$  – действующие значения напряжения и тока.

Коэффициент мощности  $k_m = P/S = P/UI$ .

Для оценки степени отличия несинусоидальной симметричной кривой от синусоиды используют:

коэффициент формы

$$k_\Phi = I/I_{\text{cp}}, \quad (1.7)$$

где  $I_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$  – среднее по модулю значение тока;

коэффициент амплитуды

$$k_{\text{ам}} = I_{\text{max}}/I, \quad (1.8)$$

где  $I_{\text{max}}$  – максимальное значение несинусоидального тока;

коэффициент искажения

$$k_{\text{ис}} = I_1/I, \quad (1.9)$$

где  $I_1$  – действующее значение тока основной гармоники;



коэффициент несинусоидальности

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}. \quad (1.10)$$

## 1.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе рассматривается влияние индуктивности и емкости на форму кривой тока, проводится расчет цепи несинусоидального тока, основанный на принципе наложения.

В опытах исследуют электрические цепи с напряжением на входе в форме знакопеременных прямоугольных импульсов (рис. 1.1).

Ряд Фурье для такого напряжения имеет вид:

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right), \quad (1.11)$$

его действующее значение

$$U = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T u^2(t) dt} = \frac{1}{T} \sqrt{U_m^2 \int_0^T dt} = U_m. \quad (1.12)$$

Источником несинусоидального напряжения в форме знакопеременных импульсов является модуль *Функциональный генератор*.

Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков *Модуль реактивных элементов* и *Модуль резисторов*. Рекомендуемые значения:  $L = 30 - 80$  мГн;  $C = 22 - 57$  мкФ. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром. Сопротивление  $R = 10$  Ом берут из блока *Модуль резисторов*.

Измерения действующих значений напряжения  $U$  и тока  $I$  выполняют вольтметром и амперметром, встроенными в модуль *Цифровые индикаторы*. Для получения зависимостей напряжения от времени используют *Осциллограф*.

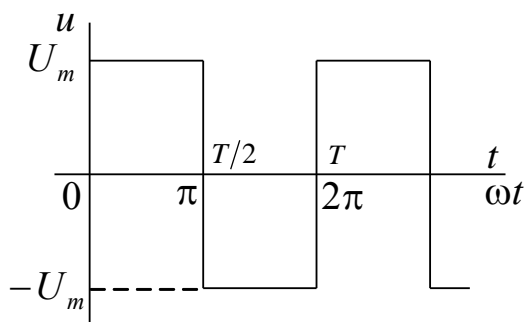


Рис. 1.1. Входное напряжение

**Все изменения в схеме выполнять при выключенном тумблере *Сеть* модуля *Функциональный генератор*.**

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

2) Установить в модуле *Реактивные элементы* заданные преподавателем значения индуктивности  $L$  катушки и емкости  $C$  конденсатора.

3) Включить автоматический тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*. Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_k$  катушки, записать это значение в протокол измерений. Поскольку используемые в работе конденсаторы обладают значительными потерями, в расчете необходимо учитывать

$$R_C(\omega) = \frac{X_C(\omega)}{\operatorname{tg}\varphi_C}, \quad (1.13)$$

где  $\varphi_C \approx 81^\circ$ . Рассчитать  $R_C(\omega)$ ,  $R_C(3\omega)$ ,  $R_C(5\omega)$ , занести в протокол измерений.

### 1.2.1. Первый опыт

1) Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* модуля *Функциональный генератор* установить в положение  $\sqcap$ , что соответствует форме  $u(t)$  на рис. 1.1. Регулятором *Частота* установить частоту  $f = 50$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину амплитудного (действующего) значения напряжения  $u(t)$  8 – 10 В (по показанию вольтметра в блоке *Цифровые индикаторы*).

2) Включить *Осциллограф*. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки.

3) Подключить *Вход 1* осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа так, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Установить переключатель усиления по напряжению таким образом, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб  $m_U$  на переключателе усиления по напряжению, убедиться в том, что амплитуда входного напряжения равна заданному значению. **Указанный порядок настройки осциллографа необходимо использовать и в остальных опытах.**

4) Подключить *Вход 2* осциллографа к резистору  $R$ . Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u(t)$  и  $u_R(t)$ .

5) Записать в протокол измерений масштабы  $m_U$ ,  $m_{U_R}$ ,  $m_t$  и действующее значение тока  $I$ .

### 1.2.2. Второй опыт

Вместо катушки индуктивности включить конденсатор (рис. 1.3).

Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана осциллографа кривые зависимостей  $u(t)$  и  $u_R(t)$ . Записать в протокол измерений масштабы  $m_U$  и  $m_{U_R}$ ,  $m_t$  и действующее значение тока  $I$ .

### 1.3. Контрольные вопросы

- 1) Как определяются коэффициенты ряда Фурье  $A_0, B_n, C_n$ ?
- 2) Как получить коэффициенты синусного ряда  $A_{nm}$  и начальные фазы  $\psi_n$  по известным  $B_n$  и  $C_n$ ?
- 3) Как определяются действующие значения  $U$  и  $I$  несинусоидальных напряжения и тока?
- 4) Как индуктивность влияет на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении? Объяснить причину.
- 5) Как емкость влияет на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении? Объяснить причину.

### 1.4. Содержание отчета

- 1) Осциллограммы напряжений.
- 2) Расчет  $X(\omega), X(3\omega), X(5\omega), Z(\omega), Z(3\omega), Z(5\omega), \dot{I}_{1m}, \dot{I}_{3m}, \dot{I}_{5m}, \frac{I_{3m}}{I_{1m}}, \frac{I_{5m}}{I_{1m}}, i, I$ , коэффициентов искажения тока  $k_{ис\ i}$  (1.9) и несинусоидальности тока  $k_{нс\ i}$  (1.10) в схемах рис. 1.2 и 1.3. Результаты занести в табл. 1.1.
- 3) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

### 1.5. Протокол измерений

Параметры элементов:  $R = 10 \text{ Ом}$ ;  $L = \text{___ мГн}$ ;  $R_k = \text{___ Ом}$ ;  $C = \text{___ мкФ}$ .

Параметры несинусоидального напряжения (знакопеременных импульсов):  $U_m = \text{___ В}$ ;  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Сопротивление потерь в диэлектрике конденсатора (1.13):

$R_C(\omega) = \text{___ Ом}$ ;  $R_C(3\omega) = \text{___ Ом}$ ;  $R_C(5\omega) = \text{___ Ом}$ .

Амплитуды и действующие значения гармоник напряжения:

$$U_{m(1)} = \frac{4U_m}{\pi} = \text{--- В}; \quad U_{m(3)} = \frac{4U_m}{3\pi} = \text{--- В}; \quad U_{m(5)} = \frac{4U_m}{5\pi} = \text{--- В};$$

$$U_{(1)} = U_{m(1)} / \sqrt{2} = \text{--- В}; \quad U_{(3)} = U_{m(3)} / \sqrt{2} = \text{--- В}; \quad U_{(5)} = U_{m(5)} / \sqrt{2} = \text{--- В}.$$

Коэффициенты несинусоидальности и искажения по напряжению:

$$k_{н\text{с}u} = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2}}{U_1} = \text{---} = \text{---}; \quad k_{исu} = \frac{U_1}{U} = \text{---} = \text{---}.$$

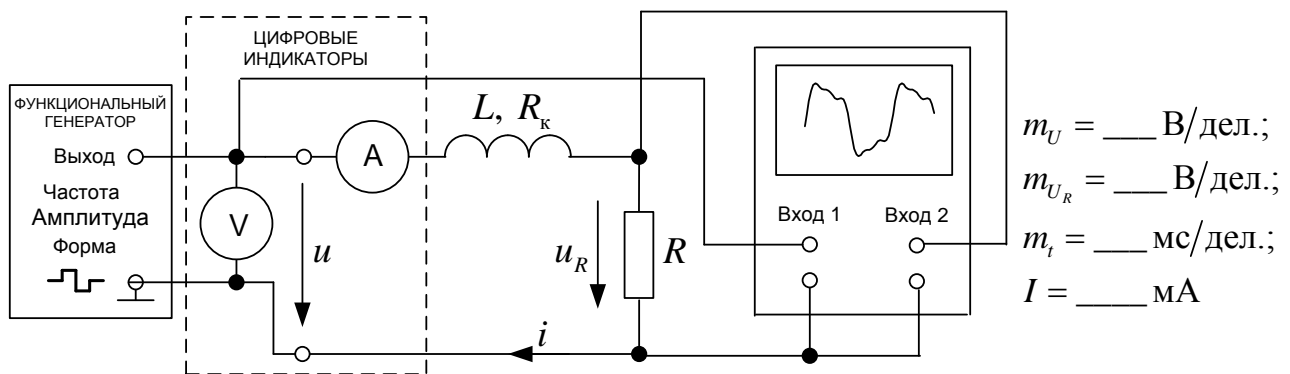


Рис. 1.2. Схема первого опыта

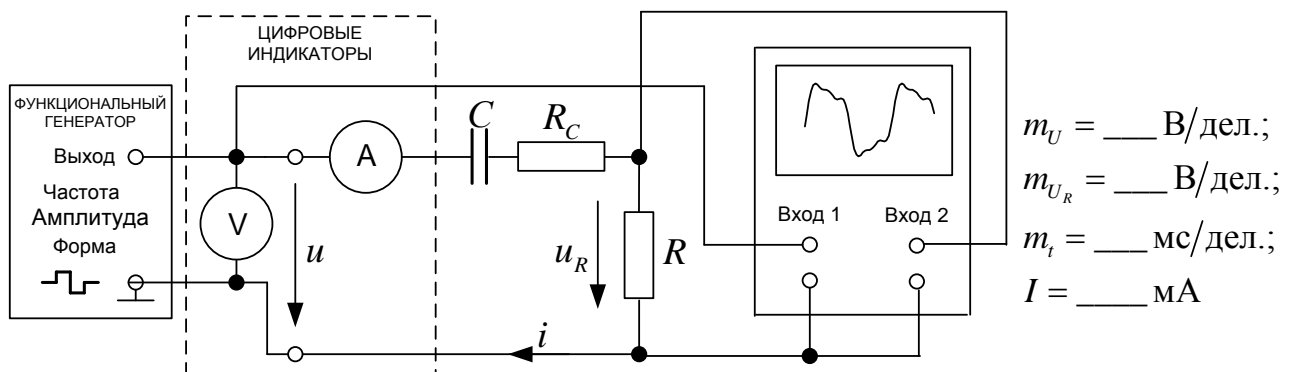


Рис. 1.3. Схема второго опыта

Таблица 1.1

Сравнение результатов эксперимента и расчета

Цепь	$Z(\omega)$	$Z(3\omega)$	$Z(5\omega)$	$\frac{I_{3m}}{I_{1m}}$	$\frac{I_{5m}}{I_{1m}}$	$k_{н\text{с}i}$	$k_{исi}$	$I, \text{ мА,}$ расчет	$I, \text{ мА,}$ опыт
$R-L$									
$R-C$									

## Лабораторная работа 2

### ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное подтверждение метода расчета цепи с источником периодического несинусоидального напряжения.

#### 2.1. Порядок выполнения работы

Источником несинусоидального напряжения в форме знакопеременных импульсов в этой работе является модуль *Функциональный генератор*. Этот модуль также позволяет получить необходимые синусоидальные напряжения.

Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков *Модуль реактивных элементов* и *Модуль резисторов*. Рекомендуемые значения:  $L = 30 - 80$  мГн;  $C = 22 - 57$  мкФ. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром. Сопротивление  $R = 10$  Ом берут из блока *Модуль резисторов*.

Измерения действующих значений напряжения  $U$  и тока  $I$ , активной мощности  $P$  и угла сдвига фаз выполняют приборами, встроенными в модуль *Измеритель фазы*. Для получения зависимостей напряжения от времени используют *Осциллограф*.

**Все изменения в схеме выполнять при выключенном тумблере *Сеть* модуля *Функциональный генератор*.**

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 2.3. Тумблер SA2 модуля *Измеритель фазы* установить в положение I2.

2) Установить в модуле *Реактивные элементы* заданные преподавателем значения индуктивности  $L$  катушки и емкости  $C$  конденсатора.

3) Включить автоматический тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*. Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_k$  катушки и записать его в протокол измерений.

##### 2.1.1. Первый опыт

1) Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* модуля *Функциональный генератор* установить в положение  $\square$ , что соответствует форме  $u(t)$  на рис. 1.1. Регулятором *Частота* установить частоту

$f = 50$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину амплитудного (действующего) значения напряжения  $u(t)$  8 – 10 В, записать её в протокол измерений.

2) Включить *Осциллограф*. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки.

3) Подключить *Вход 1* осциллографа к источнику и убедиться в том, что амплитуда входного напряжения равна заданному значению.

4) Подключить *Вход 2* осциллографа к резистору  $R$ . Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u(t)$  и  $u_R(t)$ .

Записать масштабы  $m_U$ ,  $m_{U_R}$ ,  $m_t$ .

5) Измерить приборами модуля *Измеритель фазы* действующие значения напряжения  $U$  и тока  $I$ , активную мощность  $P$ . Измеренные значения занести в табл. 2.1.

