

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

В.В. Быковский, Л.В.Быковская, Н.Ю.Ушакова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Практикум

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 27.03.03 Системный анализ и управление

Оренбург
2019

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73
Б 95

Рецензент— доцент, кандидат технических наук В.М. Нелюбов

Быковский, В.В.
Б95 Электрические цепи [Электронный ресурс]: практикум / В.В. Быковский, Л.В. Быковская, Н.Ю. Ушакова; Оренбургский гос. ун-т – Оренбург: ОГУ, 2019. – 134 с.
ISBN 978-5-7410-2338-9

Практикум содержит краткие теоретические сведения, рабочее задание, порядок обработки результатов измерений и перечень материалов для отчета, а также вопросы и варианты тестовых заданий для защиты лабораторных работ.

Практикум подготовлен для студентов направления подготовки 27.03.03 Системный анализ и управление, профиль «Системный анализ и управление в информационных технологиях» в соответствии с содержанием дисциплины «Теоретические основы электротехники и электроника» и может быть использован обучающимися по другим направлениям подготовки всех форм обучения.

ISBN

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73

ISBN 978-5-7410-2338-9

© Быковский В.В.,
Быковская Л.В.,
Ушакова Н.Ю., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение.....	6
1 Лабораторная работа: Экспериментальное определение основных параметров и характеристик активных и пассивных элементов электрической цепи постоянного тока	7
1.1 Краткие теоретические и практические сведения	7
1.2 Описание лабораторной установки.....	16
1.3 Подготовка к работе.....	16
1.4 Рабочее задание	17
1.5 Обработка результатов опытов.....	18
1.6 Содержание отчета.....	18
1.7 Контрольные вопросы	19
2 Лабораторная работа: Опытная проверка законов Ома и Кирхгофа....	21
2.1 Краткие теоретические и практические сведения	21
2.2 Описание лабораторной установки.....	30
2.3 Подготовка к работе.....	31
2.4 Рабочее задание	31
2.5 Обработка результатов опытов.....	34
2.6 Содержание работы	34
2.7 Контрольные вопросы	35
3 Лабораторная работа: Нелинейные электрические цепи постоянного тока.....	42
3.1 Краткие теоретические и практические сведения	42
3.2 Описание лабораторной установки.....	48
3.3 Подготовка к работе.....	49
3.4 Рабочее задание	49
3.5 Обработка результатов опытов.....	51
3.6 Содержание отчета.....	52
3.7 Контрольные вопросы	52
4 Лабораторная работа: Неразветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями	56
4.1 Краткие теоретические и практические сведения	56
4.2 Описание лабораторной установки.....	70
4.3 Подготовка к работе.....	70

4.4 Рабочее задание	71
4.5 Обработка результатов опытов.....	72
4.6 Содержание отчета.....	73
4.7 Контрольные вопросы	73
5 Лабораторная работа: Разветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями	77
5.1 Краткие теоретические и практические сведения	77
5.2 Описание лабораторной установки.....	82
5.3 Подготовка к работе.....	82
5.4 Рабочее задание	83
5.5 Обработка результатов опытов.....	84
5.6 Содержание отчета.....	84
5.7 Контрольные вопросы	85
6 Лабораторная работа: Исследование резонанса токов.....	89
6.1 Краткие теоретические и практические сведения	89
6.2 Описание лабораторной установки.....	92
6.3 Подготовка к работе.....	92
6.4 Рабочее задание	92
6.5 Обработка результатов опытов.....	94
6.6 Содержание отчета.....	95
6.7 Контрольные вопросы	95
7 Лабораторная работа: Исследование резонанса напряжений	99
7.1 Краткие теоретические и практические сведения	99
7.2 Описание лабораторной установки.....	104
7.3 Подготовка к работе.....	105
7.4 Рабочее задание	105
7.5 Обработка результатов опытов.....	107
7.6 Содержание отчета.....	107
7.7 Контрольные вопросы	108
8 Лабораторная работа: Исследование трехфазной цепи при соединении приемников звездой	111
8.1 Краткие теоретические и практические сведения	111
8.2 Описание лабораторной установки.....	117
8.3 Подготовка к работе.....	118

8.4 Рабочее задание	118
8.5 Обработка результатов опытов.....	119
8.6 Содержание отчета.....	119
8.7 Контрольные вопросы	121
9 Лабораторная работа: Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником	123
9.1 Краткие теоретические и практические сведения	123
9.2 Описание лабораторной установки.....	127
9.3 Подготовка к работе.....	128
9.4 Рабочее задание	128
9.5 Обработка результатов опытов.....	130
9.6 Содержание отчета.....	130
9.7 Контрольные вопросы	130
Список использованных источников	134

Введение

Электротехника— область техники, связанная с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии. Под электротехникой также понимают техническую науку, которая изучает применение электрических и магнитных явлений для практического использования. Электротехника выделилась в самостоятельную науку из физики в конце XIX века, после коммерциализации телеграфа и средств передачи электрической энергии. В настоящее время электротехника включает в себя несколько направлений: электроэнергетику, электромеханику, системы управления, обработку сигналов и телекоммуникации.

Теоретические основы электротехники и электроника (ТОЭ и Э) – это курс, входящий в блок общепрофессиональных дисциплин, направленный на формирование базовых компетенций. Изучение ТОЭ и Э дает возможность сформировать у обучающихся профессиональные компетенции в образовательной области «Инженерное дело, технологии и технические науки».

В лабораторный практикум включены шестнадцать лабораторных работ, охватывающих наиболее важные разделы электротехники и электроники: линейные электрические цепи постоянного тока, линейные электрические цепи синусоидального тока, трехфазные электрические цепи, основные элементы электронных схем, вторичные источники питания, усилительные устройства.

Описание каждой лабораторной работы включает в себя: цель работы, порядка ее выполнения и оформления, краткие теоретические сведения и контрольные вопросы. Лабораторные работы рассчитаны на выполнение экспериментальных исследований с помощью комплекта оборудования, расположенного в лабораториях кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники Оренбургского государственного университета. Практикум может быть использован обучающимися по другим направлениям подготовки.

1 Лабораторная работа: Экспериментальное определение основных параметров и характеристик активных и пассивных элементов электрической цепи постоянного тока

Цель работы: Экспериментальное определение основных параметров и характеристик источников и приемников электрической энергии постоянного тока.

1.1 Краткие теоретические и практические сведения

Электрическая цепь – это совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока.

Таблица 1.1 - Классификация электрических цепей

1	По виду тока:	• постоянного тока; • переменного тока.
2	По составу элементов:	• активные; • пассивные; • линейные; • нелинейные.
3	По характеру распределения параметров:	• с сосредоточенными параметрами; • с распределенными параметрами.
4	По числу фаз (для переменного тока):	• однофазные; • многофазные (в основном трёхфазные).

Процессы в электрической цепи могут быть описаны с помощью интегральных понятий, таблица 1.2.

Основными элементами электрической цепи являются источники электрической энергии, приемники электрической энергии (нагрузка, потребитель) и соединительные провода. Более сложные электрические цепи могут содержать измерительные приборы, коммутационные аппараты, реле, устройства для контроля, регулирования и защиты.

Таблица 1.2 – Основные электротехнические величины

Название величины	Определение	Обозначение	Единицы измерения
Электрический заряд	Физическая скалярная величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей и принимать участие в электромагнитном взаимодействии.	q	Кл (Кулон)
Электрический ток	Явление движения заряженных частиц под действием электрического поля в веществе, обладающем электропроводностью.	I, i	А (Ампер)
ЭДС (электро- движущая сила)	ЭДС – это работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника от вывода с меньшим потенциалом к выводу с большим. Характеризуется разностью потенциалов на электродах источника.	E, e	В (Вольт)
Электрическое напряжение	Разность потенциалов, работа по перемещению единичного заряда из одной точки электрической цепи в другую.	U, u	В (Вольт)
Магнитный поток	Векторная величина, равная плотности потока силовых линий магнитного поля, проходящих через бесконечно малую площадку dS	Φ	Вб (Вебер)
Магнитная индукция	Векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля в данной точке пространства. Определяет, с какой силой магнитное поле действует на движущийся заряд.	B	Тл (Тесла)

Электротехнические устройства, производящие электрическую энергию, называют генераторами или источниками электрической энергии, а устройства, потребляющие ее – приемниками (потребителями, нагрузкой) электрической энергии.

В источниках электрической энергии различные виды неэлектрической энергии преобразуются в электрическую энергию.

Так, в генераторах электростанций в электрическую энергию преобразуется энергия механическая, в гальванических элементах и аккумуляторах – химическая, в солнечных батареях – световая и т.д.

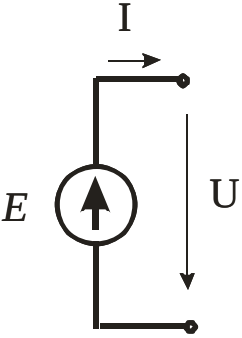
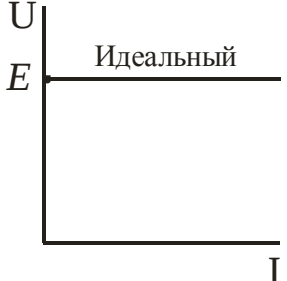
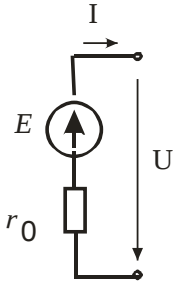
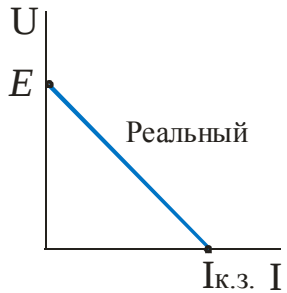
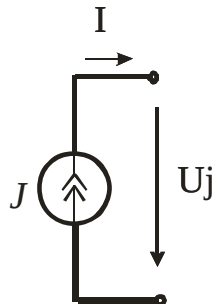
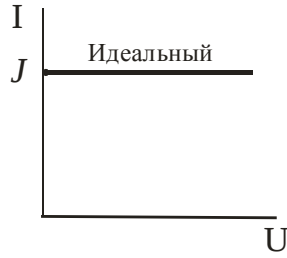
В приемниках электрическая энергия источников преобразуется в механическую (электрические двигатели, электромагниты), тепловую (электропечи, сварочные аппараты, нагревательные элементы), световую (электрические лампы), химическую (электролизные ванны) и т.д.

Для теоретического анализа какой-либо электрической цепи ее изображают схемой – графическим изображением электрической цепи, содержащим условные обозначения её элементов и показывающим соединения этих элементов.

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на активные и пассивные. Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия.

Электрическая цепь характеризуется совокупностью элементов, из которых она состоит, и способом их соединения. Соединение элементов электрической цепи наглядно отображается ее схемой замещения.

Таблица 1.3 – Идеализированные активные элементы

Элемент схемы: обозначение, параметр	Характеристика, определение	Основные уравнения
<i>Идеальный источник напряжения (ЭДС)</i> 	Внешняя характеристика:  Идеализированный элемент, напряжение, на полюсах (выводах) которого не зависит от проходящего через источник тока.	$r_0 = 0$ $U = E$ $Pe = E \cdot I = U \cdot I$
<i>Реальный источник напряжения(ЭДС)</i> 	Внешняя характеристика: 	$r_0 \neq 0$ $U = E - r_0 \cdot I$ $I_{к.з.} = \frac{E}{r_0}$
<i>Идеальный источник тока</i> 	Внешняя характеристика:  Идеализированный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его полюсах.	$g_0 = 0$ $r_0 \rightarrow \infty$ $I = J$ $P_j = J \cdot U_j$

Источник напряжения характеризуется величиной электродвижущей силы E и внутренним сопротивлением r_0 , значения которых не зависят от величины тока во внешней цепи, подключенной к этому источнику.

Внутреннее сопротивление источника напряжения много меньше сопротивления внешней цепи ($r_0 \ll R_n$). Вследствие этого внутренним сопротивлением источника иногда пренебрегают. Такой источник энергии считают идеальным и называют источником ЭДС и характеризуют только одним параметром – электродвижущей силой E .

Изображение в электрических схемах идеального источника ЭДС показано в таблице 1.3 и на рисунке 1.1,а. Источник напряжения с внутренним сопротивлением отличным от нуля изображают в виде последовательного соединения источника ЭДС и внутреннего сопротивления r_0 , как показано на рисунках 1.1,б; 1.1,в и в таблице 1.3.

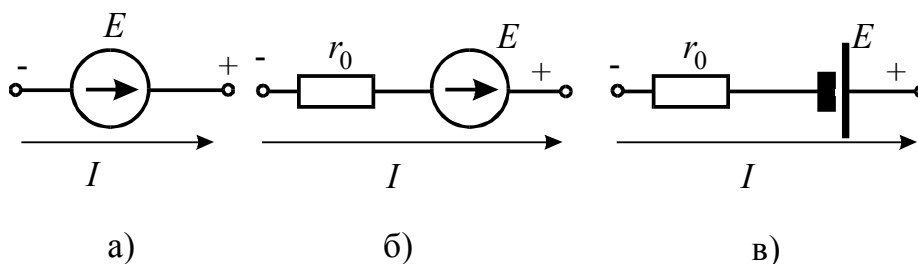


Рисунок 1.1 – Условные графические обозначения (УГО) идеального (а) и реальных (б, в) источников энергии

Положительное направление ЭДС указывается направлением стрелки в УГО (условном графическом обозначении) и совпадает с направлением увеличения потенциала в источнике.

Источники энергии могут работать в режиме генератора или в режиме потребителя. Если энергия в источнике преобразуется в электрическую, то источник работает в генераторном режиме. Направления ЭДС и силы тока в источнике, работающем в генераторном режиме, совпадают. Если энергия в источнике преобразуется в другие виды энергии, то источник работает в режиме потребления. Примером такого источника является аккумулятор в

режиме зарядки. Направление ЭДС и силы тока в источнике, работающем в режиме потребителя, противоположны.

Графическая зависимость напряжения на зажимах источника электрической энергии от силы тока $U = f(I)$ называется *вольт-амперной* или *внешней характеристикой*.

В таблице 1.3 и на рисунке 1.2 показаны внешние характеристики: реального источника (рисунок 1.2, а); идеального источника (рисунок 1.2, б).

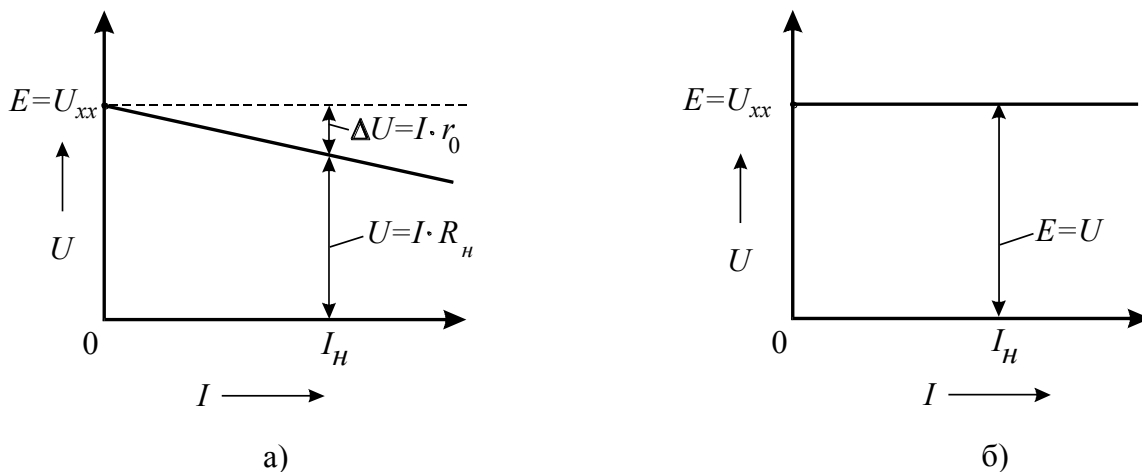


Рисунок 1.2 – Внешние характеристики источника напряжения (реального) (а) и источника ЭДС (идеального) (б)

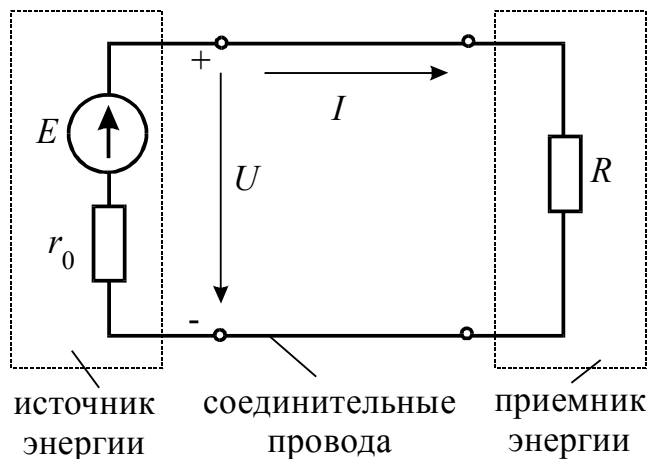


Рисунок 1.3 – Схема электрической цепи

Вольт-амперная характеристика источника напряжения имеет прямолинейный убывающий характер, что следует из уравнения (1.1), составленного на основании второго закона Кирхгофа для простейшей электрической цепи, изображенной на рисунке 1.3.

$$U = E - I \cdot r_0, \quad (1.1)$$

где E и r_0 – ЭДС и внутреннее сопротивление источника энергии;

U – напряжение на зажимах источника.

На основании уравнения (1.1) падение напряжения U на зажимах источника с возрастанием силы тока I обусловлено внутренними потерями напряжения ($\Delta U = I \cdot r_0$).

На основании уравнения (1.1) можно сделать вывод: значение напряжения U на зажимах источника при отсутствии тока (в режиме холостого хода) численно равно значению ЭДС E :

$$U_{\text{хх}} = E, \quad \text{при} \quad I = 0. \quad (1.2)$$

Если к зажимам источника энергии в разомкнутой цепи подсоединить вольтметр с внутренним сопротивлением, стремящимся к бесконечно большой величине, то прибор покажет значение ЭДС источника, так как потребляемый вольтметром ток будет пренебрежительно мал, и тогда можно пренебречь слагаемым $\Delta U = I \cdot r_0$. Вольт-амперная характеристика идеального источника энергии (источника ЭДС) параллельна оси тока (рисунок 1.2,б), так как внутренние потери энергии в источнике отсутствуют ($r_0 \approx 0$) и значения ЭДС и напряжения на нем совпадают.

Анализируя основные процессы, происходящие в электрических цепях постоянного тока, в качестве нагрузки (потребителя)обычно используют резисторы. Изображение резисторов в электрических цепях показано в таблице 1.4 и на рисунке 1.4.

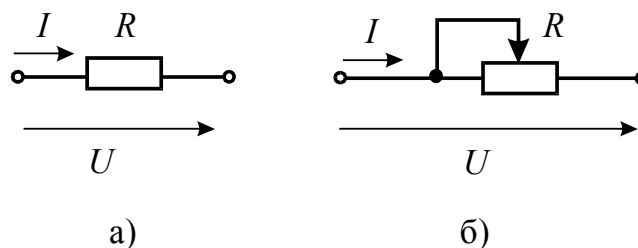


Рисунок 1.4 – УГО нерегулируемого (а)и регулируемого (б) резисторов

Электрическое сопротивление резистора равно отношению падения напряжения на нем к току, протекающему через него, и измеряется в Ом

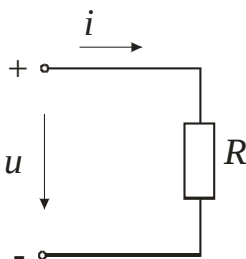
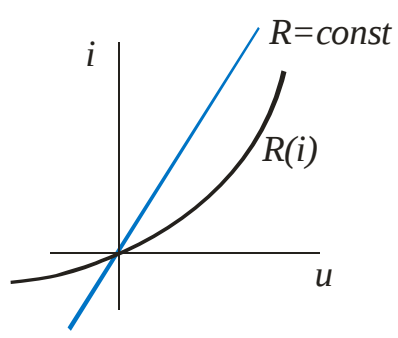
$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.3)$$

Определение величины электрического сопротивления резисторов по известным значениям напряжения и тока называется методом амперметра и вольтметра.

Величина, обратная электрическому сопротивлению, называется электрической проводимостью и измеряется в См (Сименс)

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}. \quad (1.4)$$

Таблица 1.4 – Свойства резистивного элемента

Элемент схемы: обозначение, параметр	Характеристика, определение	Основные уравнения
<i>Резистивный</i>  R или r – электрическое сопротивление резистора, [Ом]; G или g – электрическая проводимость, [См]. $G = R^{-1}$	Вольт-амперная характеристика линейного и нелинейного резистора $u = f(i)$  Идеализированный элемент электрической цепи, в котором происходит необратимое преобразование электромагнитной энергии в тепловую, механическую или световую.	Закон Ома: $u_R = R \cdot i$; Мощность: $p = u_R \cdot i = R \cdot i^2$; Энергия:

Электрические цепи или их участки могут работать в различных режимах, описанных в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Режимы работы электрических цепей

Наименование режима	Определение
<i>Номинальный режим</i>	Режим, в котором элемент электрической цепи (источник, приемник) работает при номинальных величинах токов, напряжений и мощностей.
<i>Согласованный режим</i>	Режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, имеет максимальное значение, что возможно при определенном соотношении (согласовании) параметров ЭЦ.
<i>Режим холостого хода (ХХ)</i>	Режим, при котором через источник или приемник не протекает ток. При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее.
<i>Режимом короткого замыкания (КЗ)</i>	Режим, возникающий при соединении между собой без какого-либо сопротивления (накоротко) зажимов источника или иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение. При коротком замыкании могут возникнуть недопустимо большие токи, электрическая дуга, что может привести к тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания является аварийным.

1.2 Описание лабораторной установки

«Элементы электрической цепи и измерительные приборы для определения параметров источников и приемников электрической энергии расположены на лицевой панели универсального стенда в соответствии с рисунком 1.5. Источниками электрической энергии являются реальные источники постоянного напряжения на 12 и 15 В. В качестве приемника электрической энергии используется переменный резистор R_1 . Для измерения токов применяется миллиамперметр М42300 с пределом измерения до 100 мА. Для измерения напряжений в качестве вольтметра используется цифровой мультиметр ВР-11А» [6].

1.3 Подготовка к работе

1.3.1 Повторить раздел курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в котором рассмотрены характеристики основных элементов электрической цепи.

1.3.2 Подготовить бланк отчета лабораторной работы, в котором привести схему опытов с указанием используемых приборов, таблицы для записей результатов опытов и расчетов.

1.3.3 Подготовить ответы на контрольные вопросы.



Рисунок 1.5 – Элементы и измерительные приборы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

1.4 Рабочее задание

1.4.1 Собрать электрическую цепь в соответствии с рисунком 1.6, и после проверки ее преподавателем, включить источник переключателем П1. Установить величину напряжения 15 В.