### 2.1.2. Вторым опытом

В этом опыте выполняются измерения при входном напряжении  $u(t)$  синусоидальной формы, равном первой, третьей и пятой гармоникам разложения исходного напряжения в ряд Фурье.

Входные напряжения в опыте соответственно равны:

$$\begin{cases} u_{(1)}(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sin \omega t; \\ u_{(3)}(t) = \frac{4U_m}{3\pi} \sin 3\omega t; \\ u_{(5)}(t) = \frac{4U_m}{5\pi} \sin 5\omega t. \end{cases} \quad (2.1)$$

В опыте необходимо произвести следующие действия.

1) По формулам (2.1) рассчитать амплитуды  $U_{(1m)}$ ,  $U_{(3m)}$ ,  $U_{(5m)}$  и действующие значения  $U_{(1)} = \frac{U_{(1m)}}{\sqrt{2}}$ ,  $U_{(3)} = \frac{U_{(3m)}}{\sqrt{2}}$ ,  $U_{(5)} = \frac{U_{(5m)}}{\sqrt{2}}$  гармонических составляющих входного напряжения, занести их в табл. 2.1.

2) Переключатель *Форма* модуля *Функциональный генератор* установить в положение « $\sim 10$ ».

3) Регулятором *Частота* установить на выходе модуля *Функциональный генератор* частоту  $f = 50$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения основной гармоники  $U_{(1)}$  входного напряжения.

4) Приборами модуля *Измеритель фазы* измерить действующее значение тока  $I$ , угол  $\varphi$  и активную мощность  $P$ . Полученные значения занести в табл. 2.1. Совместить нулевые линии первого и второго каналов *Осциллографа*. Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u(t)$  и  $u_R(t)$ . Обратить внимание на значение угла  $\varphi$ . **Указанный порядок измерений использовать в следующих опытах.**

5) Регулятором *Частота* установить на выходе модуля *Функциональный генератор* частоту  $f = 150$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить рассчитанную величину действующего значения третьей гармоники  $U_{(3)}$  входного напряжения.

6) Выполнить измерения. Полученные значения занести в табл. 2.1.

7) Регулятором *Частота* установить на выходе модуля *Функциональный генератор* частоту  $f = 250$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить рассчитанную величину действующего значения пятой гармоники  $U_{(5)}$  входного напряжения.

8) Выполнить измерения. Полученные значения занести в табл. 2.1.

9) Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.

### 2.1.3. Третий опыт

В этом опыте исследуют электрическую цепь с напряжением на входе в форме однополярных импульсов (рис. 2.1). Схемы исследуемых электрических цепей представлены на рис. 2.2.

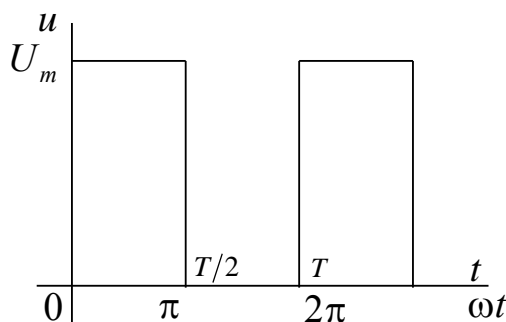


Рис. 2.1. Однополярные импульсы входного напряжения

Ряд Фурье такого напряжения имеет вид:

$$u(t) = \frac{U_m}{2} + \frac{2U_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right). \quad (2.2)$$

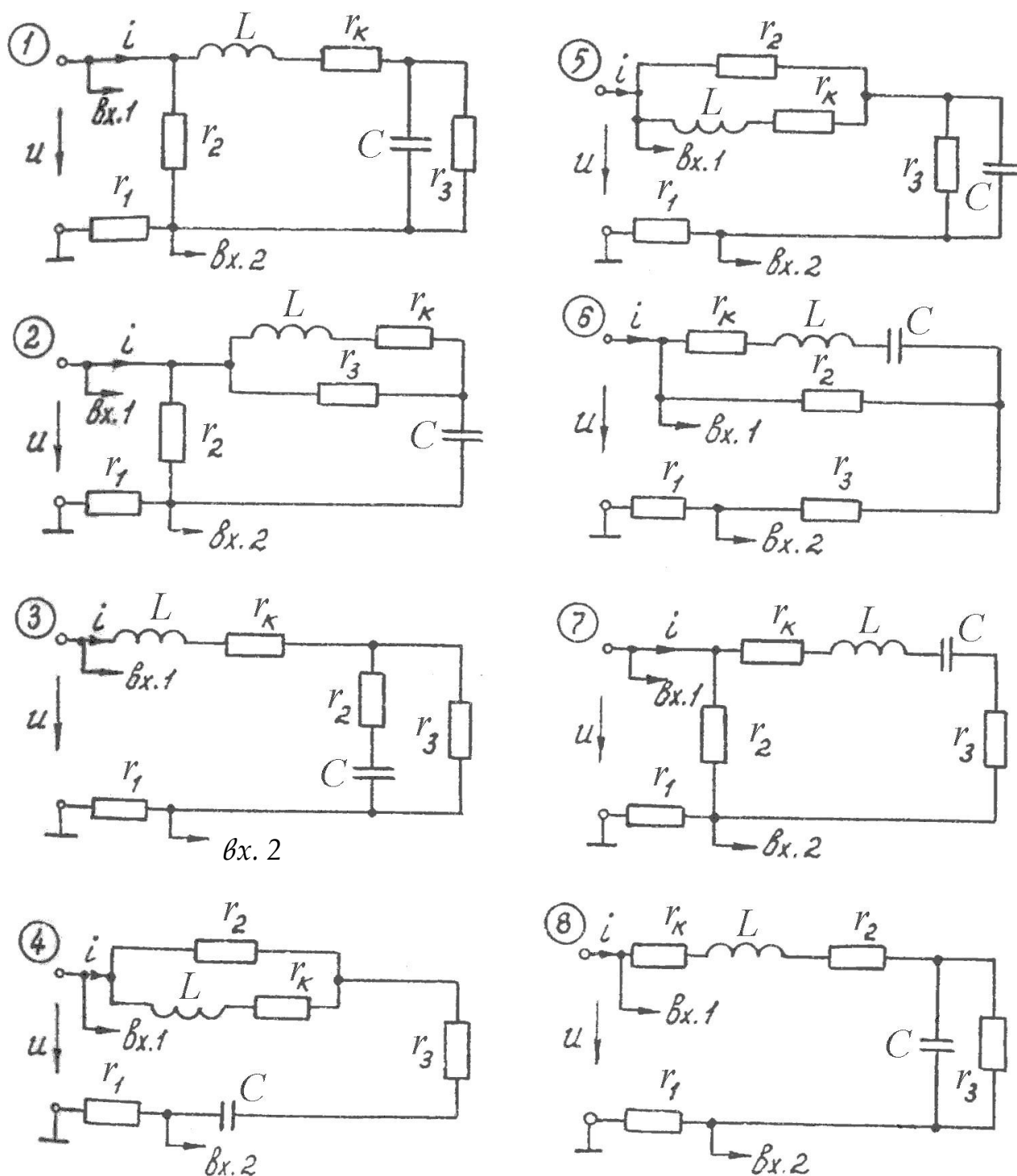


Рис. 2.2. Схемы электрических цепей

В опыте необходимо произвести следующие действия.

1) Подключить к макету одной из схем рис. 2.2 (в соответствии с заданием преподавателя) *Осциллограф* и выход *Функционального генератора*, переключатель которого *Форма* установлен в положение  $\square$  (рис. 2.4). Установить на первом входе осциллографа  $m_U = 5$  В/дел., на втором – 5 В/дел.



2) Регулятором *Амплитуда* установить величину  $U_m$  от 3 до 10 В (по показаниям осциллографа). Установить необходимые  $m_U$  и  $m_{U_{r1}}$ .

3) Регулятором *Частота* установить частоту 1 – 5 кГц. Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u(t)$  и  $u_{r1}(t)$ . Записать масштабы  $m_U$ ,  $m_{U_{r1}}$ ,  $m_t$ .

## 2.2. Контрольные вопросы

1) Как определяются активная  $P$ , реактивная  $Q$  и полная  $S$  мощности в цепях с несинусоидальными напряжениями и токами?

2) Чему равно входное сопротивление цепи с последовательным соединением  $R, L, C$  ( $R = 10$  Ом,  $\omega L = 10$  Ом,  $1/\omega C = 10$  Ом) на частотах  $\omega_0 = 0$ ,  $\omega_1 = \omega$ ,  $\omega_2 = 2\omega$ ?

## 2.3. Содержание отчета

1) Осциллограммы входного напряжения  $u(t)$  и напряжения  $u_R(t)$ .

2) По данным второго опыта рассчитать  $U, I, P$  в соответствии с выражениями (2.3) – (2.5). Полученные значения записать в табл. 2.1.

3) Используя значения  $C, L, R_k, R, \omega, U_{(1)}, U_{(3)}, U_{(5)}$ , рассчитать для каждой гармоники  $\underline{Z}, I, \varphi, P$ . Расчет выполнить в комплексной форме. Записать мгновенные значения входного напряжения  $u$ , тока  $i$  как суммы первой, третьей и пятой гармоник. Рассчитать  $U, I$  и  $P$  (2.3) – (2.5). Полученные значения записать в табл. 2.1 и сравнить их с результатами эксперимента. Построить  $i(t)$ , сравнить с осциллограммой.

4) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

**Для третьего опыта.**

5) Записать  $u = U_0 + u_1 + u_3 + u_5$ .

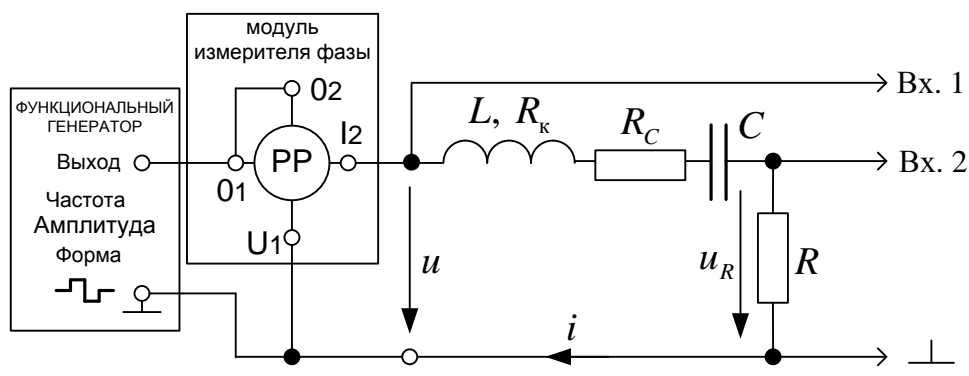
6) Рассчитать входные сопротивления  $Z_0, \underline{Z}(\omega), \underline{Z}(3\omega), \underline{Z}(5\omega)$ .

7) Найти  $I_0, \dot{I}_{m1}, \dot{I}_{m3}, \dot{I}_{m5}$ .

8) Записать  $i = I_0 + i_1 + i_3 + i_5$ .

9) Построить графики  $u(t), i(t)$ , сравнить их с осциллограммами.

## 2.4. Протокол измерений



$L = \text{___ мГн};$   
 $R_k = \text{___ Ом};$   
 $C = \text{___ мкФ};$   
 $R_c = \text{___ Ом};$   
 $m_U = \text{___ В/дел.};$   
 $m_{U_R} = \text{___ В/дел.};$   
 $m_i = \text{___ мс/дел.}$

Рис. 2.3. Схема первого и второго опытов

Таблица 2.1

Сравнение результатов эксперимента и расчета

Номер опыта	Напряжение	Эксперимент					Расчет для $\omega, 3\omega, 5\omega$			
		$U_m, \text{В}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$\varphi, ^\circ$	$P, \text{Вт}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$\varphi, ^\circ$	$P, \text{Вт}$
1	Несинусоидальное $u(t)$									
2	Синусоидальное $u_{(1)}$									
	Синусоидальное $u_{(3)}$									
	Синусоидальное $u_{(5)}$									
	Расчет по данным второго опыта									
Расчет методом наложения для $u_{(1)}, u_{(3)}, u_{(5)}$										

$$U = \sqrt{U_{(1)}^2 + U_{(3)}^2 + U_{(5)}^2}; \quad (2.3)$$

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2 + I_{(5)}^2}; \quad (2.4)$$

$$P = P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)}. \quad (2.5)$$

### 2.4.1. Исходные данные и схема третьего опыта

Амплитуда несинусоидального напряжения (однополярные импульсы):

$U_m = \text{___ В};$  частота  $f = \text{___ кГц.}$  Схема №  $\text{___}.$

$r_1 = \text{___ Ом};$   $r_2 = \text{___ Ом};$   $r_3 = \text{___ Ом};$   $L = \text{___ мГн};$

$r_k = \text{___ Ом};$   $C = \text{___ мкФ}.$

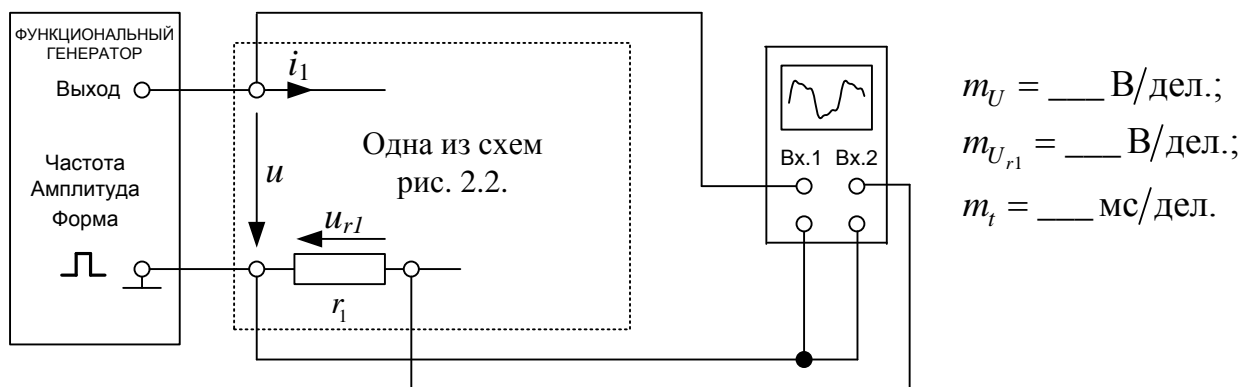


Рис. 2.4. Схема третьего опыта

### Лабораторная работа 3

## ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ, СОЕДИНЕННАЯ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: экспериментальное исследование режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой.

### 3.1. Общие сведения

*Трехфазной цепью* называется совокупность трех электрических цепей, называемых фазами, в которых действует система трех синусоидальных ЭДС одной и той же частоты, сдвинутых по фазе на определенный угол и создаваемых общим источником электрической энергии (генератором).

Фазы генератора трехфазной цепи обозначаются буквами  $A, B, C$ , фазы нагрузки –  $a, b, c$ . Если три ЭДС  $e_A, e_B$  и  $e_C$  равны по амплитуде и сдвинуты по фазе одна относительно другой на угол  $2\pi/3$ , то такую систему называют *симметричной трехфазной системой*.

ЭДС  $e_A = E_m \sin \omega t$ ,  $e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$  и  $e_C = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3)$  образуют симметричную трехфазную систему прямой последовательности.

Фазы генератора и нагрузки всегда соединены (связаны). Основными видами соединения ЭДС источника и сопротивлений нагрузки являются *звезда* и *треугольник*.

На рис. 3.1 показан способ соединения фаз трехфазного источника звездой. Напряжения  $U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}$  называются фазными, напряжения  $U_{AB}, U_{BC}$ ,

$U_{CA}$  – линейными. В симметричном источнике  $U_{AN} = U_{BN} = U_{CN} = U_{\Phi}$ ,  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{Л}$ , причем  $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\Phi}$ .

На рис. 3.1 нагрузка также соединена звездой. Напряжения  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$  называются фазными, напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  – линейными. При соединении звездой токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  являются и фазными, и линейными одновременно.

На рис. 3.2 показана топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для случая симметричной трехфазной цепи при сопротивлениях нагрузки  $Z_A = Z_B = Z_C = R$ . В симметричном режиме  $I_A = I_B = I_C = I_{Л} = I_{\Phi}$ ,  $U_{An} = U_{Bn} = U_{Cn} = U_{\Phi}$ . Ток в нейтральном проводе  $I_N = 0$ , напряжение смещения нейтрали  $U_{nN} = 0$ .

При несимметричной нагрузке  $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ , напряжение  $U_{nN}$  зависит от характера нагрузки и наличия нейтрального провода. На рис. 3.3 в качестве примера представлены диаграммы трехфазной цепи с четырехпроводной схемой соединения (с нейтральным проводом при  $Z_N = 0$ ), а на рис. 3.4 – с трехпроводной схемой соединения (без нейтрального провода при  $Z_N = \infty$ ) с резистивной нагрузкой.

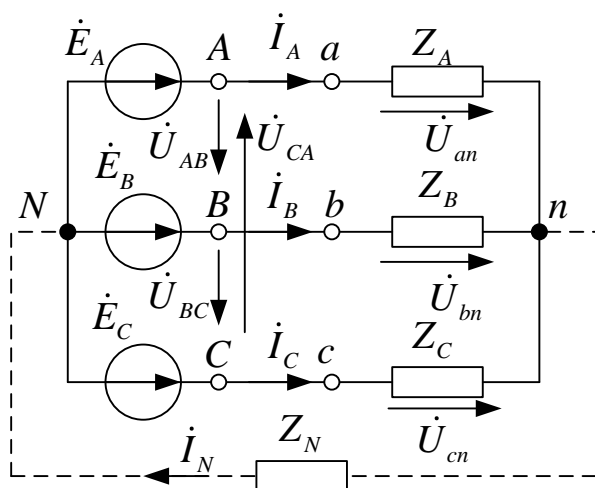


Рис. 3.1. Схема соединения звездой

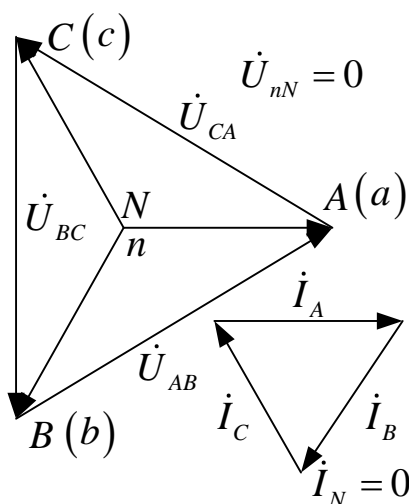


Рис. 3.2. Векторные диаграммы токов и напряжений

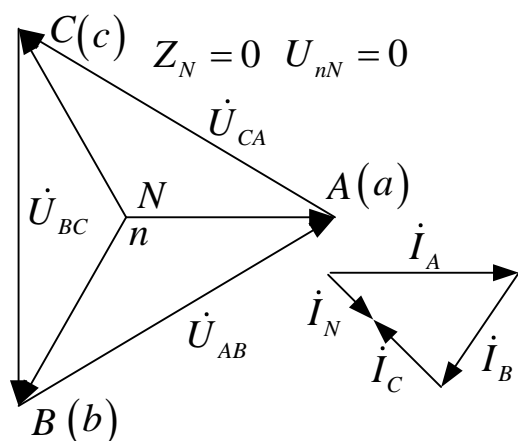


Рис. 3.3. Векторные диаграммы токов и напряжений при  $Z_N = 0$

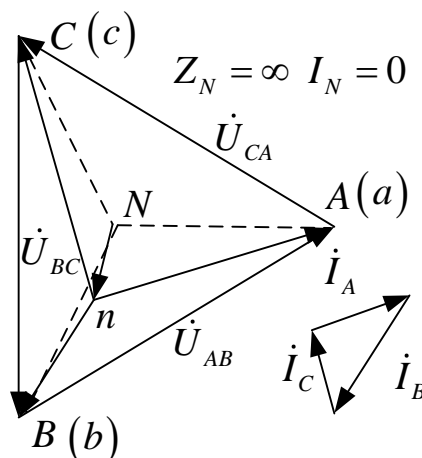


Рис. 3.4. Векторные диаграммы токов и напряжений при  $Z_N = \infty$

### 3.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуют режимы работы трехфазной цепи с четырехпроводной (звезда – звезда с нейтральным проводом) и трехпроводной (звезда – звезда без нейтрального провода) схемами соединения.

Источником симметричного трехфазного напряжения является модуль *Трехфазный источник питания* (UZ1). Источник создает систему напряжений прямого следования фаз с фазным напряжением  $U_{\phi} = 7 - 8$  В.

Линейные токи измеряют амперметрами PA1, PA2, PA3 из блока *Модуль измерительный* 50 – 250 мА. Напряжения измеряют *Мультиметром* PP1 из блока *Модуль мультиметров*. Для измерения тока в нейтральном проводе используют мультиметр PP2.

Трехфазную нагрузку собирают из элементов блоков *Модуль резисторов* и *Модуль реактивных элементов*.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 3.6. Установить в блоке *Модуль резисторов* одинаковые сопротивления  $R_1, R_2, R_3$ , заданные преподавателем в диапазоне от 47 до 100 Ом. *Мультиметр* PP2 в нейтральном проводе включить в режим измерения переменного тока (нажать кнопку  $\sim$ , при этом на индикаторе должен появиться символ AC).

2) Включить тумблер QF блока *Модуль питания* и тумблер SA1 модуля *Трехфазный источник питания*.

3) Мультиметром  $PP1$  из блока *Модуль мультиметров* измерить фазные напряжения  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$  и линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  модуля *Трехфазный источник питания (UZ1)*. Измеренные значения занести в протокол измерений. Проверить выполнения соотношений для симметричного источника.

4) *Симметричная нагрузка*. Амперметрами  $PA1$ ,  $PA2$  и  $PA3$  измерить токи фаз. Мультиметром  $PP1$  измерить фазные напряжения на нагрузках  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$ . Мультиметром  $PP2$  измерить ток в нейтральном проводе  $I_N$ . Разомкнуть нейтральный провод в точке  $N$  и повторить измерение фазных напряжений и токов. Мультиметром  $PP1$  измерить напряжение смещения нейтрали между точками  $n$  и  $N$ . Полученные значения напряжения, токов занести в табл. 3.1. **Указанный порядок действий применить в остальных режимах цепи с нейтральным проводом и без него.**

5) *Неравномерная нагрузка*. Установить в блоке *Модуль резисторов* сопротивления, заданные преподавателем. Выполнить измерения, данные занести в табл. 3.1. Восстановить симметричный режим.

6) *Обрыв линейного провода*. Отключить от генератора один из линейных проводов, заданный преподавателем. Выполнить измерения и занести данные в табл. 3.1. Восстановить симметричный режим.

7) *Включение конденсатора вместо активной нагрузки*. Вместо активной нагрузки  $R$  одной из фаз включить конденсатор с емкостью  $C$  (значение задается преподавателем). Рекомендуемые значения емкости:  $32 \text{ мкФ} \leq C \leq 69 \text{ мкФ}$ . Выполнить измерения, данные занести в табл. 3.1. Восстановить симметричный режим.

8) *Включение катушки индуктивности вместо активной нагрузки*. Вместо активной нагрузки  $R$  одной из фаз включить катушку с индуктивностью  $L$  (значение задается преподавателем). Рекомендуемые значения индуктивности:  $30 - 90 \text{ мГн}$ . Выполнить измерения, данные занести в табл. 3.1. Восстановить симметричный режим.

9) *Короткое замыкание нагрузки*. **Разорвать нейтральный провод в точке  $N$ !!!** Закоротить заданное сопротивление нагрузки. Другие сопротивления должны быть по 100 или 150 Ом! Измерения токов и напряжений выполнить согласно данным выше рекомендациям. Полученные значения занести в табл. 3.1.

- 10) Выключить тумблер  $SA1$  модуля *Трехфазный источник питания* и тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*.
- 11) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 3.3. Контрольные вопросы

ЭДС симметричного трехфазного источника соединены звездой, линейное напряжение  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ , начальная фаза ЭДС  $e_A = 90^\circ$ , нагрузка симметричная  $Z_A = Z_B = Z_C = 38 \text{ Ом}$ , соединена звездой.

- 1) Записать  $\dot{U}_{AN}, \dot{U}_{BN}, \dot{U}_{CN}$ .
- 2) Построить на комплексной плоскости диаграмму напряжений  $\dot{U}_{AN}, \dot{U}_{BN}, \dot{U}_{CN}, \dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ .
- 3) Определить ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$ .
- 4) Определить напряжение смещения нейтрали  $\dot{U}_{nN}$  при отсутствии нейтрального провода.
- 5) Определить напряжение смещения нейтрали  $\dot{U}_{nN}$  и ток  $\dot{I}_A$  при отсутствии нейтрального провода и коротком замыкании в фазе  $A$  ( $Z_A = 0$ ), построить на комплексной плоскости топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

### 3.4. Содержание отчета

- 1) По результатам измерений (см. табл. 3.1) построить топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов для каждого режима работы цепи.
- 2) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

### 3.5. Указания по построению векторных диаграмм

Необходимо задаться масштабами напряжения и тока. Построение векторных диаграмм следует начинать с общего для всех диаграмм треугольника линейных напряжений  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ . Нейтральная точка  $N$  источника определяется положением центра тяжести треугольника.

Нейтральная точка  $n$  нагрузки для каждого режима без нейтрального провода определяется следующим образом. Из точки  $A$  треугольника раствором циркуля, равным в масштабе величине фазного напряжения  $U_{an}$ , делается засечка. Такие же засечки делаются из точек  $B$  и  $C$  соответственно напряжениям  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$ . Точка пересечения трех засечек и есть точка  $n$ . Соединив точки  $N$  и  $n$ , получим вектор напряжения смещения нейтрали  $\dot{U}_{nN}$  нагрузки. Соединив точку  $n$  с вершинами треугольника  $ABC$ , получим положение векторов фазных напряжений  $\dot{U}_{an}, \dot{U}_{bn}, \dot{U}_{cn}$ . Из точки  $n$  строим в масштабе тока векторы фазных токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  в соответствии с нагрузками фаз. В данной работе при подключении конденсатора ток опережает напряжение примерно на  $80^\circ$ , а при подключении катушки индуктивности – отстает на угол  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R_k}$ .