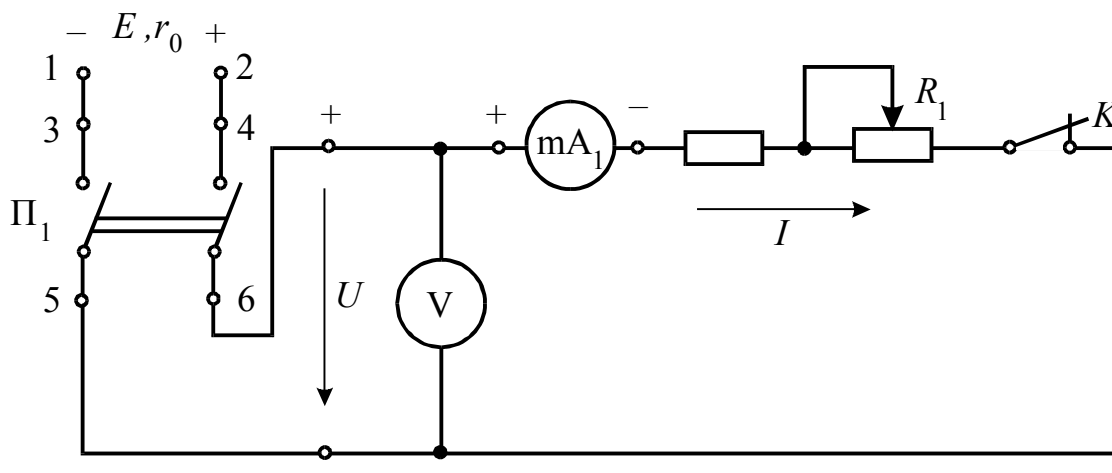


Рисунок 1.6 – Электрическая схема опытов

1.4.2 Установите движок резистора R_1 в положение, при котором миллиамперметр покажет номинальный ток (за номинальный ток принять значение $I_H = 40$ мА). Проведите измерение тока источника и напряжение на его зажимах в замкнутой электрической цепи. Затем разомкните электрическую цепь ключом K (ток станет равным нулю) и измерьте ЭДС источника. Результаты измерений запишите в таблицу 1.6.

Таблица 1.6 – Определение параметров активного элемента цепи

	E	U_H	I_H	r_0
	В	В	мА	Ом
Источник 1				
Источник 2				

1.4.3 Восстановите соединение ключом K в электрической цепи, и последовательно изменяя движком сопротивление резистора R_1 , произведите не менее 5-6 измерений показаний вольтметра и миллиамперметра. Результаты измерений свести в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 – Определение параметров пассивного элемента цепи

	Измерено		Вычислено	
	U	I	R	G
	В	мА	Ом	См
Источник 1 (5 строк)				
Источник 2 (5 строк)				

1.4.4 Отключите питание. Замените источник питания. Установите величину напряжения 12 В и повторите опыты по п. 1.4.2 и 1.4.3.

1.5 Обработка результатов опытов

1.5.1 По данным таблицы 1.6 рассчитайте внутренние сопротивления источников 1 и 2, используя формулу (1.1). Результаты расчетов свести в таблицу 1.7.

1.5.2 По данным таблицы 1.7 постройте в масштабе в одних координатах графики внешних (Вольт-амперных) характеристик источников 1 и 2.

1.5.3 По показаниям вольтметра и амперметра (таблица 1.7) рассчитайте, используя формулы (1.3) и (1.4), сопротивление и проводимость переменного резистора R_l и результаты занесите в таблицу 1.7.

1.5.4 Используя данные таблицы 1.7, определите номинальное падение напряжения (в %) источников, используя следующую зависимость

$$\Delta U_{H\%} = \frac{E - U_H}{U_H} \cdot 100 \text{ \%}.$$

За номинальный ток принять значение $I_H = 40 \text{ мА}$.

1.6 Содержание отчета

1.6.1 Цель работы.

1.6.2 Схема - рисунок 1.6.

1.6.3 Таблицы 1.6 и 1.7 с результатами экспериментов и расчетов.

1.6.4 Расчетные формулы.

1.6.5 Построенные в масштабе внешние характеристики источников.

1.6.6 Выводы по работе.

1.7 Контрольные вопросы

1.7.1 Дайте определение электрической цепи.

1.7.2 По каким признакам классифицируют электрические цепи?

1.7.3 Перечислите основные величины, используемые при анализе работы электрических цепей.

1.7.4 Что называют активным элементом электрической цепи? Какими основными параметрами он характеризуется?

1.7.5 Дайте определение электрического заряда.

1.7.6 Дайте определение электрического тока проводимости. В каких единицах он измеряется?

1.7.7 Дайте определение электрического напряжения. Какой прибор используют для его измерения?

1.7.8 Как включается в электрическую цепь амперметр? Какому основному требованию он должен удовлетворять?

1.7.9 Как включается в электрическую цепь вольтметр? Какому основному требованию он должен удовлетворять?

1.7.10 Дайте определения и приведите классификацию: пассивный элемент электрической цепи; активный элемент электрической цепи.

1.7.11 В каких режимах могут работать источники электрической энергии? По каким признакам определяются режимы работы источников?

1.7.12 Что называют генераторным режимом работы источника и чем он характеризуется?

1.7.13 Какие функции выполняет резистор как элемент схемы замещения реальной электрической цепи?

1.7.14 Запишите уравнение и начертите ВАХ резистивного элемента.

1.7.15 Как выбирают положительные направления для токов в пассивных элементах схем замещения и как связаны с ними положительные направления напряжений на выводах этих элементов?

1.7.16 Как экспериментально определить направление тока в электрической цепи постоянного тока с помощью амперметра?

1.7.17 Как экспериментально определить направление напряжения на элементе электрической цепи постоянного тока с помощью вольтметра?

1.7.18 Перечислите основные элементы простейшей электрической цепи и поясните их назначение.

1.7.19 Что произойдет, если включить амперметр параллельно источнику (нагрузке)?

1.7.20 Что произойдет, если включить вольтметр последовательно с источником?

1.7.21 Объясните порядок эксперимента для определения сопротивления резистивного элемента?

1.7.22 Запишите уравнение и постройте ВАХ идеального источника ЭДС.

1.7.23 Что называют схемой электрической цепи?

1.7.24 Дайте характеристику работы источника электрической энергии в режиме потребителя. Какие процессы происходят при этом в источнике?

1.7.25 Какими преимуществами обладает электрическая энергия?

1.7.26 Что такое вольт-амперная (внешняя) характеристика источника энергии? Приведите аналитическое выражение такой характеристики.

1.7.27 Дайте определение электрического сопротивления элемента цепи. В каких единицах оно измеряется?

1.7.28 Как практически измерить ЭДС источника энергии?

1.7.29 Дайте определение электрической проводимости. В каких единицах она измеряется?

1.7.30 Запишите уравнение и постройте график ВАХ реального источника электрической энергии. Как опытным путем определить внутреннее сопротивление реального источника энергии?

1.7.31 Как классифицируют режимы работы электрических цепей?

2 Лабораторная работа: Опытная проверка законов Ома и Кирхгофа

Цель работы: Исследование соотношений между токами и напряжениями в линейных электрических цепях постоянного тока.

2.1 Краткие теоретические и практические сведения

«Электрической цепью называют совокупность электрических устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии, электромагнитные процессы в которых описываются с помощью понятий об электрическом токе, напряжении, электродвижущей силе и сопротивлении. Графическое изображение цепи с помощью условных обозначений ее элементов называют электрической схемой соединения цепи.» [6]

Электрическая цепь может содержать любое количество активных и пассивных элементов, узлов, ветвей и контуров. Основные топологические понятия приведены в таблице 2.1.

На рисунке 2.1 приведены примеры ветвей электрической цепи.

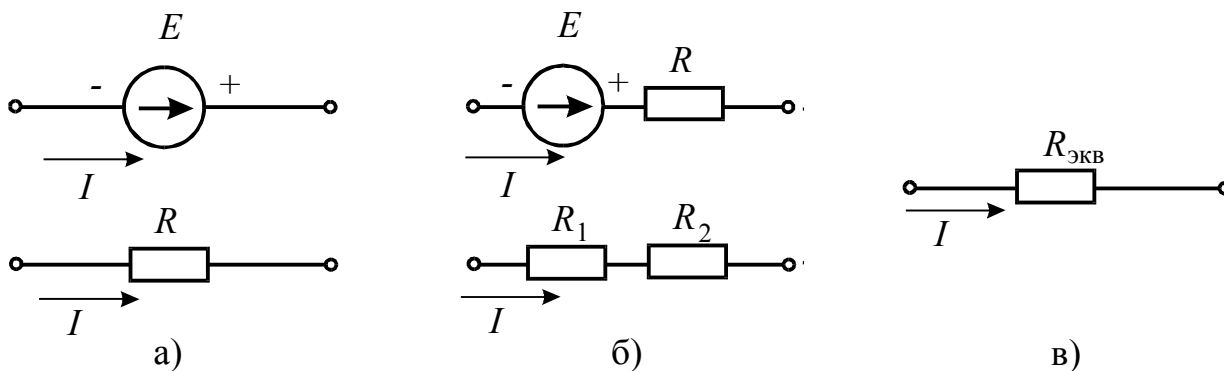


Рисунок 2.1 – Ветви электрической цепи

Если через все элементы электрической цепи протекает один и тот же ток, то такое соединение называют последовательным, таблица 2.2.

Таблица 2.1 – Топология электрической схемы

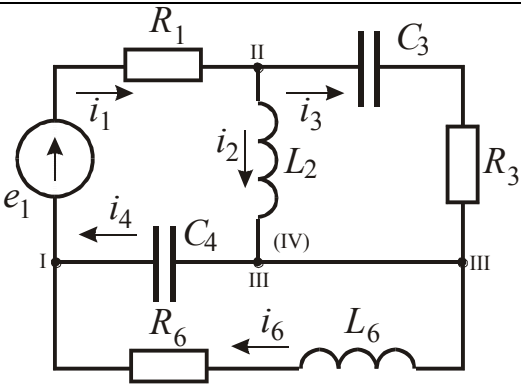
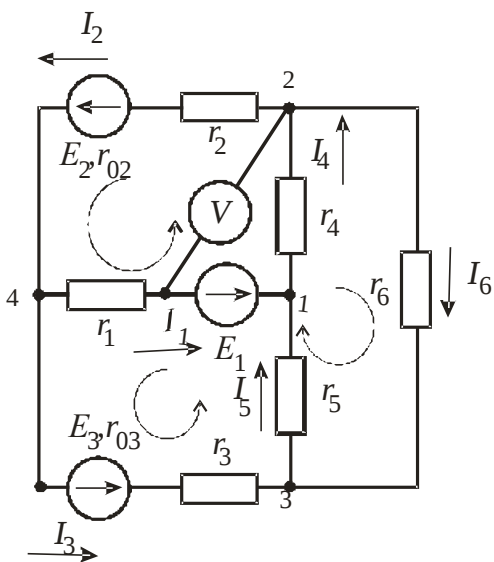
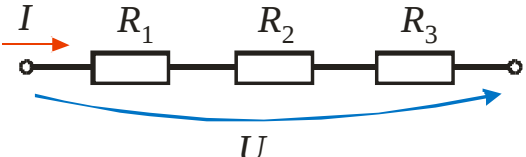
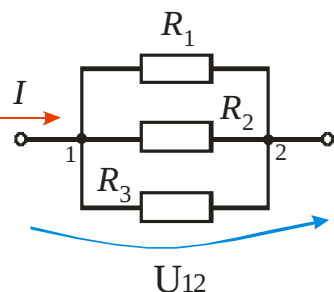
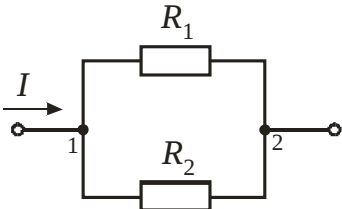
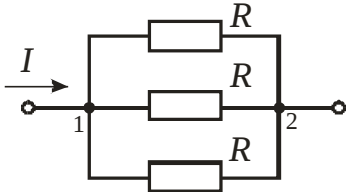
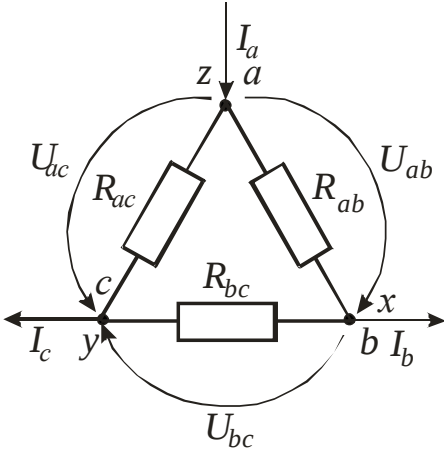
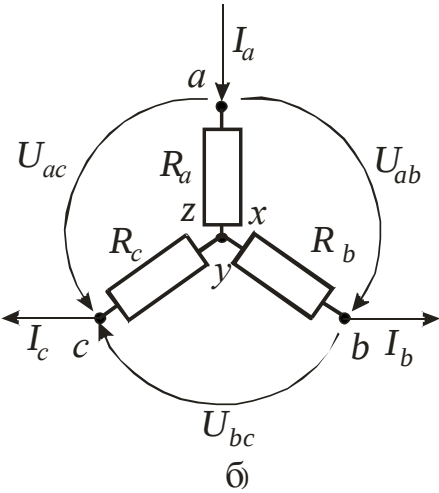
Топологический элемент	Схема
Узел – место соединения трех и более ветвей. Единственной характеристикой узла является его потенциал. Графически они обозначаются жирными точками. Узел III и IV (один и тот же узел) разнесен на схеме (разнесенный узел). Между частями узла III включен соединительный провод с нулевым сопротивлением, который ветвью не является.	 Узлы обозначены римскими цифрами. В схеме три узла $y=3$.
Ветвью называют участок цепи между двумя узлами, в любом сечении которого ток имеет одно и тоже значение. Соединительный провод с нулевым сопротивлением (короткозамкнутая перемычка) ветвью не является.	 В схеме шесть ветвей $v=6$. Вольтметр не образует отдельной ветви.
Контур – замкнутый путь, проходящий по ветвям схемы, в котором один из узлов является началом и концом пути.	На схеме в предыдущей строке показаны направления обхода трех контуров. Контур образован резисторами $r_2-r_1-r_4$; $r_4-r_6-r_5$; $r_1-r_3-r_5$.

Таблица 2.2 – Соединения резистивных элементов

Соединенные элементы	Эквивалентный параметр
Последовательное соединение	
Резистивные сопротивления  $I = I_1 = I_2 = I_3$ $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \sum_{k=1}^n U_k = I \cdot \sum_{k=1}^n R_k$	Эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов определяется суммой сопротивлений каждого элемента: $R_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n R_k .$ Непосредственно для схемы, изображенной в левой ячейке: $R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3$
Параллельное соединение пассивных элементов	
Резистивные сопротивления  $U_{12} = U_1 = U_2 = U_3 .$ Ток в неразветвленной части равен алгебраической сумме токов в ветвях: $I = \sum I_n .$ $I = \sum_{k=1}^n I_k = \sum_{k=1}^n G_k \cdot U = U \cdot \sum_{K=1}^n G_k .$	В случае параллельного соединения складываются проводимости. $\frac{1}{R_{\Sigma}} = \sum \frac{1}{R_n} ,$ $G_{\Sigma} = \sum G_n .$

Соединенные элементы	Эквивалентный параметр
Параллельно соединены два элемента:  Если параллельно соединены несколько элементов имеющих одинаковое сопротивление, например три элемента 	$R_{\Sigma} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$ $R_{\Sigma} = \frac{R}{3}.$ В общем случае для схемы с параллельно соединенными n одинаковыми сопротивлениями: $R_{\Sigma} = \frac{R}{n}.$
Соединение резисторов треугольником и звездой	
 a)	Преобразование треугольника в звезду: $R_a = \frac{R_{ab} \cdot R_{ac}}{\sum R};$ $R_b = \frac{R_{ab} \cdot R_{bc}}{\sum R};$ $R_c = \frac{R_{ac} \cdot R_{bc}}{\sum R},$ где $\sum R = R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}$

Продолжение таблицы 2.2

Соединенные элементы	Эквивалентный параметр
	Преобразование звезды в треугольник: $R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c};$ $R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a};$ $R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{R_b}.$

На схеме электрической цепи узел присоединения ветвей изображается одной жирной точкой (рисунок 2.2,а) или в случае разнесенного узла несколькими точками (рисунок 2.2,б). Электрические цепи, изображенные на этих рисунках, равнозначны.

Соединение, при котором все ветви электрической цепи присоединены к одним и тем же двум узлам, называют *параллельным*. При параллельном соединении, таблица 2.2, напряжения ветвей одинаково.

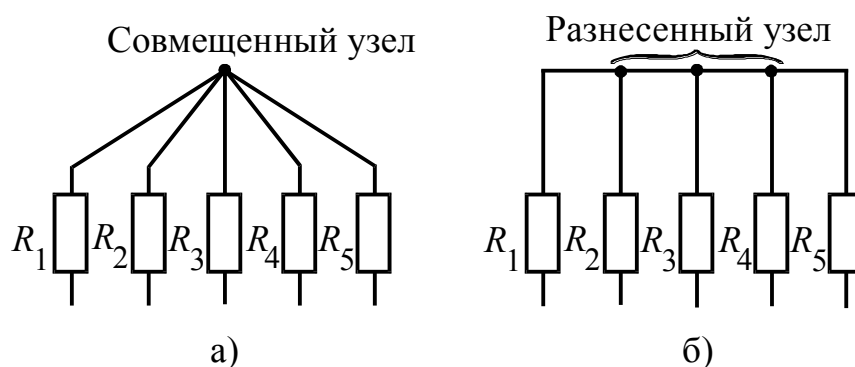
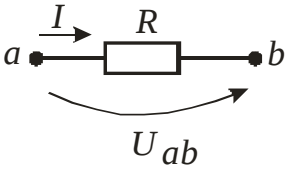
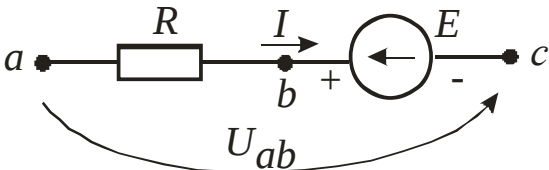
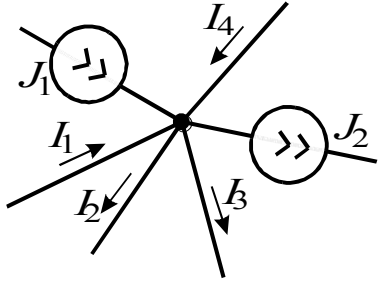


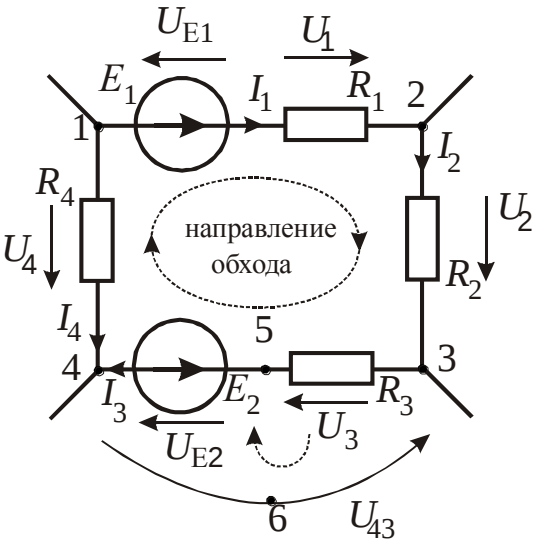
Рисунок 2.2 – Узлы электрической цепи

Более сложными вариантами соединения элементов электрических цепей являются «звезды» и «треугольники», таблица 2.2.

Основными физическими законами, используемыми для расчета электрических цепей, являются законы Ома, Кирхгофа (таблица 2.3), Джоуля-

Таблица 2.3 – Основные законы линейных электрических цепей

Закон	Формулировка	Реализация
Закон Ома	Разность потенциалов на концах проводника пропорциональна току в проводнике $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = R \cdot I$	 $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = R \cdot I$ $I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}$ $\varphi_b = \varphi_a - R \cdot I$ $\varphi_a = \varphi_b + R \cdot I$
Закон Ома для участка цепи с ЭДС	$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c \pm \sum E}{\sum R}$ При совпадении направлений ЭДС и тока в ветви источник ЭДС записывают со знаком плюс, а при несовпадении направлений – со знаком минус.	 $I = \frac{\varphi_a - \varphi_c - E}{R}$ При противоположном направлении ЭДС: $I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R}$
Первый закон Кирхгофа	<i>Первая формулировка:</i> Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в любом узле электрической схемы, равна нулю.	

Закон	Формулировка	Реализация
	$\sum_{k=1}^n I_k = 0$	Всем токам, направленным <i>от</i> узла, в уравнении приписывается одинаковый знак, например, <i>положительный</i>, тогда все токи, направленные <i>к</i> узлу, войдут в уравнение с <i>отрицательным</i> знаком. $-I_1 + I_2 + I_3 + J_2 - J_1 - I_4 = 0$ $-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = -J_2 + J_1$
	<i>Вторая формулировка:</i> Сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих от узла токов.	$J_1 + I_1 + I_4 = J_2 + I_2 + I_3$
Второй закон Кирхгофа	<i>Первая формулировка:</i> Алгебраическая сумма напряжений ветвей в любом замкнутом контуре электрической цепи равна нулю. $\sum_{k=1}^n U_k = 0$	 Обходим контур в произвольно выбранном направлении. При этом напряжения, совпадающие с направлением обхода, записываем с одинаковыми знаками, например, со знаками «+». $U_1 + U_2 + U_3 - U_4 - U_{E1} + U_{E2} = 0$

Закон	Формулировка	Реализация
	<i>Вторая формулировка:</i> Алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС вдоль того же контура $\sum_{k=1}^n R_k \cdot I_k = \sum_{k=1}^m E_k$	Обходим контур в произвольно выбранном направлении. При этом ЭДС и падения напряжений, совпадающие с направлением обхода, записываем с одинаковыми знаками, например, со знаками «+». Для схемы в вышерасположенной ячейке: $R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 - R_4 I_4 = E_1 - E_2$

Любую сложную электрическую цепь можно рассчитать с помощью законов Кирхгофа. Но при этом возникает проблема, связанная с большим количеством уравнений. Поэтому в инженерной практике используются различные специальные методы расчета электрических цепей, основанные на законах Кирхгофа и Ома: метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод эквивалентных преобразований.

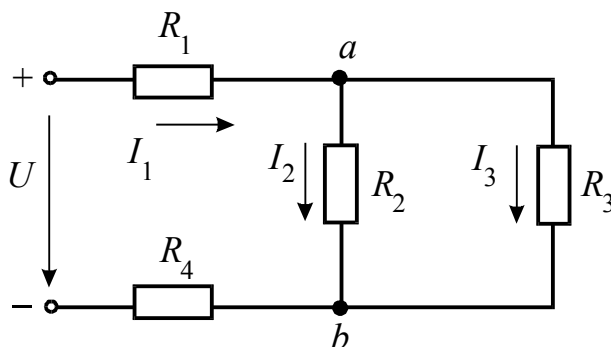


Рисунок 2.3 – Смешанное соединение сопротивлений

Так для цепи с двумя параллельно соединенными сопротивлениями R_2 , R_3 можно применить *свойство пассивных параллельных ветвей*, рисунок 2.3:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \quad (2.1)$$

а токи ветвей равны

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{I_1 \cdot R_{23}}{R_2} = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (2.2)$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{I_1 \cdot R_{23}}{R_3} = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3}. \quad (2.3)$$

Применение метода эквивалентных преобразований покажем на примере этой же схемы. Суть метода состоит в замене отдельных участков схемы с последовательно или параллельно соединенными элементами одним эквивалентным элементом.

Ветви с сопротивлениями R_2 и R_3 (рисунок 2.3) соединены параллельно, следовательно, заменяем их эквивалентным сопротивлением R_{23}

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}. \quad (2.4)$$

Вид схемы электрической цепи после преобразования (2.4) показан на рисунке 2.4,а. Резисторы R_1 , R_{23} , R_4 соединены последовательно, отсюда эквивалентное сопротивление цепи $R_{\text{экв}}$ (рисунок 2.4,б)

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{23} + R_4. \quad (2.5)$$

Теперь можно определить ток

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{экв}}}. \quad (2.6)$$

Из схемы рисунка 2.4,б найдем напряжение на участке $a - b$:

$$U_{ab} = I_1 \cdot R_{23}, \quad (2.7)$$

а токи I_2 и I_3 из

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}. \quad (2.8)$$

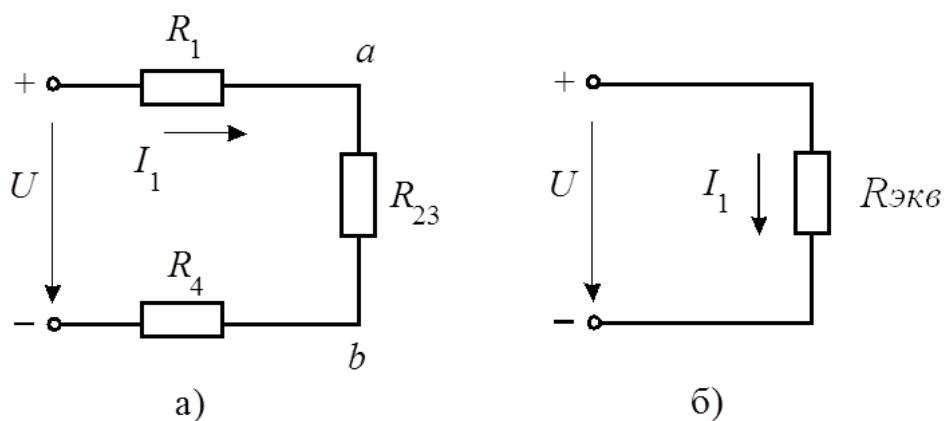


Рисунок 2.4 – Эквивалентное преобразование последовательного соединения

2.2 Описание лабораторной установки

Оборудование для проведения экспериментов расположено на лицевой панели универсального лабораторного стенда, рисунок 2.5.



Рисунок 2.5 – Элементы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

Питание собранной электрической цепи осуществляется от стабилизированного источника постоянного напряжения 12 В, максимальное значение тока, протекающего через нагрузку, не должно превышать 200 мА.

В качестве нагрузки при проведении опытов используются переменные резисторы R_1 , R_2 , R_3 . Для измерения токов применяются миллиамперметры

М42300 с пределом измерения до 100 мА. Для измерения напряжения на участках электрической цепи в качестве вольтметра применяется цифровой мультиметр ВР-11А.

2.3 Подготовка к работе

2.3.1 Повторите раздел курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в котором сформулированы законы Ома и Кирхгофа, рассмотрен метод эквивалентных преобразований в электрических цепях постоянного тока.

2.3.2 Подготовьте бланк отчета лабораторной работы, в котором приведите схему опытов с указанием используемых приборов, таблицы для записей результатов опытов и расчетов.

2.3.3 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

2.4 Рабочее задание

Опыт 1. Последовательное соединение сопротивлений

2.4.1 Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой рисунка 2.6. После проверки электрической цепи преподавателем включить питание переключателем Π_1 .

2.4.2 Проведите измерения тока I и напряжений U , U_1 , U_2 при произвольных значениях сопротивлений R_1 и R_2 .

2.4.3 Вращая ручки резисторов, измените величины сопротивлений R_1 , R_2 и повторите измерения тока и напряжений по п. 2.4.2.

2.4.4 Результаты измерений внесите в таблицу 2.4.

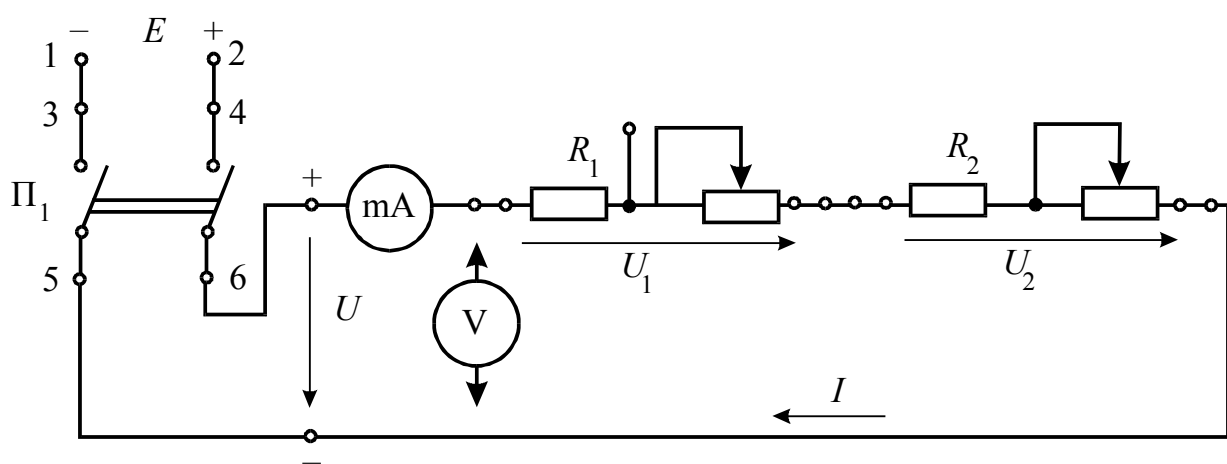


Рисунок 2.6 – Электрическая схема первого опыта

Таблица 2.4 – Результаты первого опыта

№ опыта	Измерено				Вычислено			
	I	U	U_1	U_2	$U = U_1 + U_2$	R_1	R_2	$R_{\text{ЭКВ}}$
	mA	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом
1								
2								

Опыт 2. Параллельное соединение сопротивлений

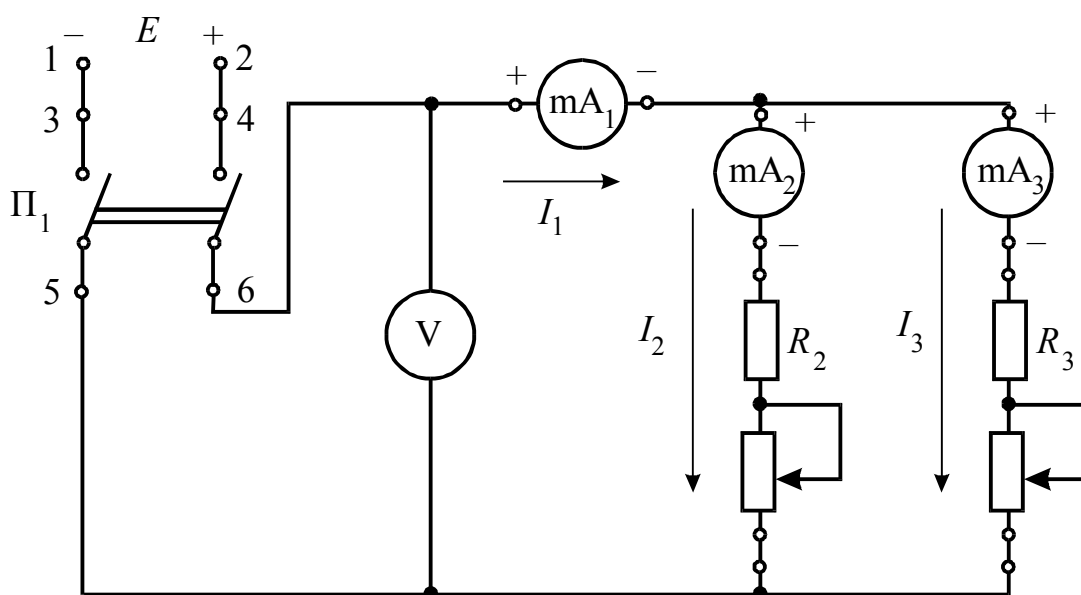


Рисунок 2.7 – Электрическая схема второго опыта

2.4.5 Соберите электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 2.7. После проверки цепи преподавателем включите питание переключателем Π_1 .

2.4.6 Проведите измерения напряжения U , токов I_1 , I_2 , I_3 при

произвольных значениях сопротивлений резисторов R_2 и R_3 .

2.4.7 Измените величины сопротивлений R_2 , R_3 и повторите измерения по п.2.4.6.

2.4.8 Результаты измерений внести в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты второго опыта

№ опыта	Измерено				Вычислено			
	U	I_1	I_2	I_3	$I_1 = I_2 + I_3$	R_2	R_3	$R_{\text{экв}}$
	В	мА	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом
1								
2								
3								

Опыт 3. Смешанное соединение сопротивлений

2.4.9 Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 2.8. После проверки цепи преподавателем включите питание переключателем Π_1 .

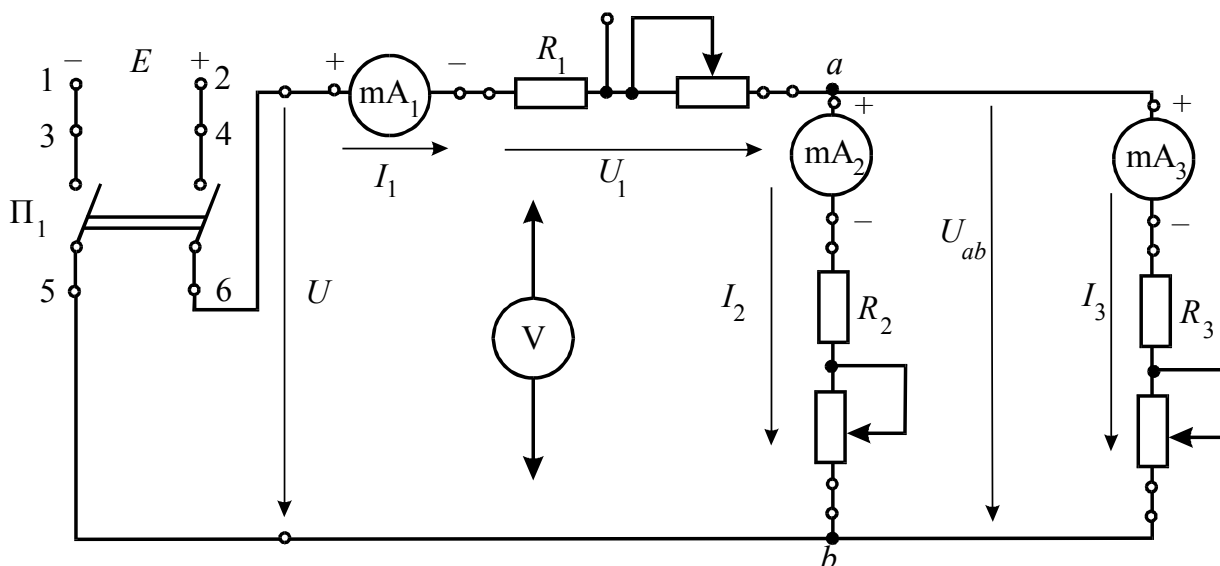


Рисунок 2.8 – Электрическая схема третьего опыта

2.4.10 Для произвольных значений сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 измерьте токи I_1 , I_2 , I_3 и напряжения U , U_1 , U_{ab} .

Таблица 2.6 – Результаты измерений и вычислений третьего опыта

№ опы та	Измерено						Вычислено				
	U	U_1	U_{ab}	I_1	I_2	I_3	$I_1 = I_2 + I_3$	$U = U_1 + U_{ab}$	R_1	R_{ab}	$R_{э\text{кв}}$
	В	В	В	мА	мА	мА	мА	В	Ом	Ом	Ом
1											
2											
3											

2.4.11 Вращая ручки резисторов, измените величины сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и повторите измерения токов и напряжений по п.2.4.10.

2.4.12 Результаты измерений внесите в таблицу 2.6.

2.5 Обработка результатов опытов

2.5.1 Используя результаты измерений в опыте 1, проверьте выполнение второго закона Кирхгофа: $U = U_1 + U_2$. На основании закона Ома для пассивного участка цепи вычислите сопротивления резисторов R_1 , R_2 и $R_{э\text{кв}}$. Результаты расчетов внесите в таблицу 2.4.

2.5.2 По результатам измерений в опыте 2 проверьте справедливость первого закона Кирхгофа: $I_1 = I_2 + I_3$ и, используя закон Ома для пассивного участка цепи, вычислите величины сопротивлений R_2 , R_3 и $R_{э\text{кв}}$. Результаты расчетов внесите в таблицу 2.5.

2.5.3 По результатам измерений в опыте 3 проверьте первый и второй законы Кирхгофа и вычислите сопротивления R_1 , R_{ab} и $R_{э\text{кв}}$. Результаты расчетов внесите в таблицу 2.6.

2.6 Содержание работы

2.6.1 Цель работы.

2.6.2 Электрические схемы опытов, изображенные на рисунках 2.6-2.8.

2.6.3 Таблицы опытных и расчетных данных 2.4, 2.5 и 2.6.

2.6.4 Расчетные формулы.

2.6.5 Выводы по работе.

2.7 Контрольные вопросы

2.7.1 Дайте определение электрической цепи.

2.7.2 Что называется схемой электрической цепи?

2.7.3 Дайте определение узла электрической цепи. В чем различие между изображением на схеме разнесенного и совмещенного узлов?

2.7.4 Дайте определение ветви электрической цепи. Сколько токов может протекать в одной ветви? Сколько элементов может содержать одна ветвь?

2.7.5 Дайте определение контура электрической цепи. Приведите пример.

2.7.6 Какое соединение элементов называется последовательным? Приведите пример. Как соотносятся токи и напряжения отдельных элементов такого соединения?

2.7.7 Какое соединение элементов называется параллельным? Приведите пример. Как соотносятся токи и напряжения отдельных элементов такого соединения?

2.7.8 Какие электрические цепи называют разветвленными и неразветвленными?

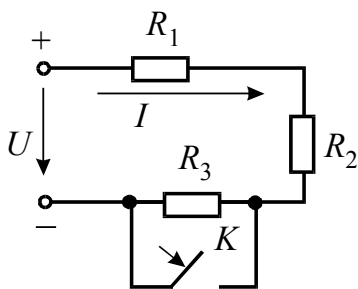
2.7.9 Сформулируйте закон Ома.

2.7.10 Сформулируйте законы Кирхгофа.

2.7.11 Как распределяется ток в пассивных параллельных ветвях? Приведите электрическую схему и запишите формулы.

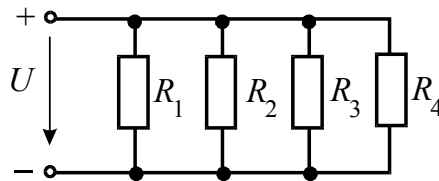
2.7.12 В чем суть метода эквивалентных преобразований?

2.7.13 Что произойдет с напряжениями на участках R_1 и R_2 , если замкнуть ключ K ($U = \text{const}$)? Выберите строку с правильным ответом, поясните.

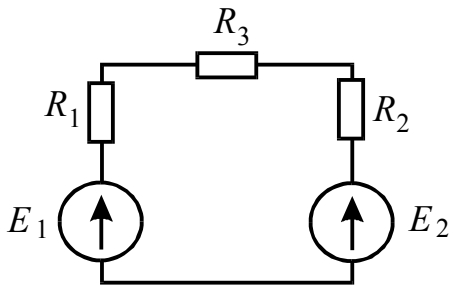


- | | | |
|----|------------------|------------------|
| а) | $U_2 \downarrow$ | $U_1 \downarrow$ |
| б) | $U_2 \uparrow$ | $U_1 \downarrow$ |
| в) | $U_2 \uparrow$ | $U_1 \uparrow$ |
| г) | $U_2 =$ | $U_1 =$ |

2.7.14 Чему равно эквивалентное сопротивление электрической цепи, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 80$ Ом. Определите мощность источника энергии, если напряжение на зажимах цепи $U = 100$ В.

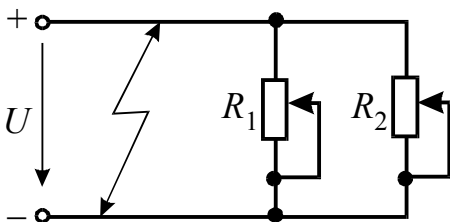


2.7.15 В цепи известны сопротивления R_1 , R_2 и R_3 , ЭДС источников равны E_1 , E_2 . Определить ток в цепи и режимы работы источников ЭДС.



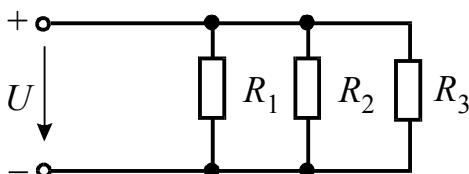
$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
45	15	3	5	7

2.7.15 Как изменится напряжение на сопротивлении нагрузки R_1 и R_2 при коротком замыкании ($U = \text{const}$)?



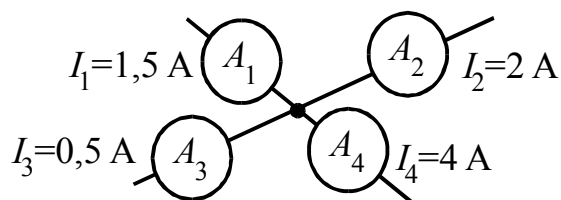
- а) значительно уменьшится
- б) незначительно уменьшится
- в) не изменится
- г) станет равным нулю

2.7.16 Напряжение источника энергии в цепи равно U , а мощность источника P , сопротивления R_1 и R_2 заданы в таблице. Определите величину сопротивления R_3 и токи во всех ветвях цепи.

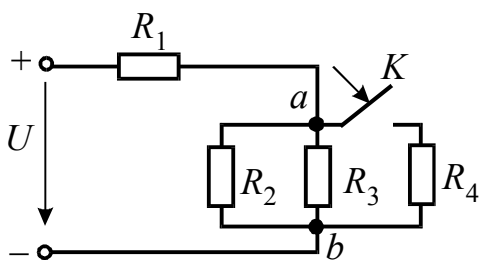


$U, \text{В}$	$P, \text{Вт}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$
6	72	1,5	3

2.7.17 Укажите направления токов в ветвях, если показания амперметров равны значениям на рисунке.

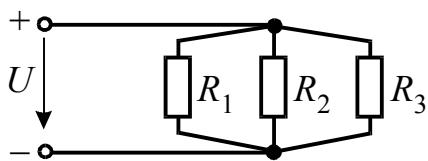


2.7.18 Как изменятся напряжения на участках цепи, если замкнуть ключ K ($U = \text{const}$)? Выберите строку с правильным ответом, поясните.



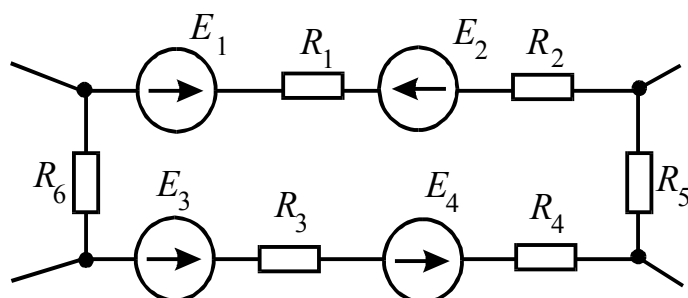
- а) $U_1 \downarrow$ $U_{ab} \uparrow$
 б) $U_1 \uparrow$ $U_{ab} \downarrow$
 в) $U_1 =$ $U_{ab} \uparrow$
 г) $U_1 =$ $U_{ab} \downarrow$

2.7.19 Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 указаны в таблице. Напряжение источника энергии равно U . Определить токи в ветвях цепи. Проверить выполнение баланса мощностей.

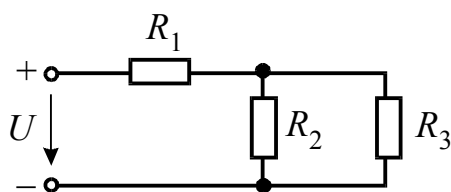


$U, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
30	3	5	15

2.7.20 Укажите направления токов в ветвях контура и составьте уравнение на основании второго закона Кирхгофа.



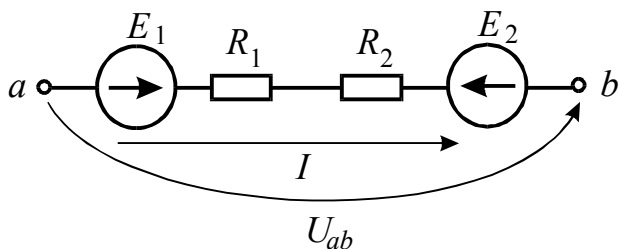
2.7.21 Сопротивления R_1 , и R_2 указаны в таблице. Напряжение источника U , мощность источника P . Определить сопротивление R_3 и токи в ветвях цепи.



Данные к задаче

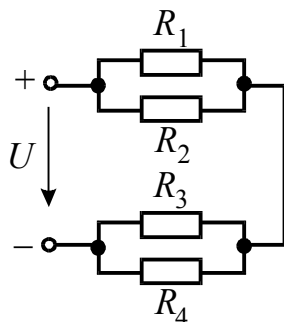
U , В	P , Вт	R_1 , Ом	R_2 , Ом
60	360	8	6

2.7.22 Определите величину тока в электрической цепи, если:

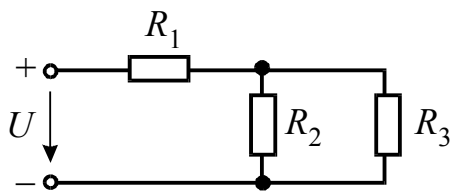


E_1 , В	30	R_1 , Ом	4
E_2 , В	20	R_2 , Ом	6
U_{ab} , В	20		

2.7.23 Определите число токов в данной цепи? Каково соотношение между ними?



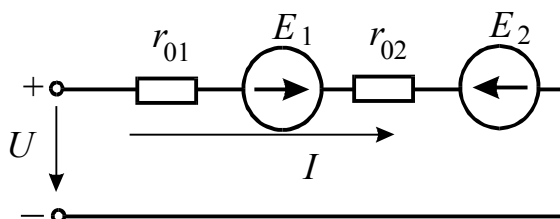
2.7.24 Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 заданы в таблице. Напряжение на зажимах цепи равно U . Определить токи в ветвях цепи и мощность источника.