Ток в нейтральном проводе определяется как векторная сумма линейных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (2.1)$$

В качестве примера приведены векторные диаграммы для случая неравномерной нагрузки с нейтральным проводом (рис. 3.5, а) и без него (рис. 3.5, б).

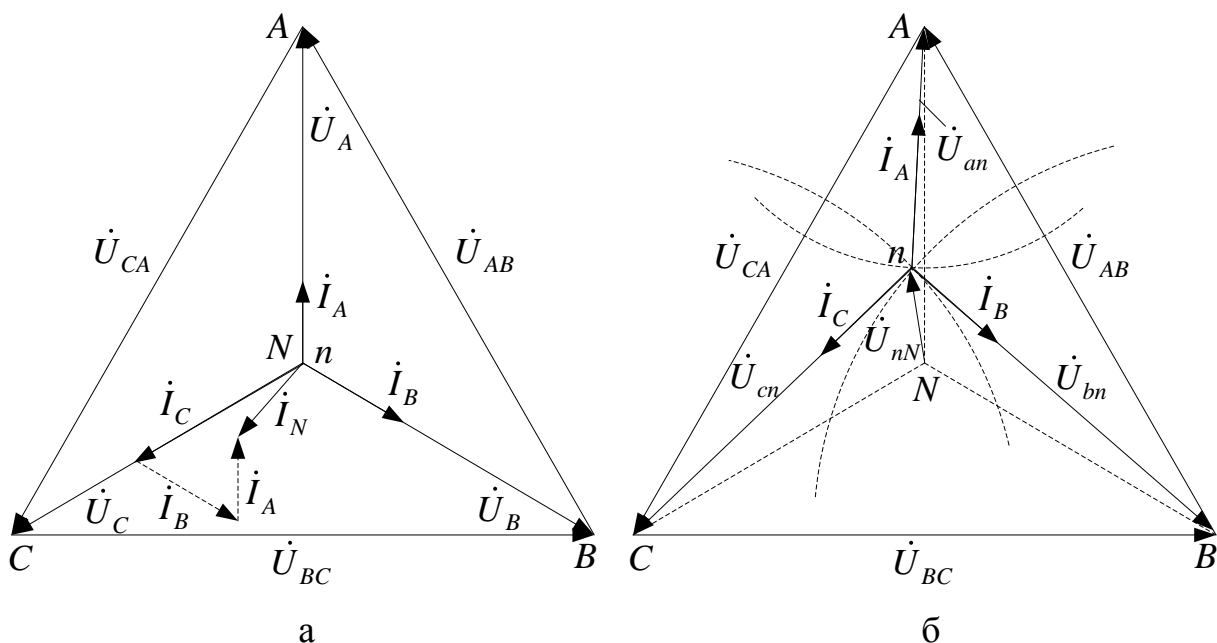


Рис. 3.5. Векторные диаграммы для случая неравномерной нагрузки с нейтральным проводом (а) и без него (б)



Таблица 3.1

Результаты измерений в трехфазной электрической цепи при нагрузке, соединенной звездой

Характер нагрузки		Ток, мА			Фазное напряжение, В			Ток в нейтральном проводе $I_N$ , мА	Напряжение смещения нейтрали $U_{nN}$ , В
		$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{an}$	$U_{bn}$	$U_{cn}$		
Симметричная нагрузка $R_1 = R_2 = R_3 = \text{___ Ом}$	с нейтральным проводом							$\approx 0$	
	без нейтрального провода								$\approx 0$
Неравномерная нагрузка $R_1 = \text{___ Ом}, R_2 = \text{___ Ом},$ $R_3 = \text{___ Ом}$	с нейтральным проводом								
	без нейтрального провода								
Обрыв линейного провода $R_1 = \text{___ Ом}, R_2 = \text{___ Ом},$ $R_3 = \text{___ Ом}$	с нейтральным проводом								
	без нейтрального провода								
Вместо активной нагрузки $R_{\text{—}}$ включена емкость $C = \text{___ мкФ}$ $R_{\text{—}} = \text{___ Ом}, R_{\text{—}} = \text{___ Ом}$	с нейтральным проводом								
	без нейтрального провода								
Вместо активной нагрузки $R_{\text{—}}$ включена катушка индуктивности $L = \text{___ мГн}, R_{\text{к}} = \text{___ Ом},$ $R_{\text{—}} = \text{___ Ом}, R_{\text{—}} = \text{___ Ом}$	с нейтральным проводом								
	без нейтрального провода								
Короткое замыкание фазы $R_{\text{—}} = \text{___ Ом}, R_{\text{—}} = \text{___ Ом},$ $R_{\text{—}} = \text{___ Ом}$	без нейтрального провода								

### 3.6. Протокол измерений

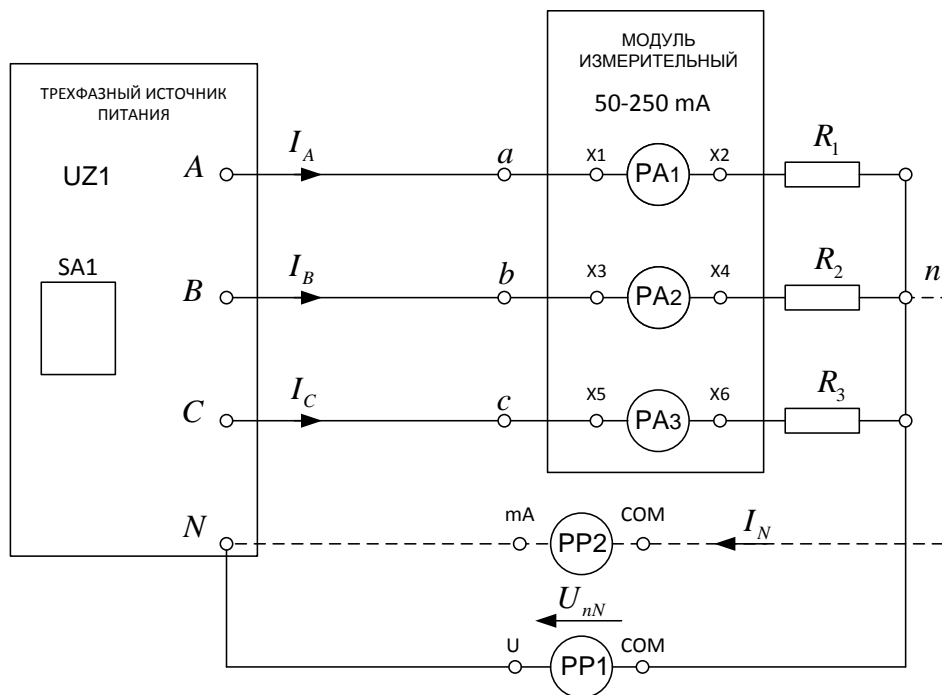


Рис. 3.6. Схема исследуемой цепи

Напряжения источника:  $U_{AN} = \text{_____ В}$ ;  $U_{BN} = \text{_____ В}$ ;  $U_{CN} = \text{_____ В}$ ;

$U_{AB} = \text{_____ В}$ ;  $U_{BC} = \text{_____ В}$ ;  $U_{CA} = \text{_____ В}$ .

Проверка соотношения  $\frac{U_{\text{Л}}}{U_{\text{Ф}}} = \sqrt{3}$ : \_\_\_\_\_.

Результаты измерений представлены в табл. 3.1.

### Лабораторная работа 4

#### ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ, СОЕДИНЕННАЯ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: экспериментальное исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником.

#### 4.1. Общие сведения

Общие сведения о трехфазной цепи и симметричном источнике напряжения изложены в лабораторной работе 3.

На рис. 4.1 показан способ соединения фаз нагрузки треугольником. Токи  $I_A, I_B, I_C$  называются линейными, токи  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  – фазными. Напряжения  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  являются фазными и линейными.

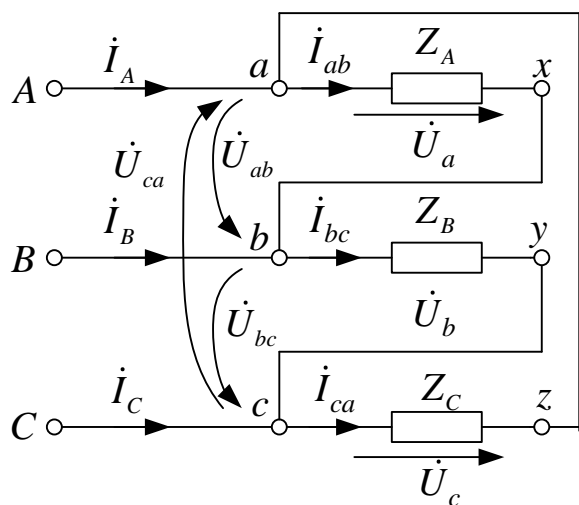


Рис. 4.1. Схема соединения треугольником

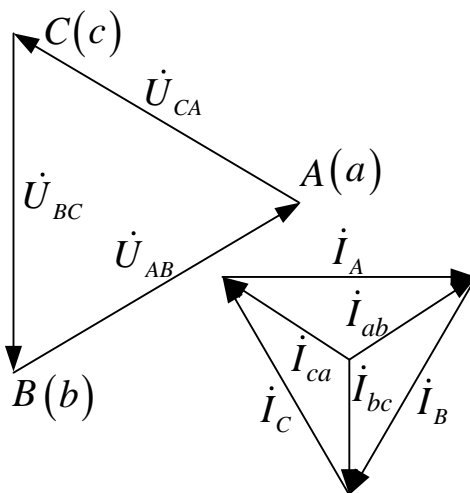


Рис. 4.2. Векторные диаграммы токов и напряжений

В случае несимметричной нагрузки фазные токи вычисляют по закону Ома:

$$\begin{cases} i_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_{ab}}; \\ i_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{R_{bc}}; \\ i_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{R_{ca}}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Линейные токи определяют по закону Кирхгофа для узлов:

$$\begin{cases} i_A = i_{ab} - i_{ca}; \\ i_B = i_{bc} - i_{ab}; \\ i_C = i_{ca} - i_{bc}. \end{cases} \quad (4.2)$$

## 4.2. Порядок выполнения работы

Источником симметричного трехфазного напряжения является модуль *Трехфазный источник питания* (UZ1). Источник создает систему напряжений прямого следования фаз с линейным напряжением  $U_{\text{л}} \approx 15 \text{ В}$ .

Для измерения токов используются амперметры из блоков *Модуль измерительный* и *Цифровые индикаторы*. Напряжения измеряют мультиметром *PP*. Трехфазную нагрузку собирают из пассивных элементов блоков *Модуль резисторов* и *Модуль реактивных элементов*.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 4.5. Установить в блоке *Модуль резисторов* сопротивления фаз  $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$ . Рекомендуемые значения: 100, 150 или 220 Ом.

2) Включить автоматический тумблер *QF* блока *Модуль питания* и тумблер *SA1* модуля *Трехфазный источник питания*.

3) *Симметричный режим*. Фазные токи измерить амперметрами *PA1*, *PA2*, *PA3* из блока *Цифровые индикаторы*. Тумблеры *SA1* и *SA2* установить в положение «~». Линейные токи измерить амперметрами *PA1*, *PA2*, *PA3* из блока *Модуль измерительный*. Мультиметром *PP* измерить напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ . Полученные значения занести в протокол измерений. **Указанный порядок измерений применять в остальных режимах.**

4) *Несимметричный режим*. Установить в блоке *Модуль резисторов* сопротивление  $R_{ab} \neq R_{bc} \neq R_{ca}$ . Выполнить измерения и занести данные в табл. 4.1. Восстановить симметричный режим.

5) *Обрыв линии Aa, Bb или Cc* (задает преподаватель). Например, при обрыве линии *Aa* необходимо сделать разрыв в точке *X1* амперметра *PA1*. Выполнить измерения и занести данные в табл. 4.1. Восстановить целостность цепи.

6) *Обрыв фазы* (фазу задает преподаватель). Например, чтобы разорвать фазу *ab*, необходимо отключить провод *xb*. Выполнить измерения и занести данные в табл. 4.1. Восстановить целостность цепи.

7) *Включить в фазу ab, bc или ca вместо резистора R катушку с индуктивностью L* (фазу задает преподаватель). Рекомендуемые значения:  $L = 80 - 110$  мГн. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром. Полученные значения занести в табл. 4.1.

8) *Включить в фазу ab, bc или ca вместо катушки с индуктивностью L конденсатор с емкостью C*. Рекомендуемые значения емкости: 10, 15 или 22 мкФ. Полученные значения занести в табл. 4.1.

9) Выключить тумблеры блоков *Модуль измерительный* и *Цифровые индикаторы*, тумблер *SA1* модуля *Трехфазный источник питания (UZ1)* и автоматический тумблер *QF* блока *Модуль питания*.

10) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 4.3. Контрольные вопросы

- 1) Показать, что ток в контуре, образованном трехфазной симметричной системой ЭДС, равен нулю.
- 2) Чему равно отношение линейного тока к фазному току симметричной нагрузки, соединенной треугольником?
- 3) Симметричный трехфазный источник ЭДС создает напряжения  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ . Определить токи в проводах линии  $I_{\text{л}}$  и фазные токи  $I_{\text{ф}}$  симметричной нагрузки  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = R = 22 \text{ Ом}$ , соединенной треугольником. Построить векторную диаграмму токов.

### 4.4. Содержание отчета

- 1) По результатам измерений построить топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов для каждого режима трехфазной цепи.
- 2) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

### 4.5. Указания по построению векторных диаграмм

Необходимо задаться масштабами напряжения и тока. Построение векторных диаграмм удобно начинать с линейных напряжений  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ , отложенных из одной точки.

В зависимости от характера нагрузки проводятся векторы фазных токов, величины которых были измерены. При активной нагрузке фазный ток совпадает по направлению с напряжением. При подключении конденсатора ток опережает напряжение примерно на  $80^\circ$ , а при подключении катушки индуктивности отстает на угол  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R_{\text{к}}}$ . Соединяя концы фазных токов, получаем линейные токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ , что соответствует графическому сложению векторов в соответствии с выражениями (4.2).

Векторные диаграммы токов и напряжений для активных нагрузок фаз при увеличении нагрузки (уменьшении сопротивления) фазы *ca* показаны на рис. 4.3, а. Векторная диаграмма при отключении нагрузки фазы *ca* приведена на рис. 4.3, б.

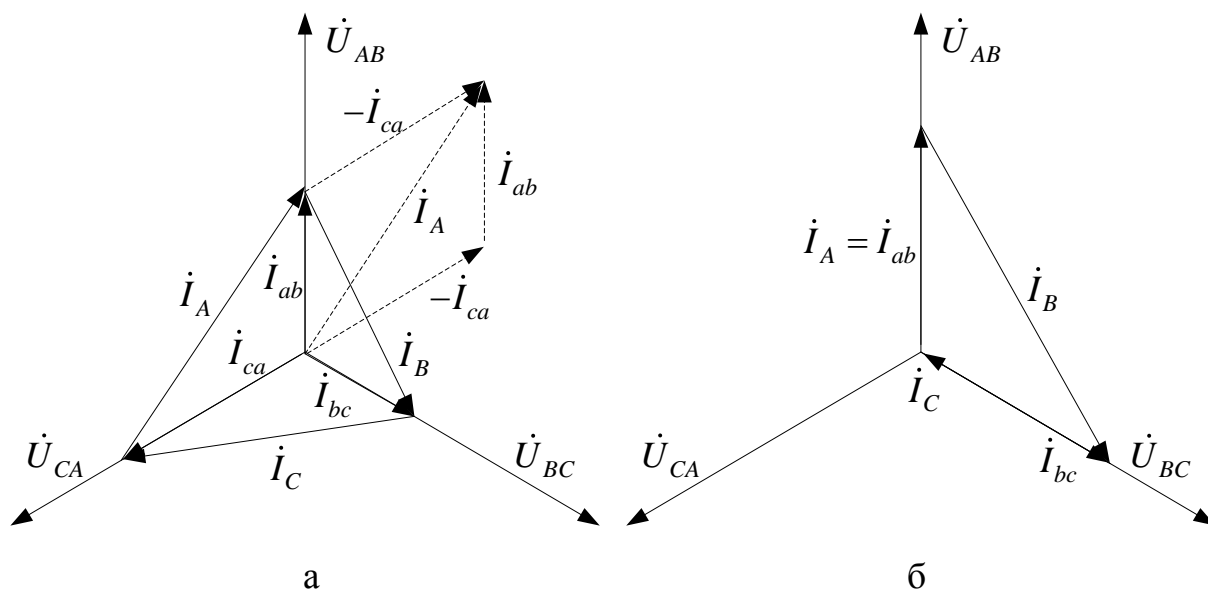


Рис. 4.3. Векторные диаграммы токов и напряжений при несимметричной нагрузке (а) и в случае обрыва фазы  $ca$  (б)

При обрыве линейного провода  $Bb$  фаза  $ca$  работает нормально, а фазы  $ab$  и  $bc$  оказываются соединенными последовательно (рис. 4.4, а). Векторная диаграмма при обрыве линейного провода  $Bb$  для случая  $Z_{ab} = Z_{bc} = R$  приведена на рис. 4.4, б.

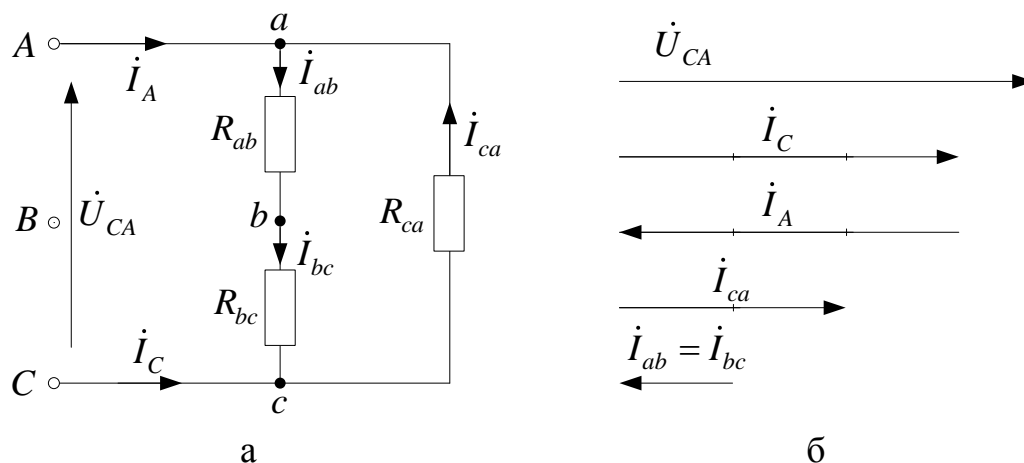


Рис. 4.4. Схема замещения (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б) при обрыве линейного провода  $Bb$

#### 4.6. Протокол измерений

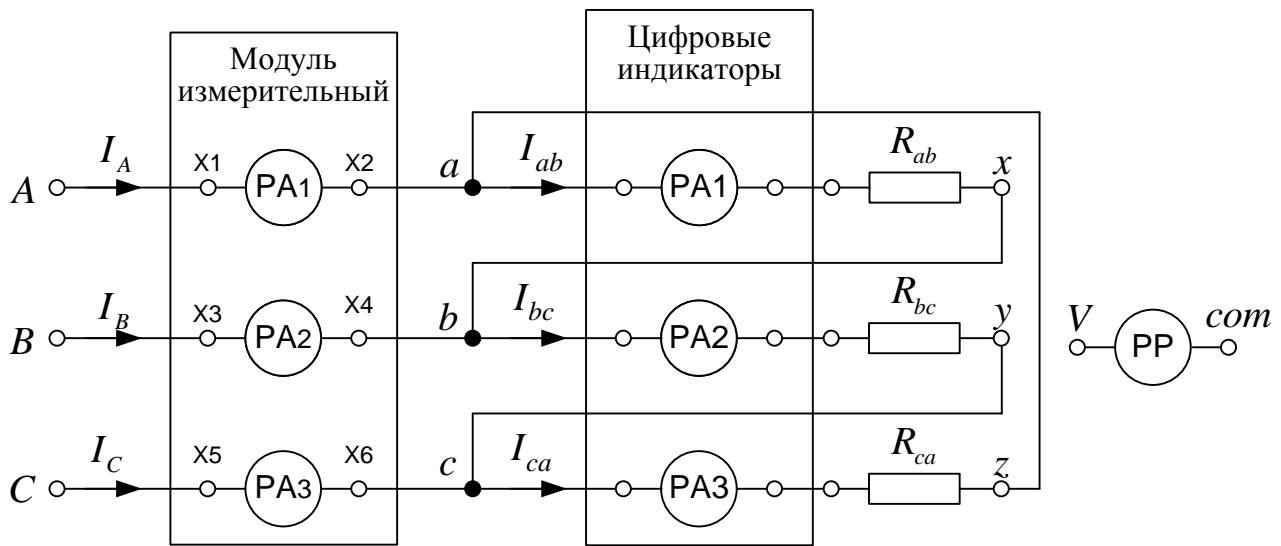


Рис. 4.5. Схема трехфазной цепи, соединенной треугольником

Линейные напряжения источника:  $U_{AB} = \text{___ В}$ ;  $U_{BC} = \text{___ В}$ ;  $U_{CA} = \text{___ В}$ .

Результаты измерений представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты эксперимента

Режим работы трехфазной цепи	$I_A$ , мА	$I_B$ , мА	$I_C$ , мА	$I_{ab}$ , мА	$I_{bc}$ , мА	$I_{ca}$ , мА
Симметричный $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = \text{___ Ом}$						
Несимметричный $R_{ab} = \text{___ Ом}$ ; $R_{bc} = \text{___ Ом}$ ; $R_{ca} = \text{___ Ом}$						
Обрыв линии ____ $U_{ab} = \text{___ В}$ ; $R_{ab} = \text{___ Ом}$ ; $U_{bc} = \text{___ В}$ ; $R_{bc} = \text{___ Ом}$ ; $U_{ca} = \text{___ В}$ ; $R_{ca} = \text{___ Ом}$						
Обрыв фазы ____; $R_{ab} = \text{___ Ом}$ ; $R_{bc} = \text{___ Ом}$ ; $R_{ca} = \text{___ Ом}$						
Включение в фазу ____ катушки ин- дуктивности $L = \text{___ мГн}$ ; $R_k = \text{___ Ом}$ ; $R = \text{___ Ом}$ ; $R = \text{___ Ом}$						
Включение в фазу ____ конденсатора с емкостью $C = \text{___ мкФ}$ ; $R = \text{___ Ом}$ ; $R = \text{___ Ом}$						

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В R-C- И R-L-ЦЕПИ

Цель работы: экспериментальное исследование переходных процессов в цепи с одним накопителем энергии электрического или магнитного поля.

## 5.1. Общие сведения

Процесс перехода режима работы электрической цепи от одного установившегося к другому называется *переходным*.

В электротехнике принято, что возникновение переходного процесса связано с явлением *коммутации*. Принимается допущение, что коммутация начинается в момент времени  $t = 0$  и совершается мгновенно. При этом различают два момента времени: момент времени, непосредственно предшествующий коммутации  $t(0-)$ , и момент времени непосредственно после коммутации  $t(0+)$ .

В момент коммутации ток в ветви с индуктивностью не изменяется, т. е.  $i_L(0+) = i_L(0-)$ . Напряжение на емкости в момент коммутации не изменяется, т. е.  $u_C(0+) = u_C(0-)$ .

Значения  $u_C(0+)$  и  $i_L(0+)$  называются *независимыми начальными условиями*. Ток в емкости и напряжение на индуктивности, как правило, изменяются скачком, т. е.  $i_C(0+) \neq i_C(0-)$ ,  $u_L(0+) \neq u_L(0-)$ . Значения  $i_R(0+)$ ,  $i_C(0+)$ ,  $u_R(0+)$ ,  $u_L(0+)$  называются *зависимыми начальными условиями*.

В переходном процессе мгновенные значения напряжений и токов не являются периодическими функциями времени. Уравнения для идеальных элементов имеют вид:

$$u_R(t) = Ri_R(t); \quad (5.1)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}; \quad (5.2)$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}. \quad (5.3)$$

Переходный процесс в цепи с одним накопителем энергии и источником постоянного напряжения (тока) описывают линейным неоднородным ( $F \neq 0$ ) дифференциальным уравнением вида



$$\frac{dx(t)}{dt} + ax(t) = bF, \quad (5.4)$$

где  $x(t)$  – неизвестная функция ( $u_C(t)$  для  $R$ - $C$ -цепи или  $i_L(t)$  для  $R$ - $L$ -цепи);

$F$  – постоянная, зависящая от значений напряжения или тока источников;

$a$  и  $b$  – не зависящие от времени коэффициенты.

Общее решение уравнения (5.4) имеет вид:  $x(t) = x_{\text{пр}}(t) + x_{\text{св}}(t)$ . Свободная составляющая решения  $x_{\text{св}}(t)$  определяется как общее решение однородного дифференциального уравнения

$$\frac{dx_{\text{св}}(t)}{dt} + ax_{\text{св}}(t) = 0 \quad (5.5)$$

и имеет вид:  $x_{\text{св}}(t) = Ae^{pt}$ . Здесь  $A$  – постоянная интегрирования;  $p = -a$  – корень характеристического уравнения  $p + a = 0$ . Величина  $\tau = 1/|p|$  имеет размерность времени и называется постоянной времени. За интервал времени  $\Delta t = \tau$  свободная составляющая уменьшается в  $e$  раз. Выражение  $x_{\text{св}}(t) = Ae^{-t/\tau}$  позволяет оценить длительность  $t_{\text{п.п}}$  переходного процесса. Можно принять  $t_{\text{п.п}}$  от  $4\tau$  до  $5\tau$ .