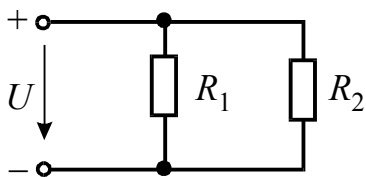
Данные к задаче

U , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом
80	5,6	6	4

2.7.25 Составьте уравнение на основании второго закона Кирхгофа для электрической цепи:

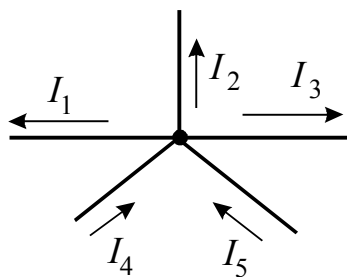


2.7.26 В цепи известны сопротивления R_1 и R_2 , а также мощность источника P . Определить токи в ветвях и напряжение на зажимах цепи.



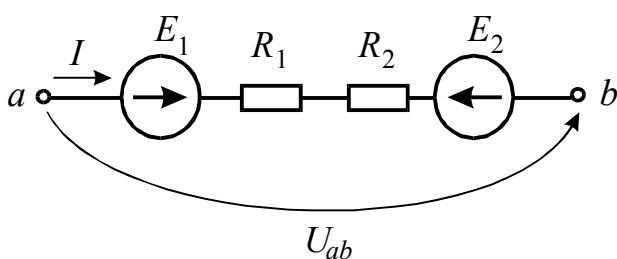
$P, \text{ Вт}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$
36	6	12

2.7.27 Какое из приведенных уравнений **не** соответствует рисунку?



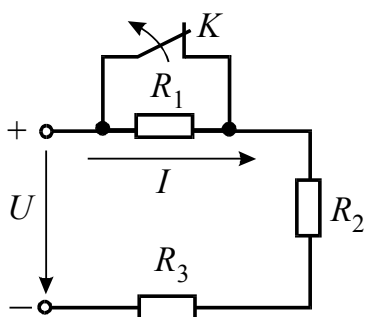
- а) $-I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$
 б) $I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$
 в) $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$
 г) $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0$

2.7.28 Определите величину тока в электрической цепи



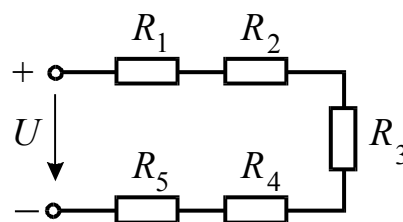
$E_1, \text{ В}$	$E_2, \text{ В}$	$U_{ab}, \text{ В}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$
20	10	30	3	7

2.7.29 Как изменятся напряжения на участках цепи, если разомкнуть ключ K ($U = \text{const}$)? Выберите строку с правильным ответом, поясните.

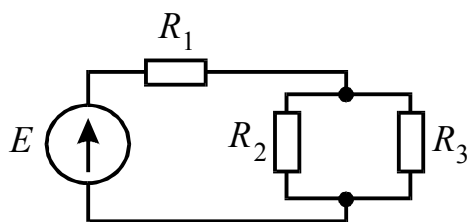


- а) $U_2 \uparrow$ $U_3 \uparrow$
 б) $U_2 \downarrow$ $U_3 \downarrow$
 в) $U_2 \uparrow$ $U_3 \downarrow$
 г) U_2 и U_3 не изменятся

2.7.30 Определите эквивалентное сопротивление электрической цепи, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 20 \text{ Ом}$. Вычислите мощность источника энергии, если его напряжение $U = 100 \text{ В}$.

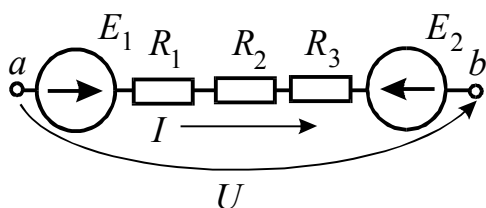


2.7.31 Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и ЭДС источника E приведены в таблице. Определите токи в ветвях цепи.



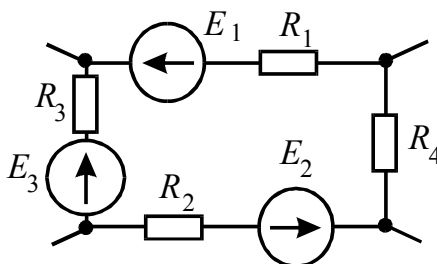
$E, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
90	8	6	3

2.7.32 Определите величину тока в электрической цепи, если:

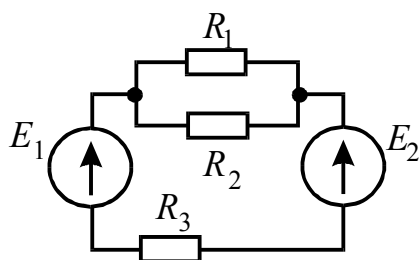


$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$U_{ab}, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
20	40	70	2	3	5

2.7.33 Укажите направления токов в ветвях контура и составьте уравнение на основании второго закона Кирхгофа.

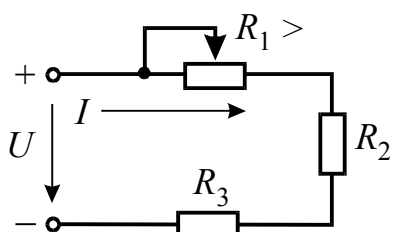


2.7.34 В цепи известны сопротивления R_1 , R_2 и R_3 , ЭДС источников равны E_1 , E_2 . Определить токи в ветвях цепи и режимы работы источников ЭДС.



$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
60	24	6	3	2

2.7.35 Как изменятся падения напряжения на резисторах R_1 , R_2 и R_3 при увеличении сопротивления R_1 ($U = \text{const}$)? Поясните Ваш ответ.

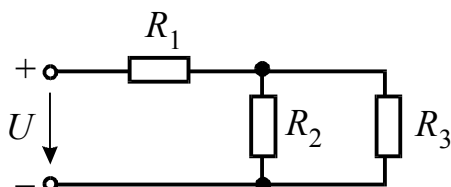


- а) $U_2 \uparrow$ $U_3 \uparrow$ $U_1 \downarrow$
 б) $U_2 \downarrow$ $U_3 \downarrow$ $U_1 \uparrow$

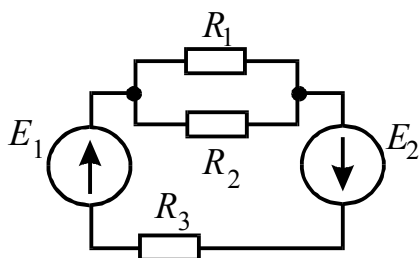
$$\text{в)} \quad U_2 = U_3 = U_1 \uparrow$$

$$\text{г)} \quad U_2 = U_3 = U_1 \downarrow$$

2.7.36 Определите эквивалентное сопротивление электрической цепи, если $R_1=30 \text{ Ом}$, $R_2 = R_3=40 \text{ Ом}$. Вычислите мощность источника энергии при напряжении на зажимах цепи $U=100 \text{ В}$.



2.7.37 В цепи известны сопротивления R_1 , R_2 и R_3 , ЭДС источников равны E_1 , E_2 . Определить токи в ветвях цепи и режимы работы источников ЭДС.



$E_1, \text{ В}$	$E_2, \text{ В}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$
90	36	3	6	7

3 Лабораторная работа: Нелинейные электрические цепи постоянного тока

Цель работы: Экспериментальное определение вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и опытная проверка графического метода расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.

3.1 Краткие теоретические и практические сведения

Электрическая цепь считается нелинейной, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент, т.е. такой элемент, который обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой. Параметры нелинейного элемента зависят от значений или направлений тока, напряжения, магнитного потока, электрического заряда.

Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) называется графическая зависимость $U = f(I)$ между напряжением U , подводимым к элементу электрической цепи, и током I , протекающим по нему.

Пассивные элементы электрической цепи делятся на линейные и нелинейные. Линейные элементы обладают сопротивлением $R = const$ и прямолинейной вольт-амперной характеристикой, рисунок 3.1,а, проходящей через начало координат и удовлетворяющей закону Ома

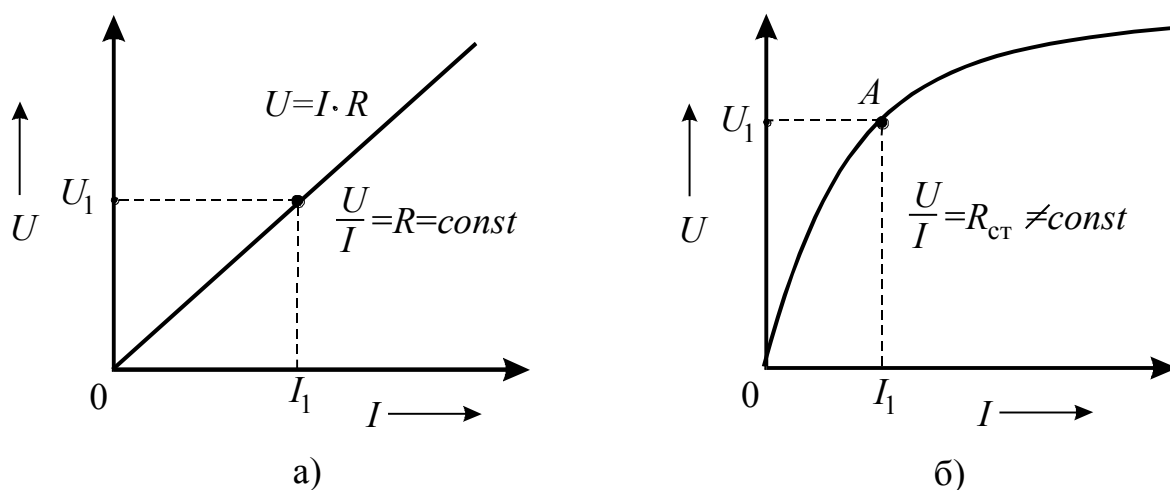


Рисунок 3.1 – Вольт-амперные характеристики линейного (а) и нелинейного (б) элементов

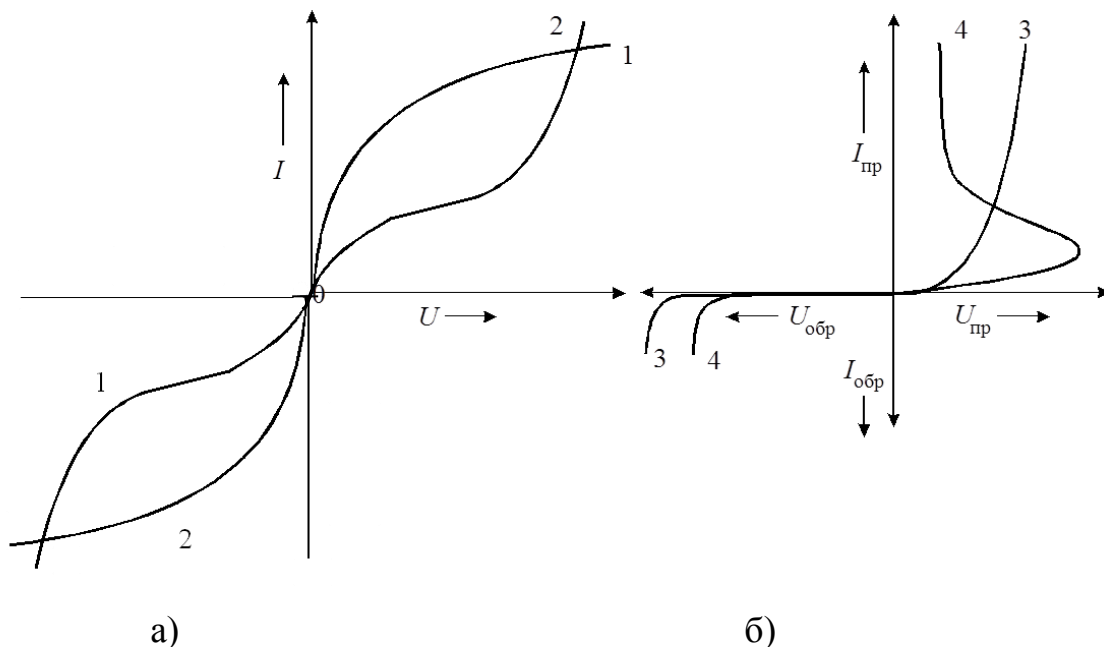
$$U = I \cdot R. \quad (3.1)$$

Нелинейные элементы обладают сопротивлением $R \neq const$ и криволинейной вольт-амперной характеристикой (рисунок 3.1,б).

Нелинейные элементы широко используются в электронных устройствах, в измерительной аппаратуре, вычислительной технике устройствах и пр. К ним относятся катушки с ферромагнитными магнитопроводами, лампы накаливания, электрическая дуга, полупроводниковые приборы и др.

Для описания свойств нелинейного элемента служит вольт-амперная характеристика, которая может быть задана в виде графической зависимости, табличным образом или приближенным аналитическим выражением.

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов разделяются на *симметричные* и *несимметричные*. Симметричными называются такие ВАХ нелинейных элементов, которые удовлетворяют условию $f(x) = -f(-x)$. Несимметричными ВАХ нелинейных элементов называются такие, для которых $f(x) \neq -f(-x)$, рисунок 3.2.



- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 – лампа накаливания; | 3 – полупроводниковый диод; |
| 2 – термосопротивление; | 4 – тиристор. |

Рисунок 3.2 – Вольт-амперные характеристики симметричных (а) и несимметричных (б) нелинейных элементов

Симметричными ВАХ обладают лампы накаливания, термосопротивления, бареттеры и др. Несимметричным ВАХ обладают полупроводниковые диоды, тиристоры, транзисторы, электрическая дуга с разнородными электродами, газотрон и др.

Нелинейные элементы могут быть подразделены на *управляемые* и *неуправляемые*. В управляемых нелинейных элементах, кроме основной цепи есть еще, по крайней мере, одна управляющая цепь, воздействуя на которую можно изменять вольт-амперную характеристику элемента. В неуправляемых нелинейных элементах вольт-амперная характеристика изображается одной кривой, а в управляемых – семейством кривых.

К неуправляемым нелинейным элементам относятся лампа накаливания, термосопротивление, стабилитрон, диод и др. К управляемым нелинейным элементам - тиристоры, транзисторы, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы и др.

Каждая точка ВАХ нелинейного элемента определяет его параметр, который изменяется при переходе от одной точки характеристики к другой. Различают два вида сопротивлений нелинейного элемента: статическое и дифференциальное.

Статическое сопротивление нелинейного элемента равно отношению напряжения на нелинейном элементе к протекающему по нему току

$$R_{\text{ст}} = \frac{U}{I}. \quad (3.2)$$

Статическое сопротивление пропорционально тангенсу угла β наклона прямой, проведенной через начало координат и рабочую точку А на вольт-амперной характеристике (рисунок 3.3). Статическое сопротивление изменяется при переходе от одной рабочей точки к другой.

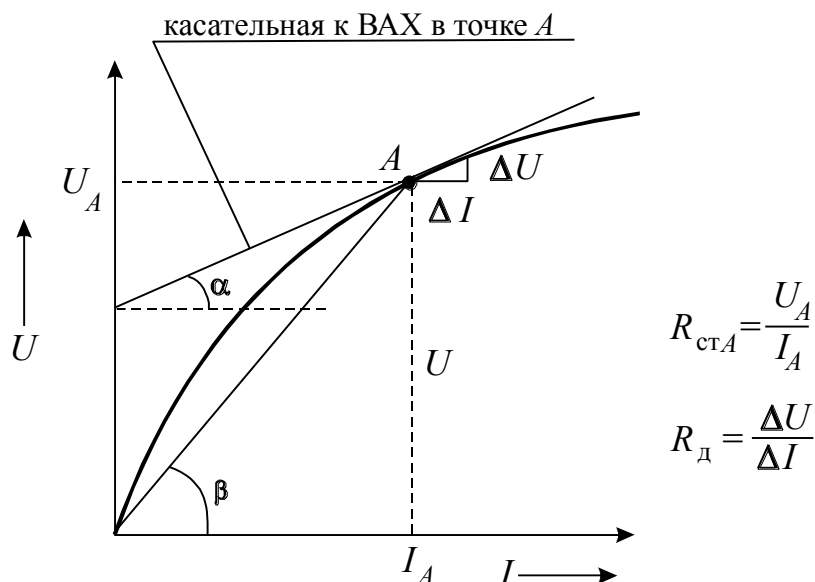


Рисунок 3.3 – Определение статического и дифференциального сопротивлений нелинейного элемента по его вольт-амперной характеристике

Под *дифференциальным сопротивлением* принято понимать отношение малого приращения напряжения ΔU нелинейного элемента к соответствующему приращению тока ΔI , вблизи рабочей точки A .

$$R_{\text{д}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (3.3)$$

Дифференциальное сопротивление пропорционально тангенсу угла α наклона касательной к вольт-амперной характеристике в рабочей точке A (рисунок 3.3) и характеризует поведение нелинейного элемента при малых отклонениях от предшествующего состояния.

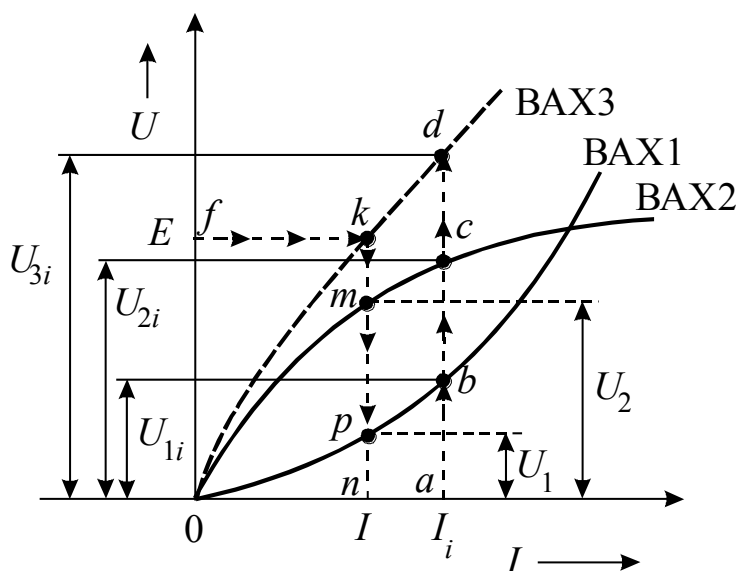
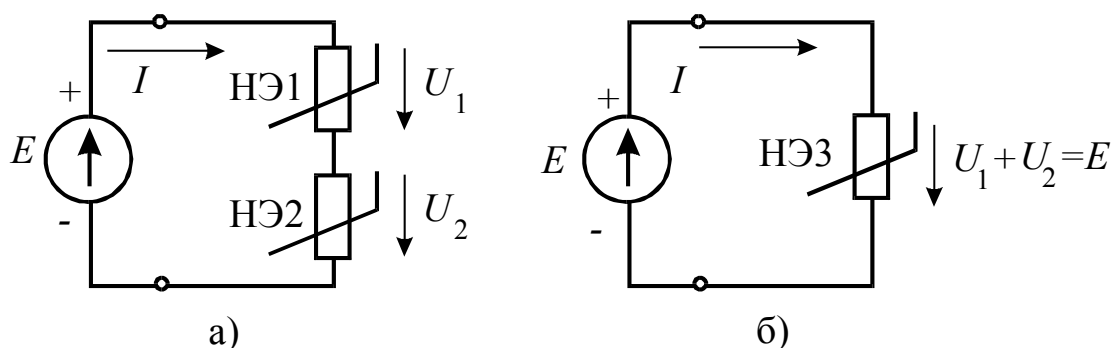
Нелинейные резистивные элементы могут быть подразделены на *инерционные* и *безынерционные*. В инерционных (термисторах, лампах накаливаниях, бареттерах) нелинейность ВАХ обусловлена изменением температуры в результате протекания тока через элемент. Вольт-амперная характеристика инерционных элементов для мгновенных значений токов и напряжений близка к прямой, а для действующих значений нелинейна. Безынерционные элементы обладают ВАХ, нелинейность которой обусловлена

не тепловым процессом.

Простые нелинейные схемы постоянного тока рассчитывают графическим способом. Вольт-амперные характеристики всех элементов цепи должны быть известны.

3.1.1 Расчет цепи с последовательным соединением нелинейных элементов

По заданным вольт-амперным характеристикам нелинейных элементов и величине напряжения источника ЭДС определим ток в цепи и напряжения U_1 и U_2 на каждом нелинейном элементе, рисунок 3.4.



в)

Рисунок 3.4 – Исходная и преобразованная схемы электрической цепи с последовательным соединением нелинейных элементов (а, б) и графический расчет (в)

Графический метод расчета при последовательном соединении основан на том, что ток через все элементы протекает один и тот же.

Произвольно задаваясь значением тока I_i , проводят прямую, параллельную оси напряжений и определяют значения напряжений на первом нелинейном элементе (НЭ) (отрезок ab) и втором НЭ (отрезок ac). Складывая отрезки ab и ac (напряжения U_{1i} , U_{2i}), получают результирующий отрезок ad $U_{3i} = U_{1i} + U_{2i}$. Определяют положение точки d , которая принадлежит третьей (суммарной) вольт-амперной характеристике.

Задаваясь другими значениями тока I_i , аналогично находят следующие точки. Плавное соединяя точки, строят график суммарной ВАХ-3.

Значение тока в цепи определяем на ВАХ-3 по величине ЭДС – E . Отложив E по оси напряжений, получают точку f , через которую проводят прямую, параллельную оси тока до пересечения с ВАХ-3 (точка k). Отрезок fk определяет значение искомого тока I . Прямая nk , параллельная оси напряжений, отсечет на ВАХ-1 и ВАХ-2 значения напряжений на каждом элементе (отрезки pr и mt).

3.1.2 Расчет цепи с параллельным соединением нелинейных элементов

При построении суммарной ВАХ цепи (рисунок 3.5) исходят из того, что напряжения на НЭ1 и НЭ2 при параллельном соединении равны, а ток I в неразветвленной части электрической цепи на основании первого закона Кирхгофа равен сумме токов I_1 и I_2

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.4)$$

Задаемся произвольно значением напряжения U_i (отрезок oa) и проводим через точку a прямую, параллельную оси тока и получаем точки пересечения с ВАХ-1 (точка b) и ВАХ-2 (точка c). Отрезки ab и ac соответствуют токам I_{1i} и I_{2i} . Складывая эти отрезки, получают точку d , которая принадлежит суммарной ВАХ-3. Аналогично определяются и другие

точки ВАХ-3. При известной величине ЭДС E находят ток I в неразветвленной части цепи по ВАХ-3, а токи в НЭ1 и НЭ2 – по ВАХ-1 и ВАХ-2.

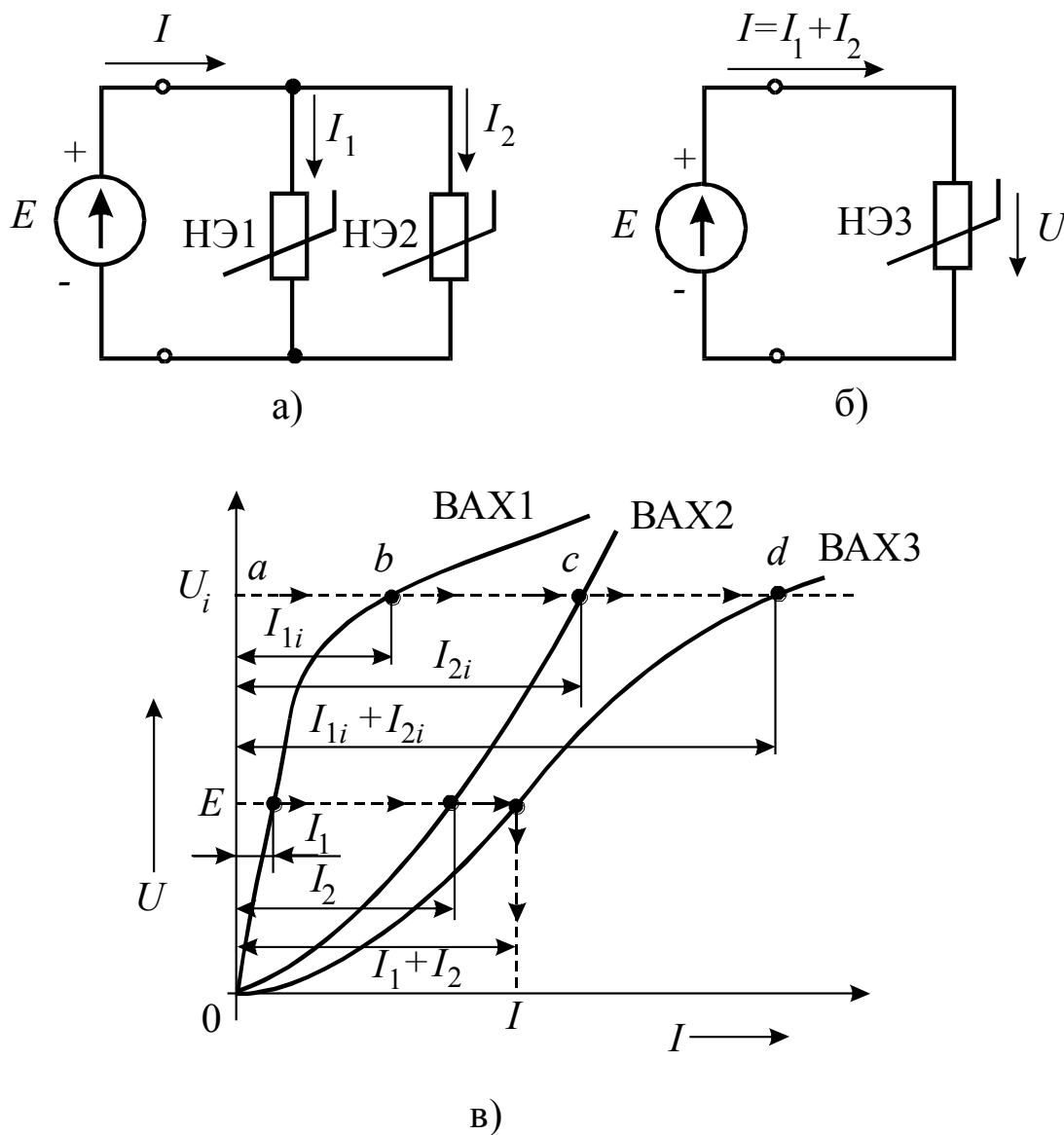


Рисунок 3.5 – Исходная и преобразованная схемы электрической цепи с параллельным соединением нелинейных элементов (а, б) и графический расчет (в)

3.2 Описание лабораторной установки

В качестве источника энергии используется регулируемый источник постоянного тока (РИПТ) напряжением до 15 В. В качестве нагрузки используются два нелинейных сопротивления НЭ1 и НЭ2 (рисунок 3.6). Для

измерения токов применяется миллиамперметр М42300 с пределом измерения до 100 мА. Напряжение на элементах цепи измеряется цифровым мультиметром ВР-11А.

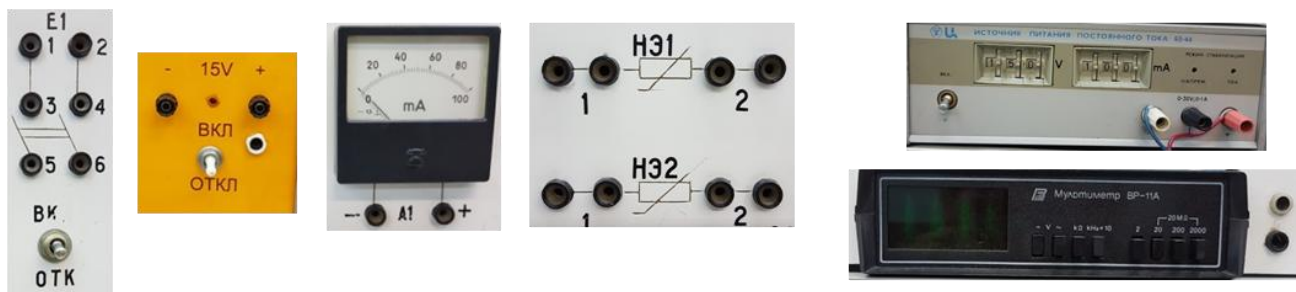


Рисунок 3.6 – Элементы и измерительные приборы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

3.3 Подготовка к работе

3.3.1 Повторить раздел курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в котором рассматриваются нелинейные элементы, их классификация и характеристики, методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.

3.3.2 Подготовить бланк отчета лабораторной работы, в котором привести электрическую схему испытаний с указанием используемых приборов, таблицу для записей результатов опытов и расчетов.

3.3.3 Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3.4 Рабочее задание

3.4.1 Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 3.7, для снятия вольт-амперных характеристик исследуемых нелинейных элементов.

3.4.2 Подключите к зажимам $a-b$ первый нелинейный элемент НЭ1 и после проверки электрической цепи преподавателем включите питание переключателем П1. Плавно изменяя напряжение с помощью переключателей на источнике, снимите 7 значений тока и напряжения на НЭ1. Максимальное значение подаваемого напряжения определяется положением стрелки миллиамперметра. При приближении стрелки к концу шкалы миллиамперметра

опыт заканчивают. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1. Отключите питание переключателем П1.

3.4.3 Замените первый нелинейный элемент НЭ1 на второй нелинейный элемент НЭ2 и повторите опыт. Результаты измерений занести в таблицу 3.1. Отключите питание переключателем П1.

3.4.4 Соедините последовательно нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2. Подключите к зажимам $a-b$. После проверки цепи преподавателем включите питание переключателем П1. Плавно изменяя напряжение с помощью переключателей на источнике, снимите 7 значений тока и напряжения на последовательном соединении нелинейных элементов. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1. Отключите питание переключателем П1.

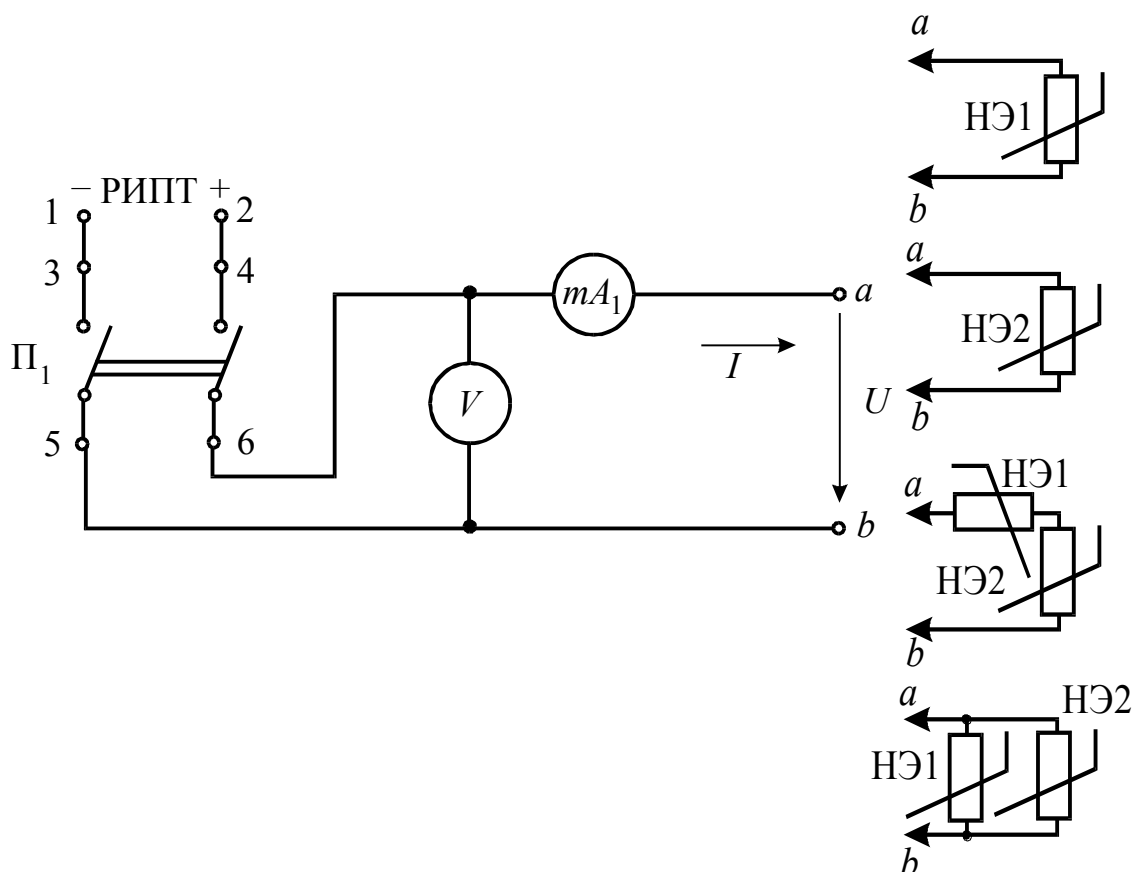


Рисунок 3.7 – Электрическая схема опыта

3.4.5 Соедините параллельно нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2. Подключите к зажимам $a-b$. После проверки цепи преподавателем включите питание переключателем П1. Плавно изменяя напряжение с помощью переключателей на источнике, снимите 7 значений тока и напряжения на

параллельном соединении нелинейных элементов. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1. Отключите питание переключателем П1.

3.5 Обработка результатов опытов

3.5.1 Рассчитайте статические сопротивления нелинейных элементов по данным опытов для каждого измерения. Результаты расчетов занесите в таблицу 3.1.

3.5.2 На основании данных таблицы 3.1 постройте на одной координатной плоскости графики вольт-амперных характеристик НЭ1 и НЭ2, эквивалентные вольт-амперные характеристики последовательного и параллельного соединений нелинейных элементов.

Таблица 3.1 – Результаты измерений и вычислений опытов

НЭ1	U , В							
	I , мА							
	$R_{ст}$, Ом							
НЭ2	U , В							
	I , мА							
	$R_{ст}$, Ом							
Неразветвленная цепь с НЭ1 и НЭ2	U , В							
	I , мА							
	$R_{ст}$, Ом							
Разветвленная цепь с НЭ1 и НЭ2	U , В							
	I , мА							
	$R_{ст}$, Ом							

3.5.3 Используя графический метод расчета, проверьте правильность выполнения законов Кирхгофа в нелинейных цепях. Для этого на основании ВАХ первого и второго нелинейных элементов получите точки суммарных

ВАХ при последовательном и параллельном соединениях и нанесите их на координатную плоскость. Сравните положение точек с экспериментальными кривыми при соответствующем соединении.

3.6 Содержание отчета

3.6.1 Цель работы.

3.6.2 Электрическая схема опытов, изображенная на рисунке 3.7.

3.6.3 Таблица опытных и расчетных данных.

3.6.4 Графики вольт-амперных характеристик, построенные на одной координатной плоскости.

3.6.5 Выводы по работе.

3.7 Контрольные вопросы

3.7.1 Дайте определение вольт-амперной характеристики. Какие сопротивления называют линейными и какие - нелинейными?

3.7.2 Какие нелинейные элементы называют несимметричными? Приведите примеры таких нелинейных элементов.

3.7.3 Какие нелинейные элементы называют симметричными? Приведите примеры таких нелинейных элементов.

3.7.4 Что такое статическое сопротивление? Как его определить?

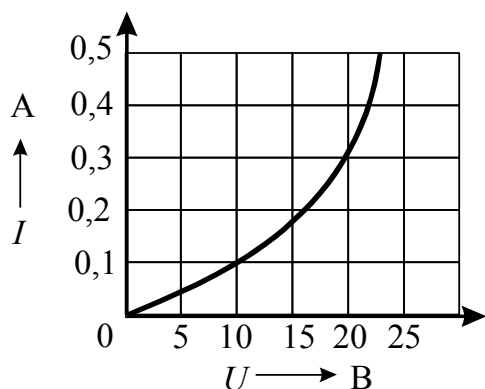
3.7.5 Что такое дифференциальное сопротивление? Как его определить?

3.7.6 Какие нелинейные сопротивления называются управляемыми, а какие – неуправляемыми?

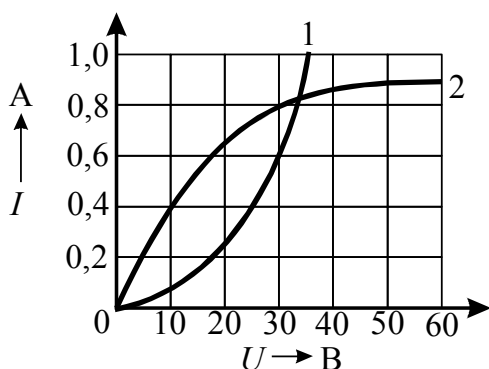
3.7.7 Какие нелинейные сопротивления называются инерционными, а какие – безынерционными?

3.7.8 Каков порядок расчёта нелинейной цепи постоянного тока с одним источником при последовательном соединении нелинейных элементов?

3.7.9 Каков порядок расчёта нелинейной цепи постоянного тока с одним источником при параллельном соединении нелинейных элементов?



20 В. Приведите схему данной цепи.

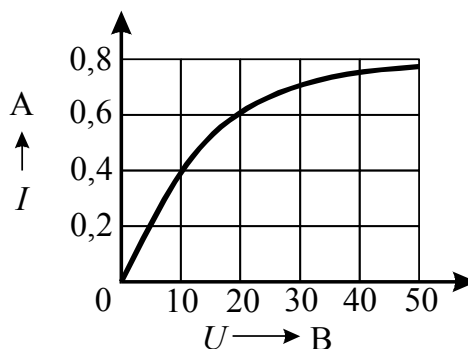
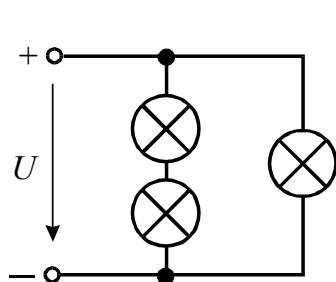


25 В. Чему равно напряжение на входе цепи? Приведите схему данной цепи.

3.7.12 По результатам первого опыта для рабочей точки на вольт-амперной характеристике первого нелинейного элемента ($U=5$ В), определить его дифференциальное сопротивление.

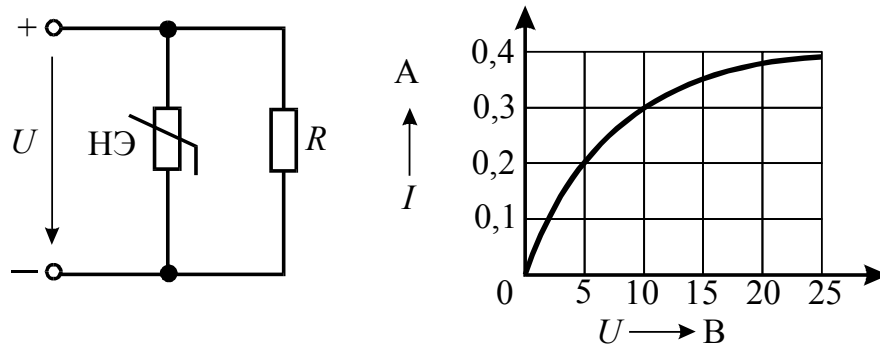
3.7.13 Зависит ли статическое сопротивление несимметричного нелинейного элемента от направления тока в нем? Объясните ответ.

3.7.14 Три лампы с одинаковыми вольтамперными характеристиками соединены по смешанной схеме. Определить напряжение на входе цепи, если ток в первой ветви равен 0,4 А. Вольт-амперная характеристика лампы приведена на графике.

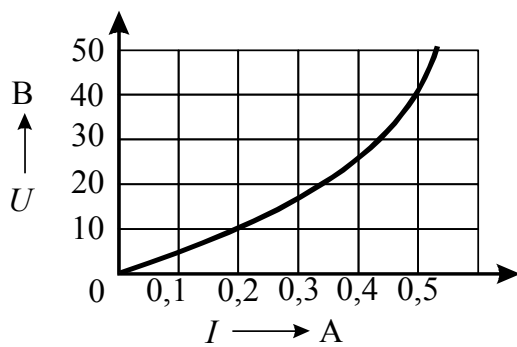
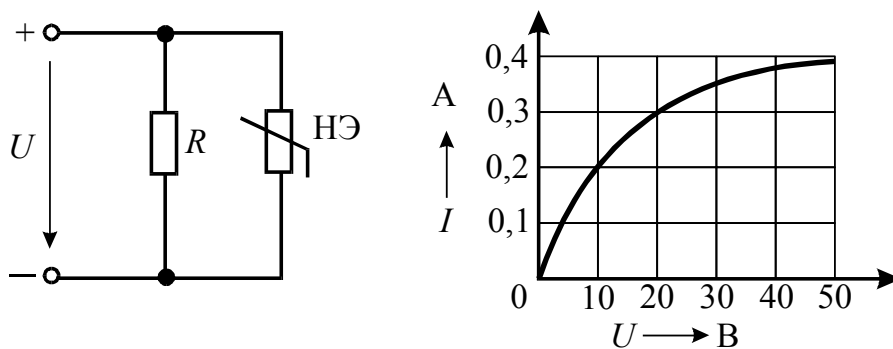


3.7.15 Нелинейный элемент НЭ (ВАХ представлена на рисунке) и

линейный резистор R соединены параллельно. Определить величину R , если токи через нелинейный элемент и в неразветвленной части цепи равны 0,3 А и 0,5 А соответственно.

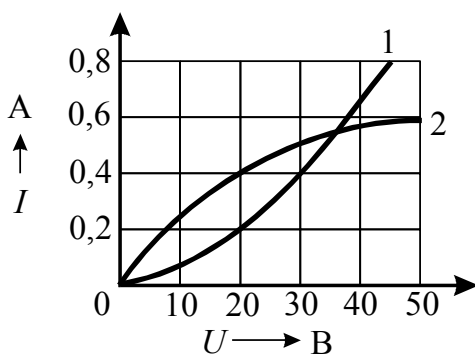


3.7.16 Линейный резистивный элемент $R=40$ Ом и нелинейный элемент, вольт-амперная характеристика которого приведена на графике, соединены параллельно. Ток в нелинейном элементе равен 0,3 А. Чему равен ток в линейном сопротивлении?



3.7.17 Два одинаковых нелинейных элемента, вольт-амперная характеристика которых изображена на графике, соединены параллельно. Определить ток в неразветвленной части цепи, если напряжение

источника равно 40 В. Приведите схему данной цепи.

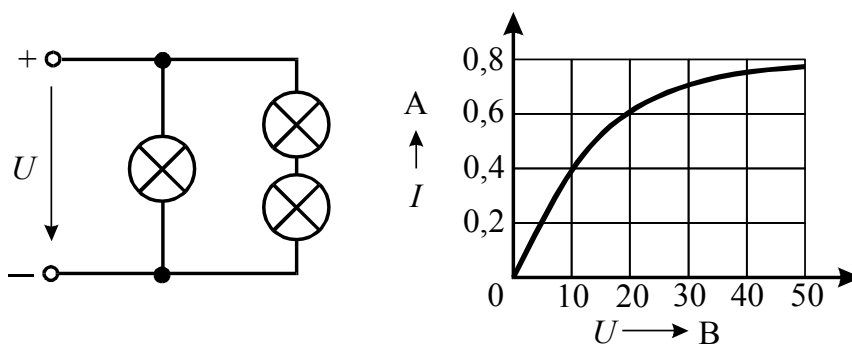


3.7.18 Два нелинейных элемента, вольтамперные характеристики которых изображены на графике, соединены последовательно. Ток в цепи равен 0,4 А.

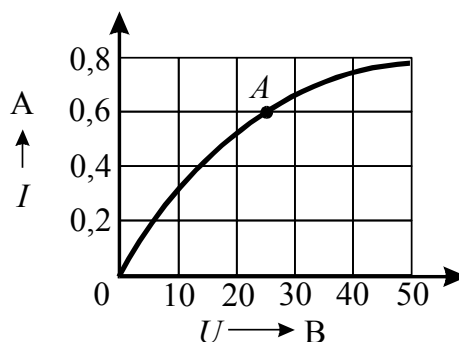
Определить напряжение на зажимах цепи. Привести схему данной электрической цепи.

3.7.19 По результатам второго опыта для рабочей точки на вольт-амперной характеристике второго нелинейного элемента ($U=5$ В) определить его статическое сопротивление.

3.7.20 Три лампы с одинаковыми вольт-амперными характеристиками соединены по смешанной схеме. Определить ток в неразветвленной части цепи, если напряжение на входе цепи равно 20 В. Вольт-амперная характеристика лампы приведена на графике.



3.7.21 На графике представлена вольт-амперная характеристика нелинейного элемента. Определить дифференциальное сопротивление НЭ в точке A .



4 Лабораторная работа: Неразветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями

Цель работы. Экспериментально определить параметры пассивных приемников в цепях синусоидального тока. Освоить построение векторных диаграмм тока и напряжений, треугольников сопротивлений и мощностей для исследуемых цепей.

4.1 Краткие теоретические и практические сведения

Основными величинами, характеризующими синусоидальный ток, напряжение и ЭДС являются:

- мгновенное значение: i, u, e ;
- амплитудное значение: I_m, U_m, E_m ;
- начальная фаза: ψ_i, ψ_u, ψ_e ;
- действующее значение: I, U, E ;
- среднее значение: I_{cp}, U_{cp}, E_{cp} ;
- комплекс амплитудного значения: $\dot{I}_m, \dot{U}_m, \dot{E}_m$;
- комплекс действующего значения: $\dot{I}, \dot{U}, \dot{E}$.

Мгновенные значения тока i , напряжения u или ЭДС e записываются в виде:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (4.1)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.2)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \quad (4.3)$$

Угловая частота ω связана с периодом T и частотой $f=1/T$ формулами:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ или } \omega = 2\pi f, \quad (4.4)$$

Частота f , равная числу колебаний в 1 секунду, измеряется в Герцах (Гц). При $f=50$ Гц имеем $\omega=314$ рад/с.