Величина  $x_{\text{пр}}$  (установившееся значение напряжения или тока) является частным решением уравнения

$$\frac{dx_{\text{пр}}}{dt} + ax_{\text{пр}} = bF. \quad (5.6)$$

Величина  $x_{\text{пр}}$  может быть рассчитана в установившемся режиме после коммутации.

Общее решение приобретает вид:  $x(t) = x_{\text{пр}}(t) + Ae^{pt}$ . Постоянная интегрирования  $A$  определяется из независимых начальных условий при  $t = 0+$ :  $x(0+) = x_{\text{пр}}(0+) + A$ , откуда  $A = x(0+) - x_{\text{пр}}(0+)$ .

## 5.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником напряжения является модуль *Функциональный генератор*. Для наблюдения зависимостей от времени используют *Осциллограф*. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков *Модуль реактивных элементов* и *Модуль резисторов*. Рекомендуемые значе-

ния:  $U = 3 - 5$  В;  $C = 3,3 - 80$  мкФ (для цепи  $R$ - $C$ );  $L = 10, 20$  или  $30$  мГн (для цепи  $R$ - $L$ );  $R = 10$  Ом. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром.

Электронный осциллограф позволяет наблюдать периодические процессы. Поэтому в работе исследуются повторяющиеся с периодом  $T$  переходные процессы заряда-разряда конденсатора (достижения установившегося значения тока в катушке индуктивности). Для этого на вход исследуемой цепи подаются однополярные прямоугольные импульсы с периодом повторения  $T$  (рис. 5.1).

В момент времени  $t = 0$  на входе цепи появляется напряжение  $U$ . Это эквивалентно подключению  $R$ - $C$ - или  $R$ - $L$ -ветви к источнику постоянного напряжения. При этом емкость начинает накапливать энергию электрического поля, а индуктивность – энергию магнитного поля. В момент времени  $t = T/2$  напряжение на входе цепи становится равным нулю. Это эквивалентно закорачиванию  $R$ - $C$ - или  $R$ - $L$ -ветви. При этом происходит рассеивание накопленной в индуктивности или емкости энергии в сопротивлении  $R$ .

За время, равное половине периода, переходный процесс должен завершиться. Если интервал времени  $0,5T = t_{п.п}$  и принять  $t_{п.п} = 5\tau$ , то частота следования импульсов  $f = 1/T = 1/10\tau$ .

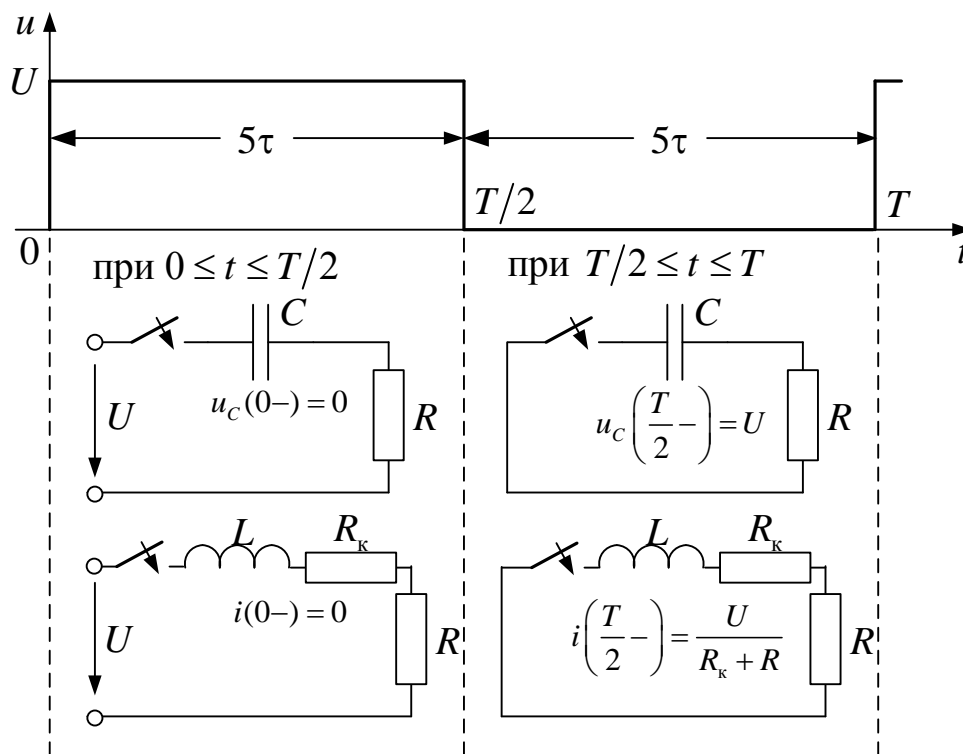


Рис. 5.1. Исследование переходных процессов в  $R$ - $C$ - и  $R$ - $L$ -цепи

Примерный вид напряжения на емкости при подаче прямоугольных однополярных импульсов приведен на рис. 5.2.

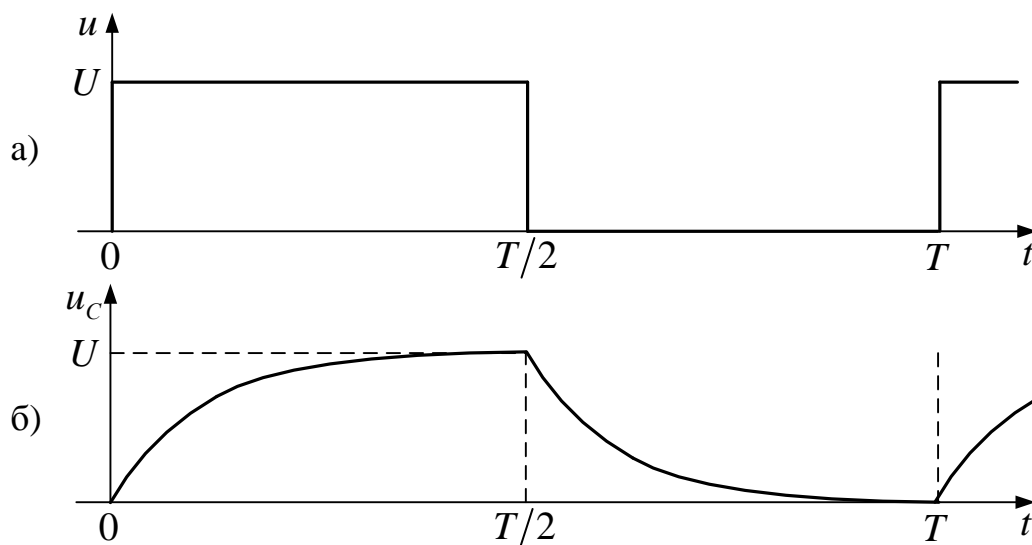


Рис. 5.2. Форма напряжения на входе цепи (а) и на емкости (б)

#### 5.2.1. Переходный процесс в R-C-цепи

1) Подключить вход 1 *Осциллографа* к выходу *Функционального генератора*. Включить тумблер *QF* блока *Модуль питания* и тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Установить на частоте 100 Гц заданную преподавателем амплитуду  $U$  прямоугольных однополярных импульсов. Выключить тумблер *Сеть* *Функционального генератора*.

2) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 5.3.

3) Занести в протокол заданное преподавателем напряжение  $U$ .

4) Установить заданные преподавателем величины  $C$  и  $R$ . Выполнить расчеты  $\tau_{R-C}$  и  $f_{R-C}$ , занести их в протокол измерений.

5) Включить тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Переключатель *Форма* должен стоять в положении  $\square$ . Регулятором *Частота* установить на выходе модуля рассчитанную в протоколе частоту  $f_{R-C}$ . Регулятором *Амплитуда* установить заданную величину напряжения  $U$ .

6) Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$ . На осциллограмме и в протоколе измерений указать масштабы  $m_{u_C}$ ,  $m_{u_R}$  и  $m_t$ .

### 5.2.2. Переходный процесс в $R$ - $L$ -цепи

- 1) Измерить мультиметром сопротивление  $R_k$  катушки при заданной преподавателем индуктивности. Резистор  $R = 10$  Ом взять из блока *Модуль резисторов*.
- 2) Собрать электрическую цепь по схеме рис. 5.4.
- 3) Установить заданные преподавателем величины  $L$  и  $R$ . Выполнить расчеты  $\tau_{R-L}$  и  $f_{R-L}$ , занести их в протокол измерений.
- 4) Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u_k(t)$  и  $u_R(t)$ . На осциллограмме и в протоколе измерений указать масштабы  $m_{u_k}$ ,  $m_{u_R}$  и  $m_t$ .
- 5) Выключить автоматический тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*, тумблеры *Сеть* модуля *Функциональный генератор* и *Осциллографа*. Прикрепить осциллограммы к протоколу измерений.
- 6) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 5.3. Контрольные вопросы

- 1) Записать правила коммутации.
- 2) Какие величины называют «независимыми начальными условиями»?
- 3) Как изменяется свободная составляющая за время  $\tau$ ?
- 4) Как определить длительность переходного процесса в цепи  $R$ - $L$  и  $R$ - $C$ ?
- 5) Почему при включении катушки индуктивности с параметрами  $L$ ,  $R_k$  на постоянное напряжение  $U$  в установившемся режиме напряжение на ней не равно нулю (см. осциллограмму)? Как определяется значение этого напряжения?

### 5.4. Содержание отчета

- 1) Расчеты  $u_C(t)$  и  $i(t)$  в цепи  $R$ - $C$  и  $u_L(t)$ ,  $i(t)$  и  $u_k(t)$  в цепи  $R$ - $L$  классическим методом.
- 2) Графики зависимостей  $u_C(t)$ ,  $i(t)$ ,  $u_L(t)$ ,  $u_k(t)$ , полученных в расчете при  $0 \leq t \leq T/2$  и  $T/2 \leq t \leq T$ .
- 3) Сравнение расчетных зависимостей и осциллограмм.
- 4) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

## 5.5. Протокол измерений

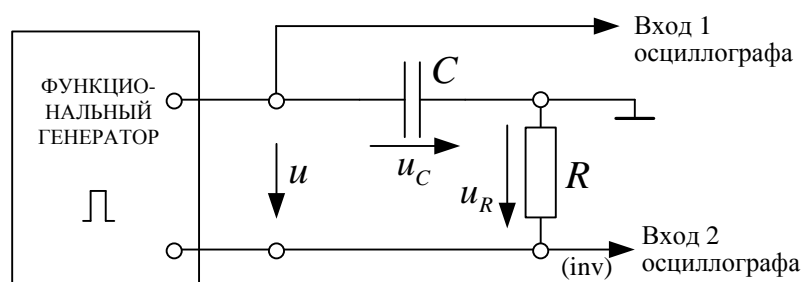


Рис. 5.3. Схема цепи  $R$ - $C$

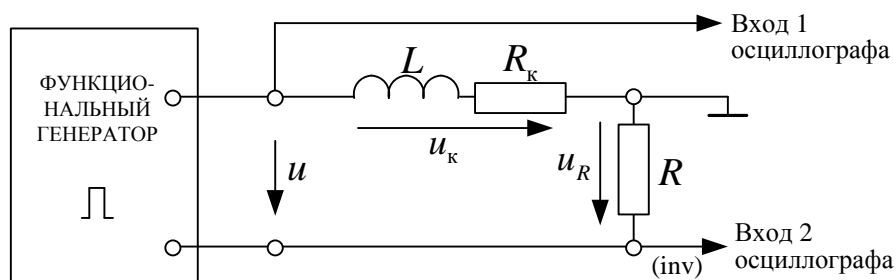


Рис. 5.4. Схема цепи  $R$ - $L$

Цепь включается на напряжение  $U = \underline{\hspace{2cm}}$  В.

### Предварительные расчеты для переходного процесса в цепи $R$ - $C$

Параметры цепи:  $R = 10 \text{ Ом}$ ;  $C = \underline{\hspace{2cm}}$  мкФ.

Постоянная времени цепи  $\tau_{R-C} = RC = \underline{\hspace{2cm}}$  с.

Частота следования импульсов  $f_{R-C} = 0,1/\tau_{R-C} = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц.

$m_{u_C} = \underline{\hspace{2cm}}$  В/дел.;  $m_{u_R} = \underline{\hspace{2cm}}$  В/дел.;  $m_t = \underline{\hspace{2cm}}$  мс/дел.

### Предварительные расчеты для переходного процесса в цепи $R$ - $L$

Параметры цепи:  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  мГн;  $R_k = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом;  $R = 10 \text{ Ом}$ .

Постоянная времени цепи  $\tau_{R-L} = L/(R_k + R) = \underline{\hspace{2cm}}$  с.

Частота следования импульсов  $f_{R-L} = 0,1/\tau_{R-L} = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц.

$m_{u_k} = \underline{\hspace{2cm}}$  В/дел.;  $m_{u_R} = \underline{\hspace{2cm}}$  В/дел.;  $m_t = \underline{\hspace{2cm}}$  мс/дел.