4.1.1 Цепь с активным сопротивлением

Рассмотрим цепь синусоидального тока, содержащую резистор и источник синусоидального напряжения u (рисунок 4.1,а). свойства резистивного элемента уже были рассмотрены в пункте 1.1. Приложенное напряжение изменяется по синусоидальному закону

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (4.5)$$

ток в цепи будет определяться значением этого сопротивления:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t, \quad (4.6)$$

где $I_m = U_m / R$ – амплитуда тока.

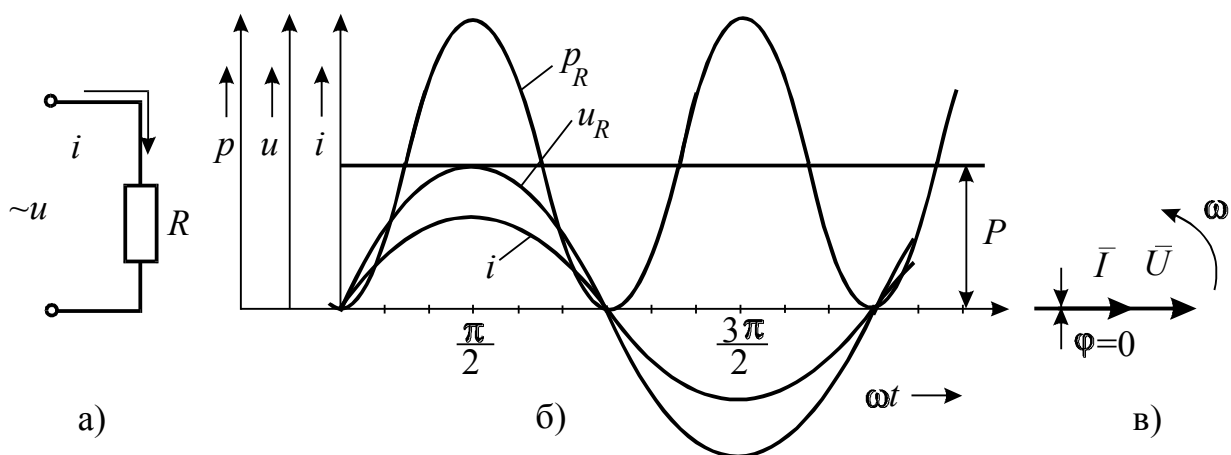


Рисунок 4.1 – Схема (а), временная (б) и векторная (в) диаграммы цепи с активным сопротивлением

Из выражений (4.5) и (4.6) следует, что **в цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе**. Оба эти параметра можно изобразить на временной (рисунок 4.1,б) и векторной (рисунок 4.1,в) диаграммах.

Учитывая, что $I_m = I \cdot \sqrt{2}$, $U_m = U \cdot \sqrt{2}$, можно записать выражение

$$I = \frac{U}{R}, \quad (4.7)$$

которое называют законом Ома для цепи с активным сопротивлением.

Скорость преобразования электрической энергии в другие виды энергии характеризуется мгновенной мощностью p :

$$p_R = ui = U_m \cdot I_m \cdot \sin^2 \omega t = UI - UI \cos 2\omega t, \quad (4.8)$$

где UI – постоянная составляющая.

«График изменения мгновенной мощности p_R для цепи с R -элементом показан на рисунке 4.1,б. В любой момент времени направления тока и напряжения совпадают, следовательно, мгновенная мощность положительна и изменяется с угловой частотой 2ω в пределах от 0 до $2UI$, т.е. R -элемент потребляет электрическую энергию от источника и необратимо преобразует ее в другие виды энергии.

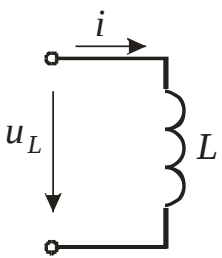
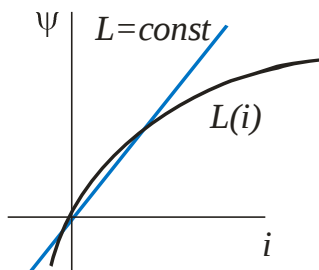
Кроме мгновенного значения мощности p_R различают еще среднюю мощность P_{cp} за период, которую называют активной мощностью и обозначают буквой P :

$$P_{cp} = P = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt = U_R I = I^2 R. \quad (4.9)$$

Активная мощность характеризует работу, совершаемую в электрической цепи за период, т.е. определяет электрическую энергию, необратимо преобразовавшуюся в другие виды энергии. Единицей измерения активной мощности является ватт (Вт).» [6]

4.1.2 Цепь с индуктивностью

Таблица 4.1 – Идеализированный индуктивный элемент

Элемент схемы: обозначение, параметр	Характеристика, определение	Основные уравнения
<i>Индуктивный</i>  L - индуктивность [Гн]	Вебер-амперная характеристика:  Идеализированный элемент, в котором происходит только накопление энергии магнитного поля. Элемент характеризуется зависимостью $\psi = f(i)$. Здесь ψ - потокосцепление, [Вб], физическая величина, представляющая собой суммарный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки индуктивности.	Закон Ома: $u_L = -e = L \cdot \frac{di}{dt};$ Мощность: $p_L = u \cdot i = L \cdot \frac{di}{dt} \cdot i;$ Энергия: $W_L = \int_0^t p_L dt = \frac{L \cdot i^2}{2}$

Пусть по катушке индуктивности L , для которой $R=0$, (рисунок 4.2,а), протекает ток

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (4.10)$$

Он создает магнитное поле и катушка будет пронизываться переменным магнитным потоком. Так как ток изменяется во времени, то по закону электромагнитной индукции в катушке наводится ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (4.11)$$

Приложенное к зажимам цепи напряжение уравнивает ЭДС

самоиндукции

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.12)$$

где

$$U_m = \omega L I_m, \quad (4.13)$$

называется амплитудой напряжения.

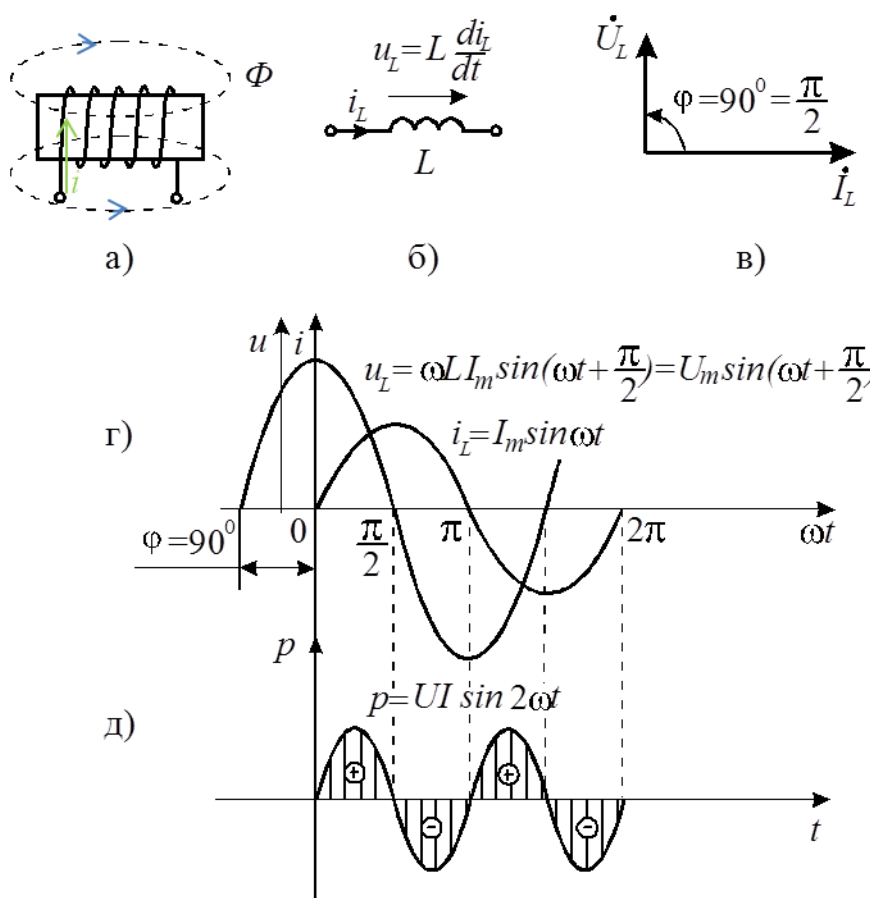


Рисунок 4.2 - Индуктивный элемент:

- а) схема конструкции катушки индуктивности;
- б) изображение ИЭ на схеме;
- в) векторы тока и напряжения;
- г) графики тока и напряжения;
- д) график мгновенной мощности.

Таким образом, в цепи с индуктивностью напряжение по фазе опережает ток на угол $\pi/2$, рисунок 4.2, в.

Действующее значение напряжения получим, разделив на $\sqrt{2}$, выражение (4.13):

$$U = \omega L \cdot I = X_L \cdot I, \quad (4.14)$$

где $X_L = \omega L$ - индуктивное сопротивление.

Выражение (4.14) называют законом Ома для цепи с индуктивностью.

Мгновенная мощность индуктивного элемента

$$p_L = ui = U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t, \quad (4.15)$$

изменяется по закону синуса с удвоенной частотой. График мгновенной мощности цепи с индуктивным элементом показан на рисунке 4.2,д.

«В первую четверть периода направления напряжения и тока совпадают и $p_L > 0$, т.е. индуктивный элемент потребляет электрическую энергию от источника. Во вторую четверть периода направления напряжения и тока противоположны и $p_L < 0$, т.е. индуктивный элемент является источником и высвобождает энергию, запасенную в магнитном поле.

Активная мощность P , характеризующая необратимые преобразования энергии и определяемая средним значением мгновенной мощности за период, для индуктивного элемента равна нулю:

$$P_{cp} = P = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t \, dt = 0. \quad (4.16)$$

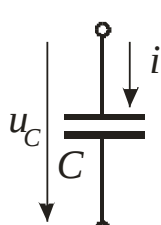
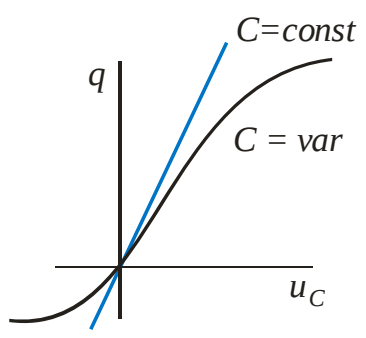
Таким образом, в цепи с идеальным индуктивным элементом не совершается работа, а происходит только периодический обмен энергией между источником и магнитным полем. Интенсивность этого обмена принято характеризовать наибольшим значением скорости поступления энергии в магнитное поле, которое называется *реактивной мощностью*,

$$Q_L = U_L I = X_L I^2, \text{ вар.} \quad (4.17)$$

Реактивная мощность имеет размерность вольт-ампер реактивный, сокращенно – *ВАр*.»[6]

4.1.3 Цепь с емкостью

Таблица 4.2 – Идеализированный емкостной элемент

Элемент схемы: обозначение, параметр	Характеристика, определение	Основные уравнения
<i>Емкостной</i>  $C = \frac{q}{u}$ - емкость [Ф]	Кулон-вольтная характеристика:  Идеализированный элемент цепи, в котором происходит только накопление энергии электрического поля. Элемент характеризуется зависимостью $q = f(u)$ или $u = \varphi(q)$.	Закон Ома: $i_C = C \frac{du_C}{dt} \text{ или } u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i dt ;$ Мощность: $p_C = u \cdot i = u \cdot C \cdot \frac{du}{dt} ;$ Энергия: $W = \int_0^t p_C \cdot dt = \frac{C \cdot u^2}{2}$

Рассмотрим цепь синусоидального тока с емкостью C и источником синусоидального напряжения u (рисунок 4.3,б)

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (4.18)$$

мгновенное значение тока в этой цепи

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (4.19)$$

Амплитуды тока и напряжения прямопропорциональны:

$$I_m = \omega C U_m. \quad (4.20)$$

Из (4.19) следует, что **ток в цепи с емкостью опережает приложенное напряжение на угол $\pi/2$** , рисунок 4.3,в.

Действующее значение тока получим, разделив на $\sqrt{2}$ выражение (4.20):

$$I = \omega C U \quad \text{или} \quad U = I \frac{1}{\omega C} = I X_C, \quad (4.21)$$

где $X_C = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление.

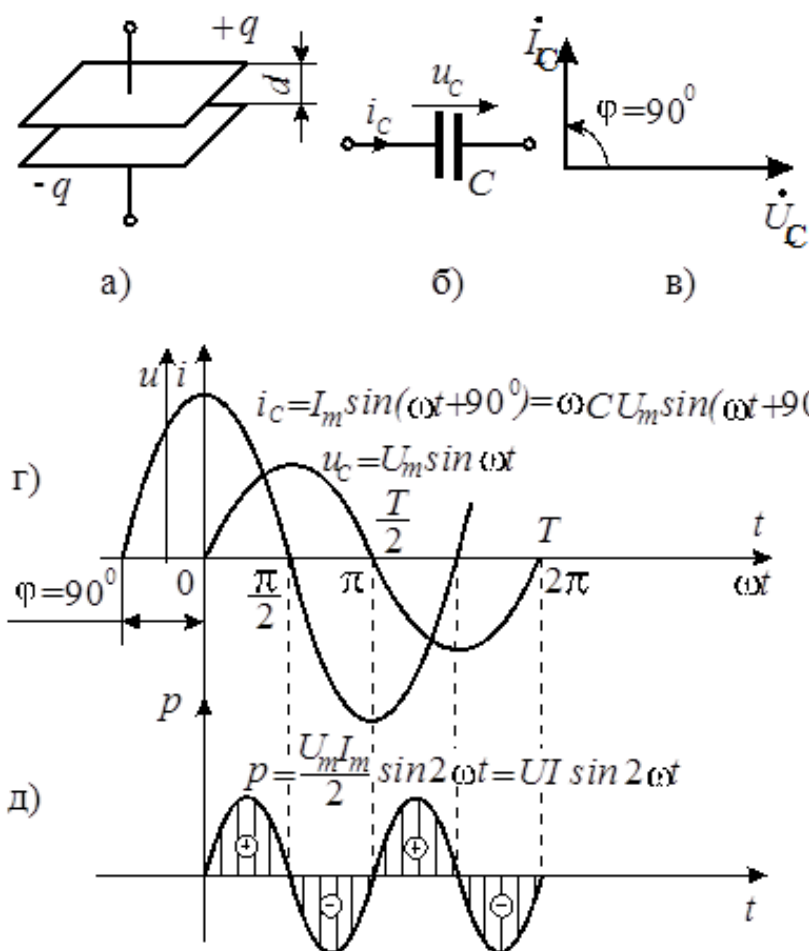


Рисунок 4.3 – Емкостный элемент:

- а) схема конструкции плоского конденсатора;
- б) изображение емкостного элемента на схеме;
- в) векторы тока и напряжения на емкостном элементе;
- г) графики мгновенных значений тока и напряжения;
- д) график мгновенной мощности.

Перейдем к анализу энергетических процессов в цепи с емкостным элементом. Мгновенная мощность емкостного элемента:

$$p_C = ui = U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t, \quad (4.22)$$

изменяется по закону синуса с удвоенной частотой.

«График мгновенной мощности приведен на рисунке 4.3,д. В первую четверть периода направления напряжения и тока совпадают и $p_C > 0$, т.е. емкостной элемент потребляет энергию от источника, которая запасается в электрическом поле. Во вторую четверть периода направления напряжения и тока противоположны, $p_C < 0$, т.е. емкостной элемент является источником и отдает запасенную в электрическом поле энергию.

Активная мощность, характеризующая необратимые процессы преобразования энергии и определяемая средним значением мгновенной мощности за период, для емкостного элемента равна нулю:

$$P_{cp} = P = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0. \quad (4.23)$$

Таким образом, в цепи с идеальным емкостным элементом не совершается работа, а происходит только периодический обмен энергией между источником и электрическим полем. Интенсивность этого обмена принято характеризовать наибольшим значением скорости поступления энергии в электрическое поле, которое называют реактивной мощностью и обозначают Q_C ,

$$Q_C = U_C I = X_C I^2, \text{ ВАр}. \quad (4.24)$$

Реактивная мощность емкостного элемента, так же как и реактивная мощность индуктивного элемента, измеряется в вольт-амперах реактивных.»[6]

4.1.4 Цепь с активно-индуктивной нагрузкой

Реальная катушка индуктивности обладает двумя параметрами индуктивностью - L и активным сопротивлением провода витков катушки R (рисунок 4.4,а).

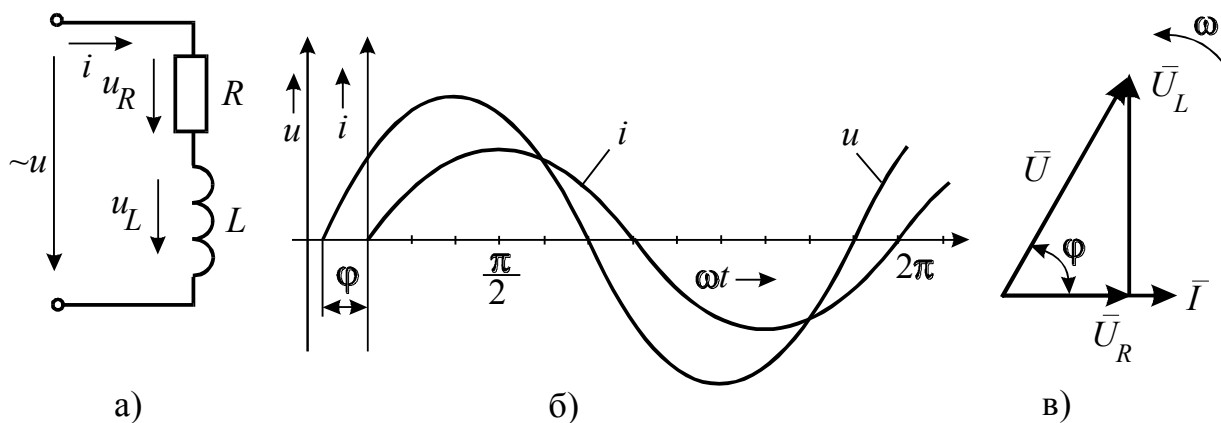


Рисунок 4.4 – Схема (а), временная (б) и векторная (в) диаграммы цепи с активным сопротивлением и индуктивностью

Запишем для схемы, изображенной на рисунке 4.4,а, уравнение на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$u = u_R + u_L. \quad (4.25)$$

Если величина тока изменяется по синусоидальному закону

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (4.26)$$

и сопротивления участков цепи R и X_L , получим:

$$I_m R \sin \omega t + I_m X_L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin (\omega t + \varphi), \quad (4.27)$$

где

$$U_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L)^2} = I_m \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (4.28)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_m X_L}{I_m R} = \frac{X_L}{R}. \quad (4.29)$$

Следовательно, **напряжение на входе цепи R, L опережает по фазе ток на угол φ** . Временная и векторная диаграммы изображены на рисунке 4.4,б и 4.4,в.

Закон Ома для электрической цепи, изображенной на рисунке 4.4,а

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{Z}, \quad (4.30)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – полное сопротивление цепи.

Треугольник сопротивлений изображен на рисунке 4.5,б и подобен треугольнику напряжений, рисунок 4.4, в.

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}. \quad (4.31)$$

Если все стороны треугольника сопротивлений умножить на квадрат тока, то получим треугольник мощностей (рисунок 4.5,в) со сторонами:

$$P = U_R I = I^2 R \text{ – активная мощность, Вт;}$$

$$Q = U_L I = I^2 X_L \text{ – реактивная мощность, ВАр;}$$

$$S = UI = I^2 Z \text{ – полная мощность, ВА;}$$

$$\cos \varphi = P/S \text{ – коэффициент мощности.}$$

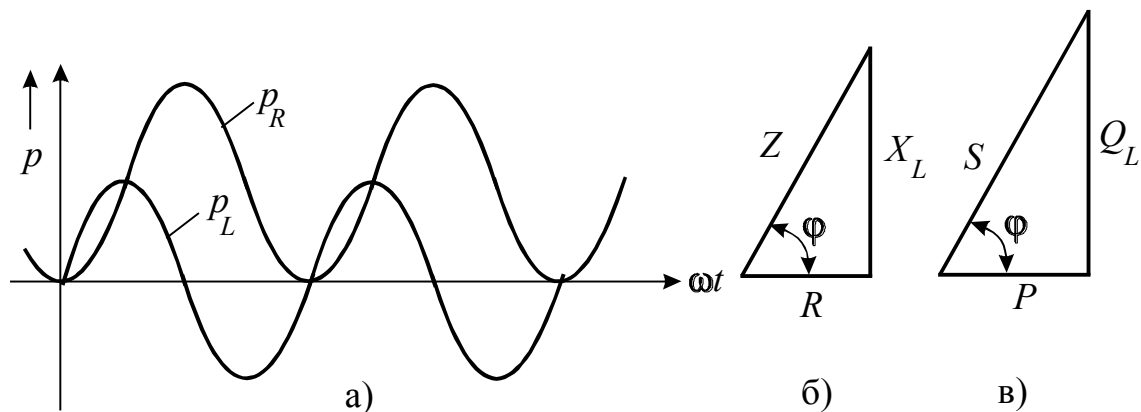


Рисунок 4.5 – Временная диаграмма (а) мгновенных значений активной p_R и индуктивной p_L мощностей. Треугольники сопротивлений (б) и мощностей (в)

Для экспериментального определения параметров реальной катушки индуктивности (R_K , L) последовательно с ней включается дополнительный резистивный элемент R (рисунок 4.6,а).

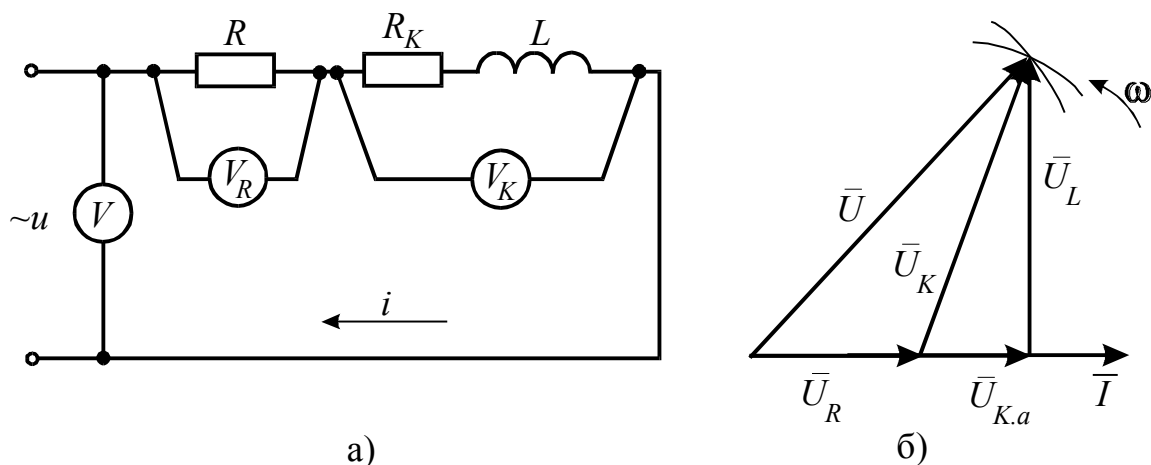


Рисунок 4.6 – Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б) цепи с резистором и реальной катушкой индуктивности

Определяются с помощью амперметра и вольтметра ток в цепи и напряжения U , U_R , U_K . Затем в масштабе строится векторная диаграмма в соответствии с рисунком 4.6,б. Определяется величина вектора $\vec{U}_{K.a}$ из диаграммы затем параметры реальной индуктивной катушки:

$$R_K = \frac{U_{K.a}}{I}, \quad X_L = \frac{U_L}{I}, \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f}. \quad (4.32)$$

Такой метод определения параметров называется метод (опыт) трех вольтметров.