**Осциллограммы напряжений  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$ ;  $u_k(t)$  и  $u_R(t)$ .**

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЦЕПИ С  $R$ - $L$ - $C$ 

Цель работы: экспериментальное исследование переходного процесса в цепи с двумя независимыми накопителями энергии электрического и магнитного полей.

## 6.1. Общие сведения

Переходный процесс в цепи с последовательным соединением  $R$ ,  $L$  и  $C$  возникает, например, при подключении ее к источнику постоянного напряжения или при закорачивании  $R$ - $L$ - $C$ -ветви с предварительно заряженным конденсатором. Чтобы наблюдать эти переходные процессы на экране осциллографа на вход схемы, как и в лабораторной работе 5, подаются однополярные прямоугольные импульсы (см. рис. 5.2).

При  $t = 0$  на входе цепи появляется постоянное напряжение  $U$ , что эквивалентно подключению цепи к источнику постоянного напряжения  $U$  (рис. 6.1). В установившемся режиме  $u_{\text{сnp}} = U$ ,  $i = 0$ . При  $t = T/2$  напряжение на входе цепи становится равным нулю, что эквивалентно закорачиванию  $R$ - $L$ - $C$ -ветви (рис. 6.2). При этом в цепи происходит перераспределение энергии: энергия электрического поля, запасенная в конденсаторе, переходит в энергию магнитного поля, запасаемую в индуктивности (напряжение на емкости уменьшается до нуля, ток в индуктивности растет). Затем (в случае колебательного процесса) все происходит в обратном порядке: энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля. Такой процесс перераспределения энергии обязательно затухает, так как имеют место потери электрической энергии в сопротивлении  $R$  (выделяется в виде тепла). В итоге в новом установившемся режиме  $u_{\text{сnp}} = 0$ ,  $i = 0$ .

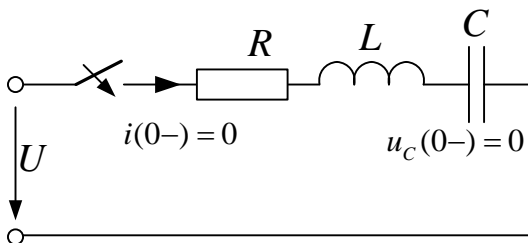


Рис. 6.1. Включение цепи  $R$ - $L$ - $C$  на постоянное напряжение при  $t = 0$

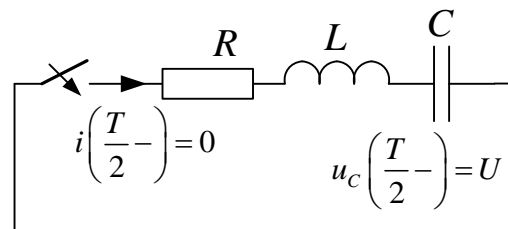


Рис. 6.2. Закорачивание цепи  $R$ - $L$ - $C$  при  $t = T/2$

Уравнениям по второму закону Кирхгофа для включения цепи

$$u_R + u_L + u_C = U \quad (6.1)$$

и ее закорачивания

$$u_R + u_L + u_C = 0, \quad (6.2)$$

отличающимся только правой частью, соответствуют одинаковые характеристические уравнения

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0, \quad (6.3)$$

вид корней которых определяется соотношением между  $R$ ,  $L$  и  $C$ .

Характер переходного процесса зависит от вида корней характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}, \quad (6.4)$$

которые могут быть:

- 1) отрицательными действительными разными  $p_1$  и  $p_2$  (апериодический режим);
- 2) комплексными сопряженными с отрицательной действительной частью  $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{св}$ , где  $\delta$  – коэффициент затухания,  $\omega_{св}$  – частота затухающих колебаний (колебательный режим);
- 3) отрицательными действительными равными  $p_1 = p_2 = -\sigma$  (граничный режим).

Смена характера переходного процесса происходит при  $R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Корни характеристического уравнения позволяют оценить продолжительность переходного процесса. Временем переходного процесса обычно считают промежуток, в течение которого свободная составляющая уменьшается в  $e^5 \approx 148$  раз. Время апериодического процесса можно оценить как  $t_{п.п} = 5/|p_{\min}|$ , где  $|p_{\min}|$  – модуль меньшего из корней характеристического уравнения. Время колебательного переходного процесса  $t_{п.п} \approx 5/\delta$ .

Зависимости тока и напряжения на емкости от времени при закорачивании цепи  $R-L-C$  показаны на рис. 6.3 для аperiodического и на рис. 6.4 для колебательного переходного процесса.

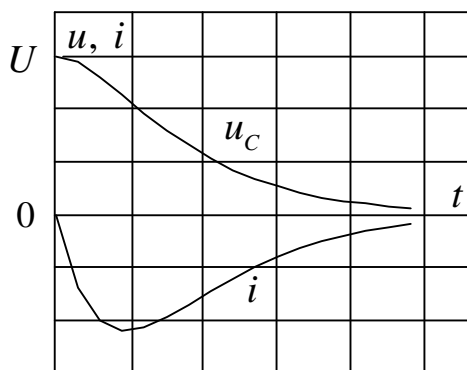


Рис. 6.3. Аperiodический переходный процесс

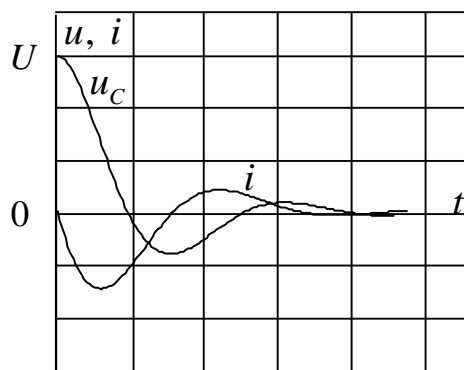


Рис. 6.4. Колебательный переходный процесс

## 6.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе в качестве источника входного напряжения используется модуль *Функциональный генератор*. Для наблюдения зависимостей от времени используют *Осциллограф*. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков *Модуль реактивных элементов* и *Модуль резисторов*. Рекомендуемые значения:  $L = 10$  мГн;  $C = 3,3 - 6,8$  мкФ. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром.

1) Подключить вход 1 *Осциллографа* к выходу *Функционального генератора*. Переключатель *Форма* включить в положение  $\square$ . Включить *Осциллограф*. Включить автоматический тумблер  $QF$  блока *Модуль питания* и тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Регулятором *Частота* установить на выходе модуля *Функциональный генератор* частоту  $f = 120 - 160$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить заданную величину напряжения  $U = 6 - 10$  В.

Настроить ручки горизонтальной развертки *Осциллографа* таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Настроить переключатели усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб  $m_u$  на переключателе усиления по напряжению, установить входное напряжение  $U$ , равное заданному преподавателем. **В остальных опытах использовать указанный порядок настройки**



**осциллографа.** Значение  $U$  записать в протокол измерений. Выключить тумблер *Сеть Функционального генератора*.

2) Установить в модуле *Реактивные элементы* заданные преподавателем величины  $L$  и  $C$ . Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_k$  катушки. Записать значения  $L$ ,  $C$ ,  $R_k$  в протокол измерений.

3) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 6.5.

#### 6.2.1. Аперидический режим

1) Установить в блоке *Модуль резисторов* величину сопротивления  $R = 100$  Ом для  $C > 4$  мкФ либо  $R = 150$  Ом для  $C < 4$  мкФ. Убедиться, что  $R + R_k > R_{кр}$ .

2) Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$ . Записать масштабы  $m_{u_C}$ ,  $m_{u_R}$  и  $m_t$ .

3) Настроить *Осциллограф* для удобного определения  $t_1$  – времени, за которое при аперидическом режиме происходит разряд емкости с  $U$  до  $U/2$  либо заряд с 0 до  $U/2$  (рис. 6.6, а). Зафиксировать осциллограмму с масштабами  $m_{u_C}$  и  $m_t$ . Рассчитать  $\tau$  и  $p_1$ . Результаты расчета записать в табл. 6.1.

#### 6.2.2. Колебательный режим

1) Установить величину сопротивления  $R = 10$  Ом в блоке *Модуль резисторов*. Убедиться, что  $R + R_k < R_{кр}$ .

2) Срисовать на кальку (сфотографировать) с экрана *Осциллографа* кривые зависимостей  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$ . Записать масштабы  $m_{u_C}$ ,  $m_{u_R}$  и  $m_t$ .

3) Настроить *Осциллограф* для удобного определения периода свободных колебаний  $T_{св}$  и амплитуд двух соседних колебаний  $U_{1m}$  и  $U_{2m}$  напряжения на резисторе  $R$  (сдвинутых на  $T_{св}$ ) в соответствии с рис. 6.6, б. Зафиксировать осциллограмму с масштабами.

4) Рассчитать  $\omega_{св}$  и  $\delta$ . Результаты расчета записать в табл. 6.1.

5) Выключить автоматический тумблер  $QF$  блока *Модуль питания*, тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор* и *Осциллограф*.

6) Рассчитать корни характеристического уравнения для апериодического и колебательного режимов и записать их в протокол измерений. Сравнить опытные и расчетные значения. Сделать выводы.

7) Прикрепить осциллограммы к протоколу измерений. Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 6.3. Контрольные вопросы

- 1) Записать вид свободной составляющей
  - в граничном режиме;
  - в колебательном режиме.
- 2) Указать способы получения характеристического уравнения.
- 3) Указать, как определяются зависимые начальные условия.

### 6.4. Содержание отчета

- 1) Расчет характеристик переходного процесса по данным опыта (см. табл. 6.1).
- 2) Расчет переходного процесса при включении (закорачивании) цепи  $R$ - $L$ - $C$  в апериодическом (колебательном) режиме классическим методом (по заданию преподавателя).
- 3) Построение зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  и сравнение их с экспериментальными зависимостями.
- 4) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

### 6.5. Протокол измерений

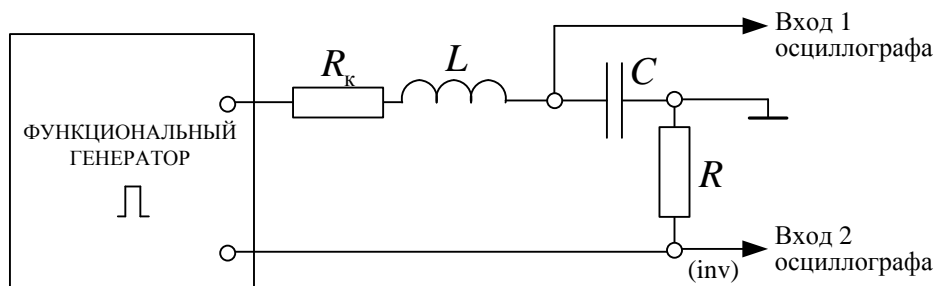


Рис. 6.5. Схема исследуемой цепи

Входное напряжение:  $U =$  В;  $f =$  \_\_\_\_ Гц.

Параметры элементов:  $C = \_\_\_\_\_\_ \text{ мкФ}$ ;  $L = 10 \text{ мГн}$ ;  $R_k = \_\_\_\_\_\_ \text{ Ом}$ .

Критическое сопротивление  $R_{кр} = 2\sqrt{L/C} = \_\_\_\_\_\_ \text{ Ом}$ .

Осциллограммы  $u_C(t)$  и  $u_R(t)$  для апериодического и колебательного режимов с указанными масштабами.

Таблица 6.1

Результат определения корней характеристического уравнения

Название режима	По осциллограммам		По результатам расчета	
	параметр	значение	параметр	значение
Апериодический	$t_1$	_____ мс		
	$\tau_1 = t_1 / 0,693$	_____ мс	$\tau_1 = 1 /  p_1 $	_____ мс
			$\tau_2 = 1 /  p_2 $	_____ мс
	$p_1 = -1 / \tau_1$	_____ с <sup>-1</sup>	$p_1$	_____ с <sup>-1</sup>
			$p_2$	_____ с <sup>-1</sup>
Колебательный	$T_{св}$	_____ мс	$T_{св} = 2\pi / \omega_{св}$	_____ мс
	$\omega_{св} = 2\pi / T_{св}$	_____ рад/с	$\omega_{св}$	_____ рад/с
	$\delta = \frac{1}{T_{св}} \ln \frac{U_{1m}}{U_{2m}}$	_____ с <sup>-1</sup>	$\delta$	_____ с <sup>-1</sup>
	$U_{1m}$	_____ В		
	$U_{2m}$	_____ В		

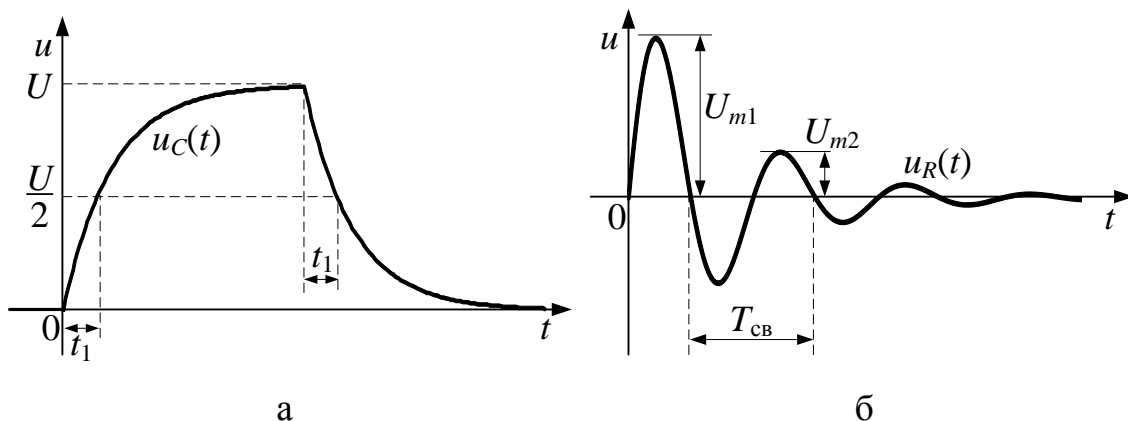


Рис. 6.6. Экспериментальное определение характеристик переходного процесса для апериодического (а) и колебательного (б) режимов

## Лабораторная работа 7

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ А-ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы: экспериментальное определение  $A$ -параметров четырехполюсника в установившемся режиме синусоидальных токов и напряжений; определение параметров схемы замещения четырехполюсника.

#### 7.1. Общие сведения

Четырехполюсником называется электрическая цепь, в которой выделены два входных и два выходных зажима. Направления токов и напряжений на входе  $U_1, I_1$  и на выходе  $U_2, I_2$  указаны на рис. 7.1.

Уравнения пассивного четырехполюсника в  $A$ -форме имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2. \end{cases} \quad (7.1)$$

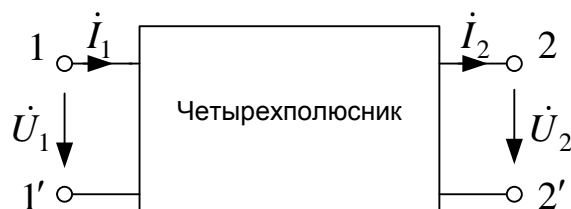


Рис. 7.1. Схема замещения  
четырехполюсника

Выполняется равенство

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1. \quad (7.2)$$

В опытах холостого хода и короткого замыкания при питании со стороны зажимов  $1-1'$  измеряются действующие значения напряжения, тока и угол сдвига фаз между ними. Комплексные сопротивления рассчитываются по выражениям:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{1x.x} = \frac{U_{1x.x}}{I_{1x.x}} e^{j\varphi_{1x.x}}; \\ \underline{Z}_{1k.3} = \frac{U_{1k.3}}{I_{1k.3}} e^{j\varphi_{1k.3}}. \end{cases} \quad (7.3)$$

При обратном включении четырехполюсника (питание со стороны зажимов  $2-2'$ ) определяются комплексные сопротивления:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{2x.x} = \frac{U_{2x.x}}{I_{2x.x}} e^{j\varphi_{2x.x}}; \\ \underline{Z}_{2k.3} = \frac{U_{2k.3}}{I_{2k.3}} e^{j\varphi_{2k.3}}. \end{cases} \quad (7.4)$$

$A$ -параметры четырехполюсника могут быть рассчитаны по выражениям:

$$\begin{cases} \underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x.x}}{\underline{Z}_{2x.x} - \underline{Z}_{2k.3}}}; \\ \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2k.3}; \\ \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1x.x}}; \\ \underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1k.3}}. \end{cases} \quad (7.5)$$

Пассивный четырехполюсник можно представить эквивалентной схемой замещения, содержащей три комплексных сопротивления. Т-образная схема замещения приведена на рис. 7.2.

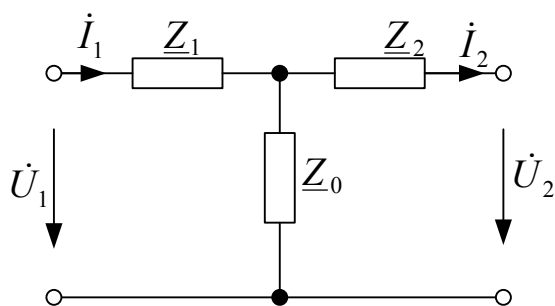


Рис. 7.2. Т-образная схема замещения четырехполюсника

Сопротивления схемы замещения выражаются через  $A$ -параметры четырехполюсника:

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \\ \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}; \\ \underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{C}}. \end{cases} \quad (7.6)$$

Схема замещения обычно не реализуется физическими элементами, а используется для расчета.

## 7.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является модуль *Функциональный генератор*. Рекомендуемое значение частоты – 100...300 Гц. В работе используют мультиметр и измерительные приборы из блока *Модуль измерителя фазы*. Четырехполюсник собирают из элементов блоков *Модуль резисторов* и *Модуль реактивных элементов*. Рекомендуемые значения: сопротивление  $R_1 = 47, 68$  или  $100$  Ом; индуктивность  $L = 90, 100$  или  $110$  мГн; конденсатор емкостью  $C = 22, 32$  или  $47$  мкФ. Рекомендуемое сопротивление нагрузки  $R_n = 47, 68$  или  $100$  Ом.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 7.3. Подключить к зажимам  $2-2'$  сопротивление  $R_H$ .

2) Установить заданные преподавателем величины  $R, L, C$  в блоках *Модуль резисторов* и *Модуль реактивных элементов*.

3) Включить тумблер  $QF$  блока *Модуль питания* и тумблер *Сеть* модуля *Функциональный генератор*. Установить по заданию преподавателя на выходе генератора действующее значение синусоидального напряжения  $U_1 = 5 - 7$  В и частоту  $f = 100 - 300$  Гц. Записать данные в протокол.

4) Выполнить опыт с активным сопротивлением нагрузки  $R_H$ .

Для измерения действующих значений напряжения  $u_1$ , тока  $i_1$  и угла сдвига фаз  $\varphi$  использовать встроенные в *Модуль измерителя фазы* приборы. Данные опыта занести в табл. 7.1.

Выходное напряжение четырехполюсника  $U_2$  и активное сопротивление катушки  $R_K$  измерить мультиметром из блока *Модуль мультиметров*, остальные величины измерить приборами *Модуль измерителя фазы*. Полученные значения занести в табл. 7.1.

5) Выполнить опыты прямого холостого хода и короткого замыкания. Полученные значения занести в табл. 7.1.

6) Поменять местами входные  $1-1'$  и выходные  $2-2'$  зажимы. Выполнить опыты обратного холостого хода и короткого замыкания (рис. 7.4). Полученные значения занести в табл. 7.1.

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

8) Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений. Протокол измерений утвердить у преподавателя.

### 7.3. Контрольные вопросы

1) Дать определение четырехполюсника.

2) Какие величины связывают  $A$ -параметры?

3) Записать систему уравнений четырехполюсника с  $A$ -параметрами, в котором вход и выход поменяли местами.

4) Используя уравнения четырехполюсника при прямом и обратном включении и соотношение  $\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$ , вывести формулы для определения  $A$ -параметров по известным  $\underline{Z}_{1x,x}$ ,  $\underline{Z}_{2x,x}$  и  $\underline{Z}_{2k,3}$ .

## 7.4. Содержание отчета

- 1) Расчет  $A$ -параметров четырехполюсника по экспериментальным данным. Выполнить проверку  $\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$ .
- 2) Расчет параметров Т-образной схемы замещения четырехполюсника. Изобразить полученную схему замещения.
- 3) Используя  $A$ -параметры,  $U_2$  и  $R_H$ , провести расчет  $U_1$ ,  $I_1$  и  $\varphi$  для четырехполюсника с нагрузкой. Сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными.
- 4) Протокол измерений и ответы на контрольные вопросы.

## 7.5. Протокол измерений

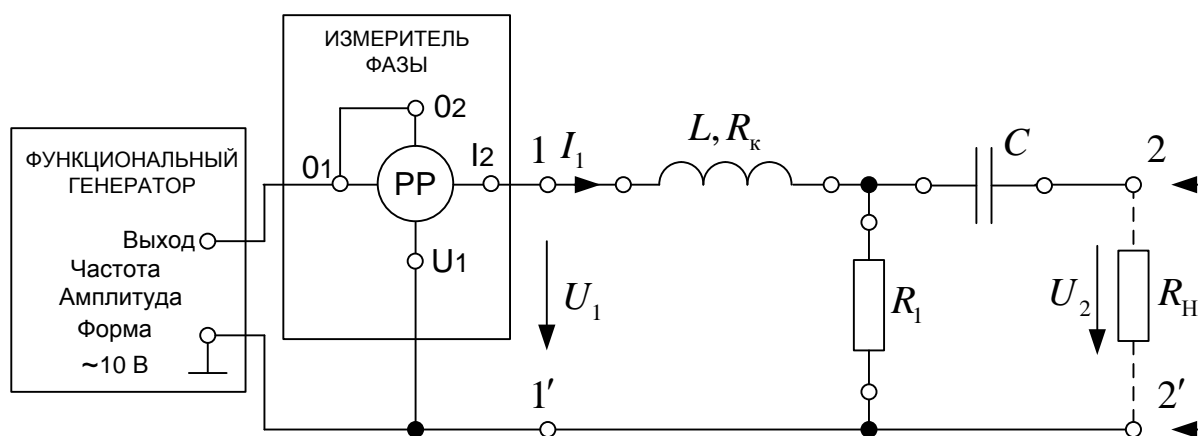


Рис. 7.3. Схема опыта (прямое включение)

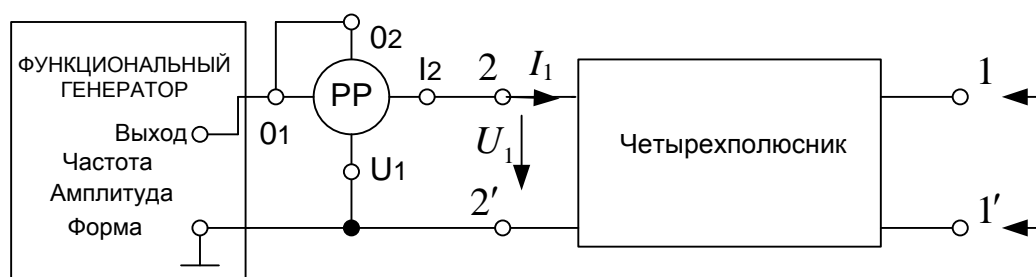


Рис. 7.4. Схема опыта (обратное включение)

$U_1 = \underline{\hspace{1cm}}$  В;     $f = \underline{\hspace{1cm}}$  Гц;     $R_1 = \underline{\hspace{1cm}}$  Ом;     $R_H = \underline{\hspace{1cm}}$  Ом;     $C = \underline{\hspace{1cm}}$  мкФ;  
 $L = \underline{\hspace{1cm}}$  мГн;     $R_k = \underline{\hspace{1cm}}$  Ом.

Таблица 7.1

## Результаты измерений

Режим		$I_1$ , мА	$\varphi$ , град.	$\underline{Z} = \frac{U_1}{I_1} e^{j\varphi}$ , Ом
Прямое включение	Нагрузка $Z_H = R_H$ ; $U_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ В			$\underline{Z}_{вх} =$
	Холостой ход ( $Z_H = \infty$ )			$\underline{Z}_{1х.х} =$
	Короткое замыкание ( $Z_H = 0$ )			$\underline{Z}_{1к.з} =$
Обратное включение	Холостой ход ( $Z_H = \infty$ )			$\underline{Z}_{2х.х} =$
	Короткое замыкание ( $Z_H = 0$ )			$\underline{Z}_{2к.з} =$

Таблица 7.2

## Результаты расчета

$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ , Ом	$L$ , мГн	$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ , Ом	$C$ , мкФ	$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$ , Ом	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$\varphi$ , град.

$$\frac{\underline{Z}_{1х.х}}{\underline{Z}_{1к.з}} = \underline{\hspace{4cm}} \quad \frac{\underline{Z}_{2х.х}}{\underline{Z}_{2к.з}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1х.х}}{\underline{Z}_{2х.х} - \underline{Z}_{2к.з}}} =$$

$$\underline{B} = \underline{A} \underline{Z}_{2к.з} =$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1х.х}} =$$

$$\underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1к.з}} =$$

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} =$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A} - 1}{\underline{C}} =$$



$$\underline{Z}_2 = \frac{D-1}{\underline{C}} =$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{C}} =$$

$$\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\frac{\dot{U}_2}{R_{\text{H}}} =$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\frac{\dot{U}_2}{R_{\text{H}}} =$$

$$\varphi = \beta - \alpha =$$

### Библиографический список

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие / Г. И. Атабеков. СПб: Лань, 2009. 592 с.
2. Периодические режимы однофазных и трехфазных электрических цепей: Учебное пособие / А. Ю. Тэттер, В. Т. Черемисин и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. 132 с.
3. Кузнецов А. А. Переходные процессы в линейных электрических цепях: Учебное пособие / А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. Ю. Тэттер / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 103 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.
5. Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники» / А. А. Кузнецов, Т. В. Ковалева и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. Ч. 1. 50 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 2*

---

Редактор Н. А. Майорова

\*\*\*

Подписано в печать 29.03.2018. 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