Остальные величины могут быть определены на основании закона Ома для схемы на рисунке 4.6,а

$$Z = \sqrt{R^2 + R_K^2 + X_L^2} = \frac{U}{I}, \quad (4.33)$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_L^2} = \frac{U_K}{I}, \quad (4.34)$$

$$R = \frac{U_R}{I}. \quad (4.35)$$

Другим способом определения параметров реальной катушки является метод двух частот. Измеряется ток и напряжение на индуктивной катушке при

двух различных частотах f_1 и f_2 , величина которых известна. Составляется система двух уравнений с двумя неизвестными величинами R_K , L :

$$Z_{f_1} = \frac{U_{Kf_1}}{I_{f_1}} = \sqrt{R_K^2 + (\pi f_1 L)^2}, \quad (4.36)$$

$$Z_{f_2} = \frac{U_{Kf_2}}{I_{f_2}} = \sqrt{R_K^2 + (\pi f_2 L)^2}, \quad (4.37)$$

здесь U_{Kf_1} , I_{f_1} – напряжение и ток катушки при частоте f_1 ;

U_{Kf_2} , I_{f_2} – напряжение и ток катушки при частоте f_2 .

Подставляем все известные значения и определяем параметры катушки.

4.1.5 Цепь с активно-емкостной нагрузкой

Запишем для схемы, изображенной на рисунке 4.7,а, уравнение на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$u = u_R + u_C. \quad (4.38)$$

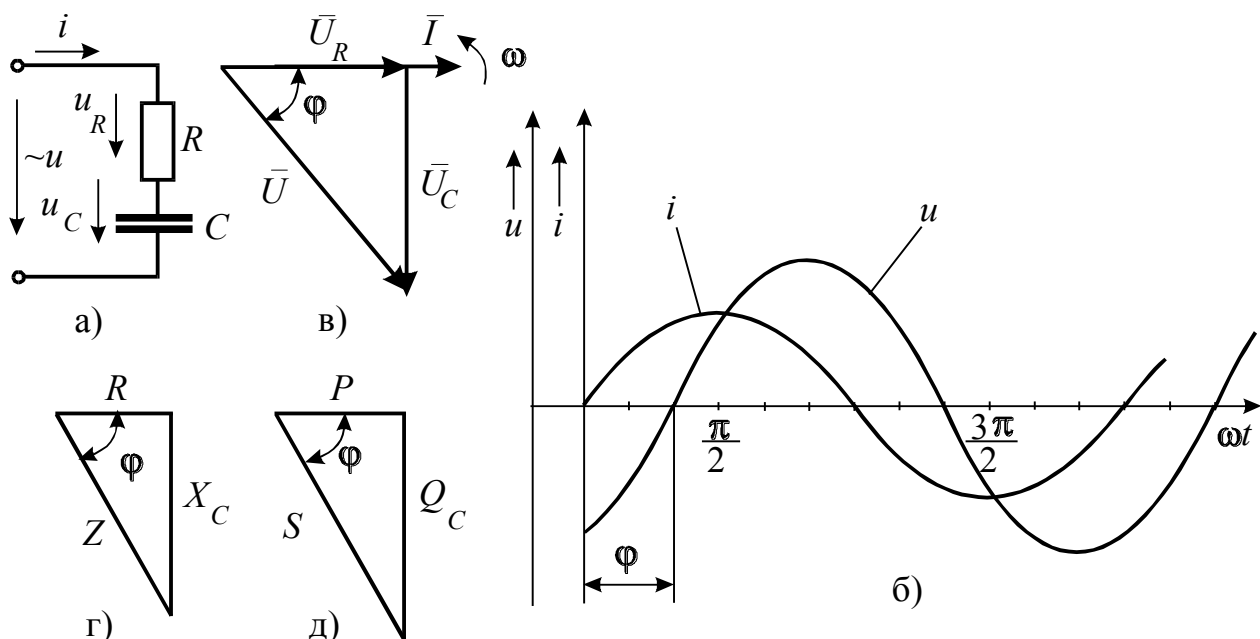


Рисунок 4.7 – Схема (а), временные диаграммы (б) и треугольники напряжений (в), сопротивлений (г) и мощностей (д) цепи с активным и емкостным элементами

Векторная диаграмма цепи для последовательного соединения R и C показана на рисунке 4.7,в. Вектор напряжения на резистивном элементе $\vec{U}_R$ совпадает с вектором тока, вектор напряжения на емкостном элементе $\vec{U}_C$ отстает от вектора тока на угол 90° . Вектор приложенного напряжения определяется как геометрическая сумма векторов $\vec{U}_R$ и $\vec{U}_C$:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C, \quad (4.39)$$

а его величина

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}. \quad (4.40)$$

Выразив U_R и U_C по закону Ома, получим

$$U = \sqrt{R^2 + X_C^2} I, \quad (4.41)$$

отсюда

$$U = I \sqrt{R^2 + X_C^2} = IZ. \quad (4.42)$$

Таким образом, закон Ома цепи закон Ома для соединения R и C :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{U}{Z}, \quad (4.43)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ – полное сопротивление, Ом.

Из векторной диаграммы на рисунке 4.7, в следует, что **напряжение цепи R и C отстает по фазе от тока на угол φ** и его мгновенное значение.

Если разделить все стороны треугольника напряжений (рисунок 4.7,в) на величину тока, получим треугольник сопротивлений (рисунок 4.7,г). Коэффициент мощности из треугольника сопротивлений:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}. \quad (4.44)$$

Если умножить все стороны треугольника напряжений (рисунок 4.7,в) на величину тока, то получим треугольник мощностей (рисунок 4.7,д) со сторонами:

$$P = U_R I = I^2 R \text{ – активная мощность, Вт;}$$

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C \text{ – реактивная (емкостную), ВАр;}$$

$$S = UI = I^2 Z \text{ – полная мощность, ВА;}$$

$$\cos \varphi = P/S \text{ – коэффициент мощности .}$$

4.2 Описание лабораторной установки

Измерительное оборудование, источники питания и нагрузочные элементы электрических цепей, используемые в лабораторной работе, размещены на лицевой панели универсального стенда, рисунок 4.8.

В качестве источника питания синусоидального напряжения в работе используется генератор низкочастотный ГЗ-123. На панели стенда имеются набор катушек индуктивностей $L_1 - L_4$, батарея емкостей $C_1 - C_4$ и резистор R_3 . Для проведения измерений величины тока используем миллиамперметр М 42300. Для измерения напряжений в качестве вольтметра используется цифровой мультиметр ВР-11А.

4.3 Подготовка к работе

4.3.1 Повторить разделы курса «Теоретические основы электротехники электроника», в которых рассматриваются электромагнитные процессы в цепях с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

4.3.2 Подготовить бланк отчета лабораторной работы, в котором привести схему испытаний с указанием необходимых приборов, таблицы для записи результатов опытов и расчетов, расчетные формулы.

4.3.3 Подготовить ответы на контрольные вопросы.



Рисунок 4.8 – Элементы и измерительные приборы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

4.4 Рабочее задание

4.4.1 Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 4.9, на котором пунктиром обведена реальная индуктивная катушка. В качестве реальной катушки используем магазин индуктивных элементов L_1-L_4 , R_K - это сопротивление провода, из которого выполнена катушка.

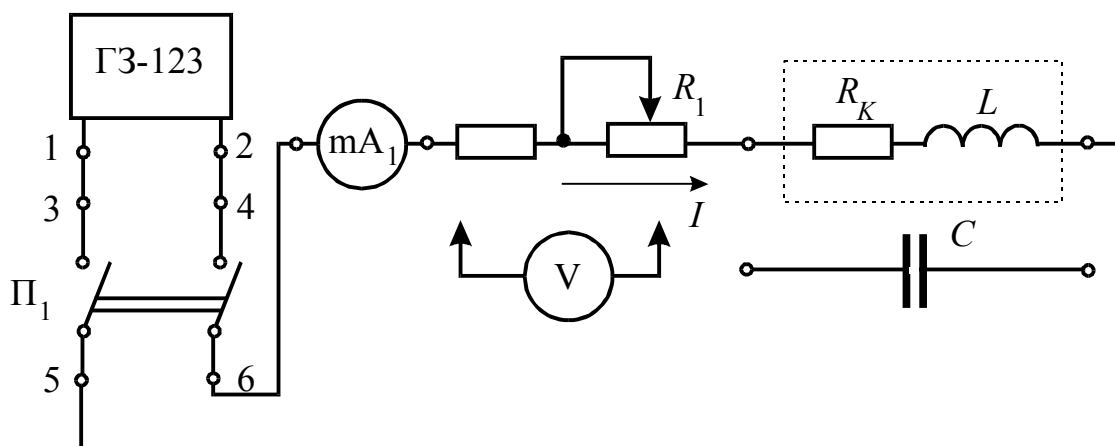


Рисунок 4.9 – Электрическая схема опытов трех вольтметров и двух частот

4.4.2 На генераторе синусоидального напряжения ГЗ-123 установите напряжение 12 В и частоту $f=200$ Гц.

4.4.3 После проверки электрической цепи преподавателем включите питание переключателем П1 и определите величину тока I , напряжения на входе цепи U , на катушке индуктивности U_K и на резисторе U_{R1} . Данные измерений занесите в таблицу 4.3. Отключите питание.

4.4.4 Замените в электрической цепи, изображенной на рисунке 4.9, индуктивный элемент на емкостной элемент, для этого используем магазин емкостей $C_1 - C_4$ и повторите опыт. Величины тока I , напряжений на входе цепи U , на конденсаторах U_C и на резисторе U_{R_1} занесите в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерений и вычислений параметров катушки и конденсатора методом трех вольтметров

Цепь	Измерено					Вычислено						
	U	U_C	U_K	U_{R_1}	I	R_1	Z_K	X_L	R_K	L	X_C	C
	В	В	В	В	мА	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	мкФ
R, L		-									-	-
R, C			-				-	-	-	-		

4.4.5 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 4.9, проведите опыт двух частот. Значения напряжения на катушке U_K и тока I при двух частотах генератора $f_1=200$ Гц, $f_2=500$ Гц занесите в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты измерений и вычислений параметров катушки и конденсатора методом двух частот

Цепь	Частота, Гц	Измерено			Вычислено					
		I	U_K	U_C	Z_K	R_K	X_L	L	X_C	C
		мА	В	В	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	мкФ
R, L	$f_1=200$									
	$f_2=500$									
R, C	$f_1=200$									
	$f_2=500$									

4.4.6 Замените индуктивный элемент на емкостной и повторите опыт.

4.5 Обработка результатов опытов

4.5.1 Постройте векторные диаграммы тока и напряжений, треугольник сопротивлений для исследуемых электрических цепей на основании данных таблицы 4.3. При построении векторных диаграмм необходимо учитывать

падение напряжения на миллиамперметре, так как используется реальный прибор, сопротивление которого отлично от нуля. Будем считать, что миллиамперметр обладает только активным сопротивлением, поэтому вектор падения напряжения на нем откладывается последовательно с вектором падения напряжения на R_1 .

4.5.2 Определите параметры реальной катушки индуктивности и конденсатора по методу трех вольтметров, используя векторные диаграммы и формулы (4.32) - (4.35), (4.40) - (4.43).

4.5.3 Определите параметры реальной катушки индуктивности и конденсатора по методу двух частот, используя формулы (4.36), (4.37).

4.5.4 Сравните результаты пунктов 4.5.2 и 4.5.3 и сделайте выводы.

4.6 Содержание отчета

4.6.1 Цель работы.

4.6.2 Схемы электрической цепи (отдельно цепь R , L и цепь R , C).

4.6.3 Расчетные формулы.

4.6.4 Таблицы 4.3 и 4.4.

4.6.5 Векторные диаграммы тока и напряжений, треугольники сопротивлений для цепей R , L и R , C , построенные в масштабе.

4.6.6 Выводы по работе.

4.7 Контрольные вопросы

4.7.1 Дайте определения переменного тока и периодического тока.

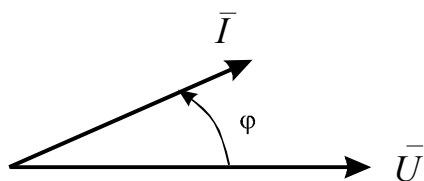
4.7.2 Дайте определение синусоидального тока. Какие параметры его характеризуют?

4.7.3 Определите мгновенное значение тока $i = 10\sin(\omega t + 60^\circ)$ для момента времени $t = 0,001$ с, если частота $f = 50$ Гц.

4.7.4 Запишите комплексное сопротивление для последовательно соединенных R , L , C .

4.7.5 Что такое начальная фаза и сдвиг по фазе синусоидального тока?

4.7.6 Какие элементы содержит цепь, характеризующаяся данной векторной диаграммой?



- а) R, L ;
- б) R, C ;
- в) L ;
- г) C .

4.7.7 Укажите правильную группу формул для расчета активной, реактивной и полной мощностей.

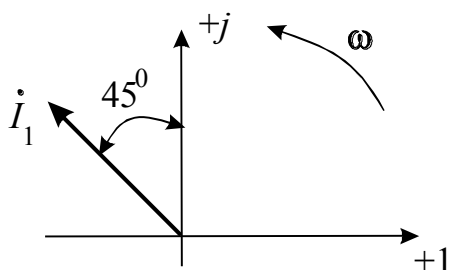
- 1) $P = UI \cos \varphi$; $Q = UI \sin \varphi$; $S = UI$.
- 2) $P = UI \sin \varphi$; $Q = UI \cos \varphi$; $S = UI$.
- 3) $P = \frac{UI}{\cos \varphi}$; $Q = \frac{UI}{\sin \varphi}$; $S = \frac{U}{I}$.

4.7.8 Как определяется ток и напряжения в цепи синусоидального тока с последовательным соединением резистора, индуктивности и ёмкости? Запишите закон Ома в комплексной форме.

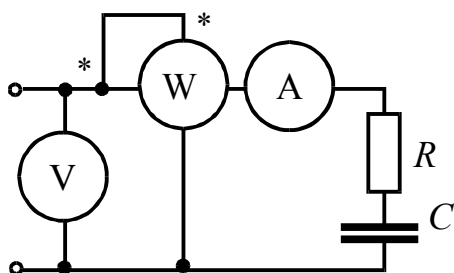
4.7.9 Что такое треугольник сопротивлений? Как его построить?

4.7.10 Что такое треугольник мощностей? Как его построить?

4.7.11 Выберите правильное выражение для тока i_1 , векторная диаграмма которого представлена на рисунке.

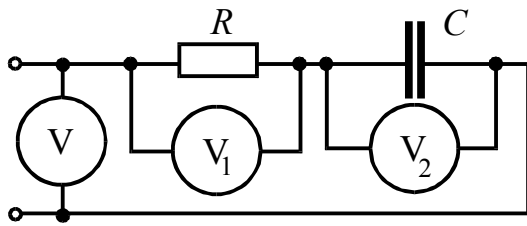


- а) $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t - 225^\circ)$;
- б) $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t - 45^\circ)$;
- в) $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + 225^\circ)$;
- г) $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + 45^\circ)$.



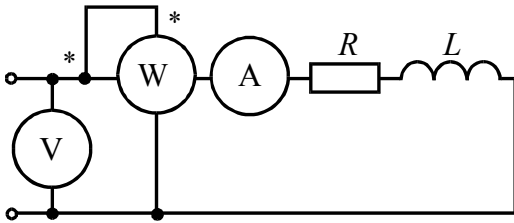
4.7.12 Показания приборов:

$W = 256$ Вт; $I_A = 2$ А, $U = 160$ В. Определите активное сопротивление R и емкость C , если частота $f = 50$ Гц. Построить векторную диаграмму тока и напряжений.



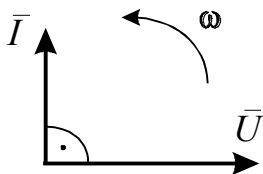
4.7.13 Известны показания вольтметров $U=5$ В и $U_1=4$ В. Чему равно показание вольтметра U_2 ?

4.7.14 Чему равна реактивная мощность Q цепи, если показания ваттметра $W=6$ Вт, вольтметра $U=2$ В, амперметра $I=5$ А?



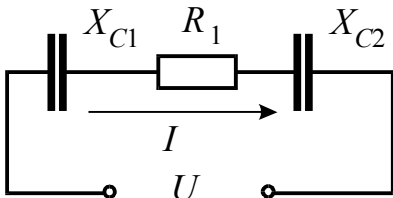
- а) $Q=8$ ВАр;
- б) $Q=6$ ВАр;
- в) $Q=12$ ВАр;
- г) $Q=10$ ВАр.

4.7.15 Запишите выражение для мгновенного значения тока i на основании векторной диаграммы, если $u=100\sqrt{2}\sin\omega t$, $I_m=10$ А.



- а) $i=10\sin(\omega t-90^\circ)$;
- б) $i=10\sin\omega t$;
- в) $i=10\sqrt{2}\sin(\omega t+90^\circ)$;
- г) $i=10\sqrt{2}\sin\omega t$.

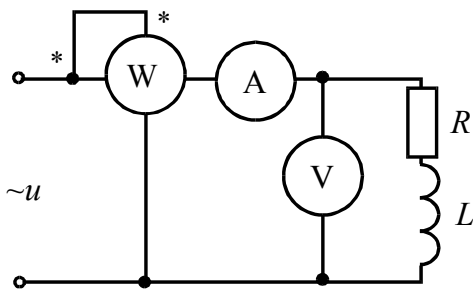
4.7.16 Определите: Z , I , φ , P , Q , S . Постройте векторную диаграмму.



$R_1, \text{Ом}$	$X_{C1}, \text{Ом}$	$X_{C2}, \text{Ом}$	$U, \text{В}$
24	12	20	80

4.7.17 Какие преобразования энергии происходят на резистивном и индуктивном элементах при включении их в цепь переменного тока?

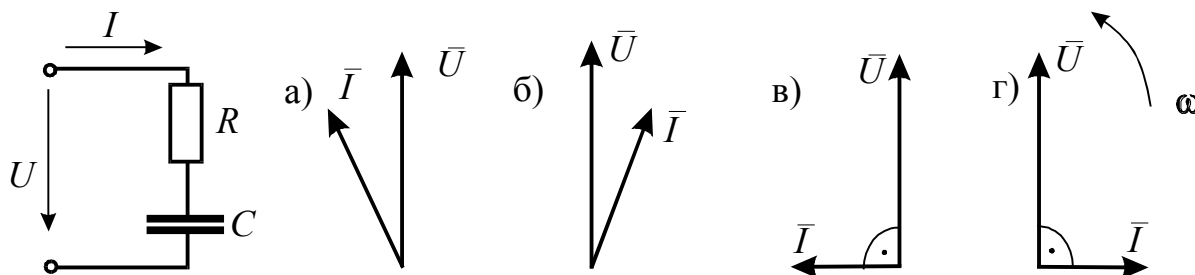
4.7.18 Приборы, включенные в цепь, показывают: $W=750$ Вт; $A=5$ А;



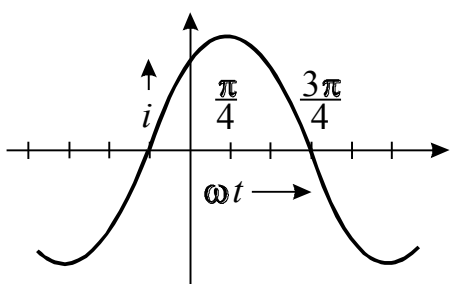
$V=250$ В. Определите активное сопротивление R и индуктивность L , если частота питающего напряжения $f=50$ Гц. Постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

4.7.19 Какая векторная диаграмма соответствует данной схеме цепи?

Укажите правильный ответ.



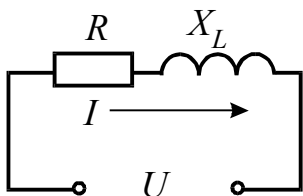
4.7.20 Определите начальную фазу переменного тока, представленного на графике. Укажите правильный ответ.



- а) $-\pi/4$; б) $3\pi/4$;
 в) $\pi/4$; г) $-3\pi/4$.

4.7.21 Как определить индуктивность катушки методами трех вольтметров и двух частот?

4.7.22 Определите: Z , I , φ , P , Q , S . Постройте векторную диаграмму.1



R , Ом	X_L , Ом	U , В
24	32	80

4.7.23 К конденсатору емкостью $C = 15,9 \cdot 10^{-6}$ Ф подведено напряжение $u = 141 \sin(\omega t - 28^\circ)$. Определите реактивную мощность цепи, если частота $f = 50$ Гц.

4.7.24 Определите угловую скорость ω и частоту f синусоидально изменяющегося напряжения $u = 30 \sin(157t + 30^\circ)$, В.

4.7.25 Задано мгновенное значение синусоидального напряжения $u(t) = 50 \sin(628t + \pi/3)$, В. Определите частоту f и период колебаний T .

5 Лабораторная работа: Разветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями

Цель работы. Экспериментально определить параметры пассивных приемников в цепях синусоидального тока при параллельном соединении. Освоить построение векторных диаграмм напряжения и токов, треугольников проводимостей.

5.1 Краткие теоретические и практические сведения

5.1.1 Параллельное соединение резистора и катушки индуктивности

На рисунке 5.1, а показана разветвленная цепь, которая состоит из параллельно соединенных резистивного элемента и реальной катушки индуктивности. При параллельном соединении каждая ветвь электрической цепи находится под одним и тем же напряжением U . В резисторе протекает чисто активный ток, совпадающий по фазе с напряжением

$$I_{R1} = \frac{U}{R_1} = U \cdot g_1, \quad (5.1)$$

где $g_1 = 1/R_1$ – проводимость резистора R_1 , См.

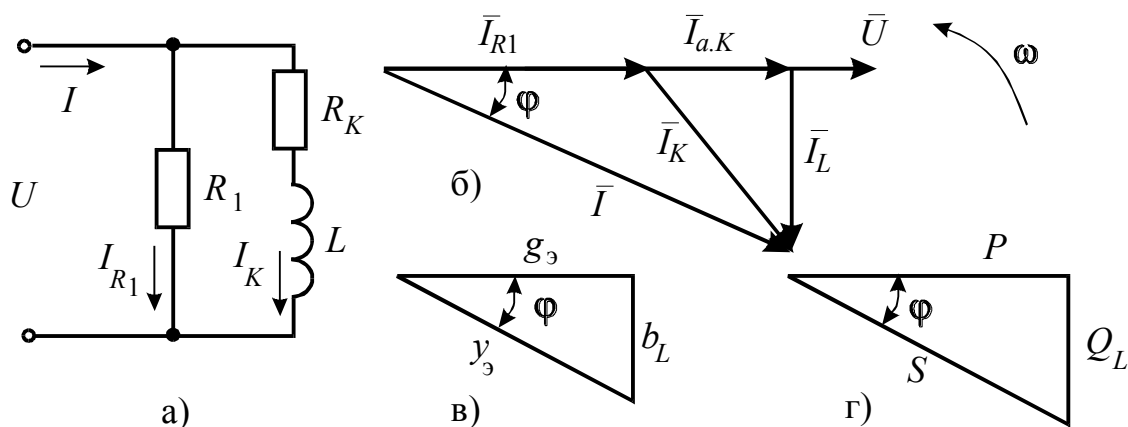


Рисунок 5.1 – Схема (а), векторная диаграмма (б), треугольники проводимостей (в) и мощностей (г) цепи с резистором и реальной катушкой индуктивности

В индуктивной катушке величина тока определяется по формуле

$$I_K = \frac{U}{Z_K} = U \cdot y_K, \quad (5.2)$$

где $y_K = 1/Z_K$ – полная проводимость катушки.

Ток катушки индуктивности I_K отстает от напряжения на угол

$$\varphi_K = \arctg \frac{\omega \cdot L}{R_K} \quad (5.3)$$

и имеет активную составляющую, совпадающую по фазе с напряжением

$$I_{a.K} = I_K \cdot \cos \varphi_K = U \cdot g_K, \quad (5.4)$$

где $g_K = R_K/Z_K^2$ – активная проводимость катушки,

и индуктивную реактивную составляющую, отстающую от напряжения на угол $\pi/2$

$$I_L = I_K \cdot \sin \varphi_K = U \cdot b_L, \quad (5.5)$$

где $b_L = X_L/Z_K^2$ – индуктивная проводимость катушки.

Ток в неразветвленной части цепи I имеет активную составляющую

$$I_a = I_{R1} + I_{a.K} = U \cdot g_{R1} + g_K = U \cdot g_{\Sigma}, \quad (5.6)$$

где g_{Σ} – эквивалентная активная проводимость цепи; и индуктивную составляющую, определяемую формулой (5.5).

Аналитически ток в неразветвленной части цепи может быть определен как геометрическая сумма активной и индуктивной составляющей

$$I = \sqrt{I_{R1}^2 + I_L^2} = U \cdot \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_L^2} = U \cdot y_{\Sigma}, \quad (5.7)$$

где $y_{\Sigma} = 1/Z_{\Sigma}$ – эквивалентная полная проводимость цепи.

Векторная диаграмма для электрической цепи, изображенной на рисунке 5.1, имеет вид треугольника токов. Если все стороны треугольника токов разделить на величину напряжения U , то получится подобный ему треугольник

проводимостей. Если же все стороны треугольника токов умножить на величину напряжения U , то получится подобный ему треугольник мощностей.

Из треугольников проводимостей и мощностей, рисунок 5.1, в и г, определяются

$$\cos \varphi = \frac{g_3}{y_3} = \frac{I_a}{I} = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I}, \quad (5.8)$$

$$\sin \varphi = \frac{b_L}{y_3} = \frac{I_L}{I} = \frac{Q_L}{S} = \frac{Q_L}{U \cdot I}, \quad (5.9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_L}{g_3} = \frac{I_L}{I_a} = \frac{Q_L}{P}. \quad (5.10)$$

Угол φ считается в данном случае положительным, так как общий ток отстает от напряжения.

5.1.2 Параллельное соединение резистора и конденсатора

Рассмотрим параллельное соединение резистивного и емкостного элементов, рисунок 5.2.

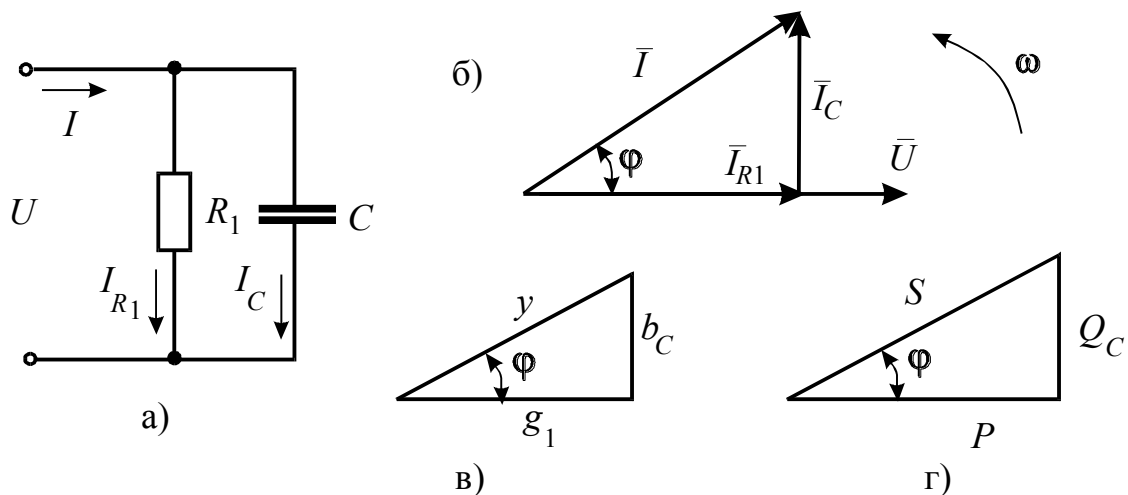


Рисунок 5.2 – Схема (а), векторная диаграмма (б), треугольники проводимостей (в) и мощностей (г) цепи с резистором и конденсатором

Для данной электрической цепи будут справедливы следующие

выражения

$$I_{R1} = \frac{U}{R_1} = U \cdot g_1, \quad I_C = U\omega C = U \cdot b_C \quad (5.11)$$

$$I = \sqrt{I_{R1}^2 + I_C^2} = U \cdot \sqrt{g_1^2 + b_C^2} = U \cdot y, \quad (5.12)$$

где $b_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$ – реактивная емкостная проводимость конденсатора.

Ток, протекающий через конденсатор, имеет только реактивную составляющую (активная составляющая отсутствует) и опережает напряжение на угол $\pi/2$. Если все стороны треугольника токов, рисунок 5.2, б, разделить на величину напряжения U , то получится подобный ему треугольник проводимостей (рисунок 5.2,в). Если же все стороны треугольника токов умножить на величину напряжения U , то получится подобный ему треугольник мощностей (рисунок 5.2,г).

Угол сдвига φ в этих треугольниках – отрицательный, так как ток в неразветвленной части I опережает напряжение U .

5.1.3 Метод трех амперметров

Для экспериментального определения параметров катушки (R_K , L) можно воспользоваться *методом трех амперметров*. При реализации этого метода параллельно катушке с полным сопротивлением $Z_K = \sqrt{R_K^2 + \omega^2 L^2}$ включается активное сопротивление R_1 (рисунок 5.5) и проводят замеры трех токов: I_2 в активном сопротивлении R_1 , ток I_3 в катушке индуктивности и ток в неразветвленной части цепи I_1 .

Исходя из величин этих трех токов, выраженных в одном и том же масштабе, строится векторная диаграмма, в соответствии с рисунком 5.3, а. По горизонтали по направлению вектора напряжения U откладываем ток I_2 в активном сопротивлении R_1 и делаем засечки из концов этого вектора (точек O и A) радиусами, равными токам I_1 и I_3 соответственно. Точку пересечения окружностей соединяем с точками O и A . Из векторной диаграммы следует,

что

$$\cos \varphi_K = \frac{I_1^2 - I_2^2 - I_3^2}{2 \cdot I_2 \cdot I_3}; \quad \cos \varphi = \frac{I_2 + I_3 \cdot \cos \varphi_K}{I_1}; \quad (5.13)$$

– напряжение на входных зажимах

$$U = I_2 \cdot R_1; \quad (5.14)$$

– полное сопротивление катушки:

$$Z_K = \frac{U}{I_3}; \quad (5.15)$$

– активное сопротивление катушки:

$$R_K = Z_K \cdot \cos \varphi_K; \quad (5.16)$$

– реактивное индуктивное сопротивление катушки:

$$X_L = \omega L = Z_K \cdot \sin \varphi_K; \quad (5.17)$$

– индуктивность:

$$L = \frac{X_L}{\omega}, \quad \omega = 2\pi f. \quad (5.18)$$

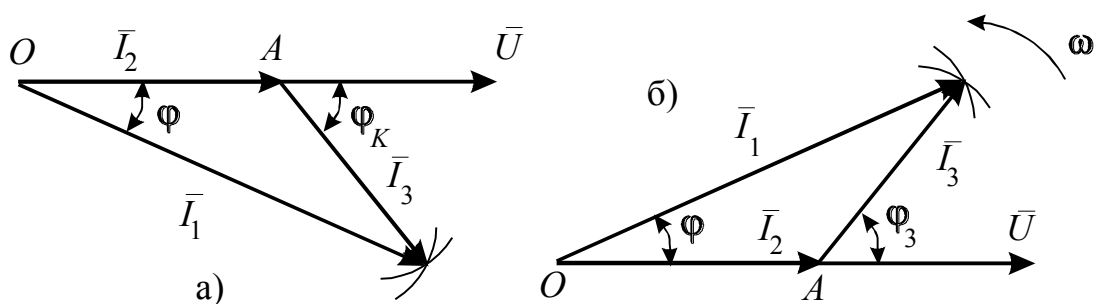


Рисунок 5.3 – Векторные диаграммы для определения параметров реальной катушки индуктивности (а) и конденсатора (б)

Для определения параметров параллельного соединения R_2 и C в цепи с резистором и конденсатором (рисунок 5.6) аналогично измеряют токи на входе цепи и в ветвях. Реактивное емкостное сопротивление и емкость конденсатора

определяются по формулам

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad C = \frac{1}{\omega X_C}, \quad \omega = 2\pi f. \quad (5.19)$$

5.2 Описание лабораторной установки

Измерительное оборудование, источники питания и нагрузочные элементы электрических цепей, используемые в лабораторной работе, размещены на лицевой панели универсального стенда, рисунок 5.4.

В качестве источника питания синусоидального напряжения в работе используется генератор низкочастотный ГЗ-123. На панели стенда имеются набор катушек индуктивностей $L_1 - L_4$, батарея емкостей $C_1 - C_4$ и резистор R_1 . Для проведения измерений величины тока используем миллиамперметр М 42300. Для измерения напряжений используется цифровой мультиметр ВР-11А



Рисунок 5.4 – Элементы и измерительные приборы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

5.3 Подготовка к работе

5.3.1 Повторите разделы курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в которых рассматривается параллельное соединение приемников синусоидального тока.

5.3.2 Подготовьте бланк отчета лабораторной работы, в котором приведите схемы опытов, необходимые расчетные формулы и таблицу.

5.3.3 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

5.4 Рабочее задание

5.4.1 Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 5.5, на котором пунктиром обведена реальная индуктивная катушка. В качестве реальной катушки используем магазин индуктивных элементов L_1-L_4 , R_K - это сопротивление провода, из которого выполнена катушка. Миллиамперметры mA_1 - mA_3 переключить на диапазон $\times 3$.

5.4.2 На генераторе ГЗ-123 установите напряжение питания 12 В и частоту $f=200$ Гц.

5.4.3 После проверки электрической цепи преподавателем включите питание переключателем Π_1 и измерьте напряжение U на входе цепи, токи I_1 , I_2 и I_3 . Результаты измерений занесите в таблицу 5.1. Отключите питание.

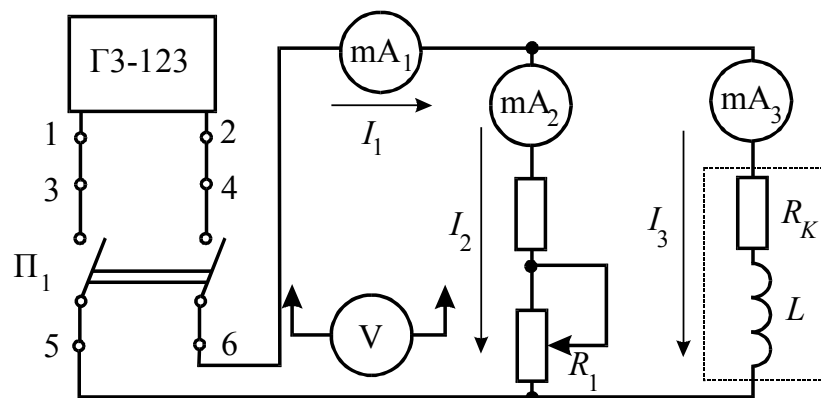


Рисунок 5.5 – Схема опыта для определения параметров реальной катушки

Таблица 5.1 – Результаты измерений и вычислений опытов трех амперметров

№№ измерений	Измерено					Вычислено							
	U	f	I_1	I_2	I_3	R_1	R_K	X_L	L	R_2	X_C	C	$\cos \varphi$
	В	Гц	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	мкФ	
$R,$ L										-	-	-	
$R,$ C							-	-	-				

5.4.4 Замените в электрической цепи индуктивную катушку на емкости $C_1, \dots, C_4$, рисунок 5.6. После проверки преподавателем включите питание переключателем Π_1 в цепи.

5.4.5 Измерьте напряжение U на входе цепи, токи I_1, I_2 и I_3 . Результаты измерений занесите в таблицу 5.1. Отключите питание.

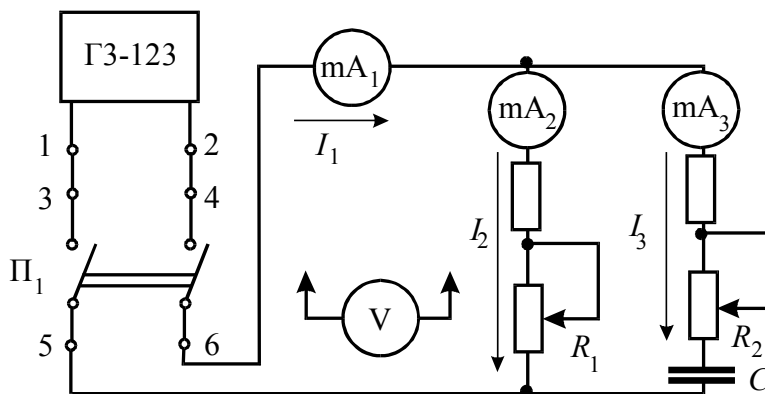


Рисунок 5.6 – Схема опыта для определения параметров конденсатора

5.5 Обработка результатов опытов

5.5.1 По результатам первого опыта постройте в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений и определите параметры R_1, R_K, X_L, L и $\cos \varphi$, используя построенную векторную диаграмму и формулы (5.13)-(5.18).

5.5.2 По результатам второго опыта постройте в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений и определите параметры R_1, R_2, X_C, C и $\cos \varphi$, используя построенную векторную диаграмму и формулы (5.13), (5.14), (5.19).

5.5.3 Для схем рисунков 5.5 и 5.6 постройте треугольник проводимостей.

5.6 Содержание отчета

5.6.1 Цель работы

5.6.2 Схемы в соответствии с рисунками 5.5 и 5.6.

5.6.3 Расчетные формулы.

5.6.4 Таблица 5.1 опытных и расчетных данных.

5.6.5 Векторные диаграммы и треугольник проводимостей, построенные в масштабе.

5.6.6 Выводы по работе.

5.7 Контрольные вопросы

5.7.1 В чем заключается суть опыта трех амперметров?

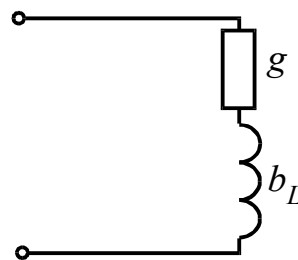
5.7.2 Постройте векторную диаграмму для параллельного соединения R и L . Объясните порядок построения.

5.7.3 Постройте векторную диаграмму для параллельного соединения R и C . Объясните порядок построения.

5.7.4 Как определить полную проводимость? В каких единицах она измеряется?

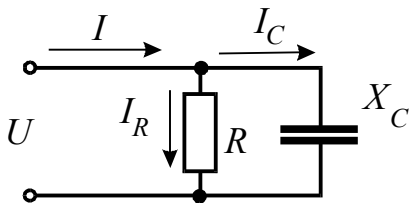
5.7.5 Как изменится проводимость индуктивного элемента при уменьшении частоты в два раза?

5.7.6 Начертите треугольник проводимостей, соответствующий представленной схеме цепи.



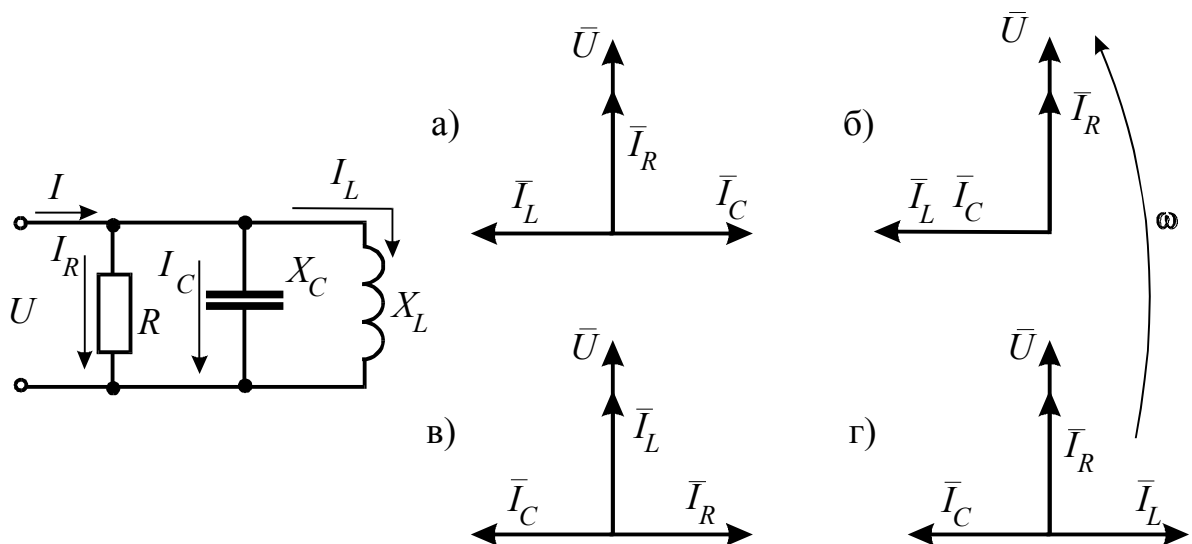
5.7.7 Как определить активную проводимость? В каких единицах она измеряется?

5.7.8 Чему равен ток на входе цепи I , если $I_R=8$ А, $I_C=6$ А?

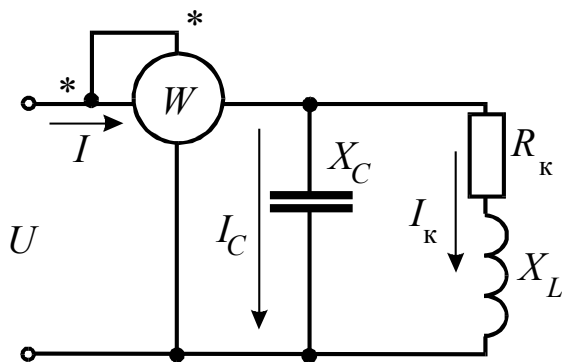


- а) 2 А;
- б) $\sqrt{14}$ А;
- в) 10 А;
- г) 14 А.

5.7.9 Укажите какая векторная диаграмма соответствует представленной схеме цепи, если $I_C = I_L = I_R$.

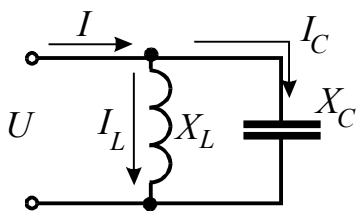


5.7.10 Укажите правильное выражение для определения показания ваттметра.

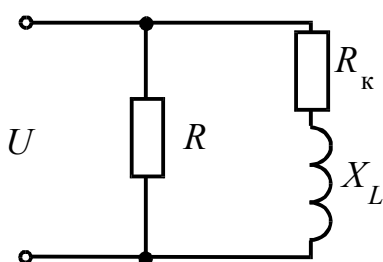


- а) $P = U \cdot I_k$;
- б) $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$;
- в) $P = U \cdot I \cdot \sin \varphi_k$;
- г) $P = U \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k$.

5.7.11 Укажите по какой формуле вычисляется действующее значение тока I в неразветвленной части цепи.

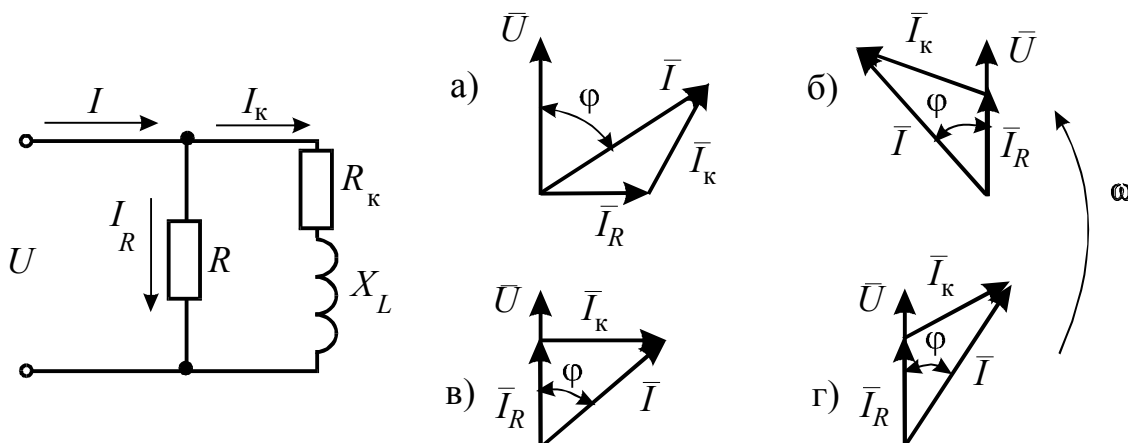


- а) $I = I_L + I_C$;
- б) $I = \sqrt{I_L^2 + I_C^2}$;
- в) $I = I_L - I_C$;
- г) $I = \frac{U}{X_L - X_C}$.

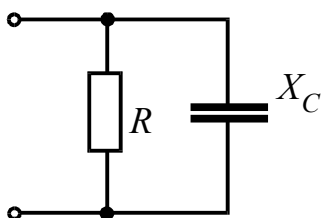


5.7.12 Для схемы, изображенной на рисунке, начертите в общем виде треугольник мощностей.

5.7.13 Какой треугольник токов соответствует схеме цепи, изображенной на рисунке? Поясните ответ.



5.7.14 Укажите строку с формулами для определения проводимостей в данной электрической цепи.



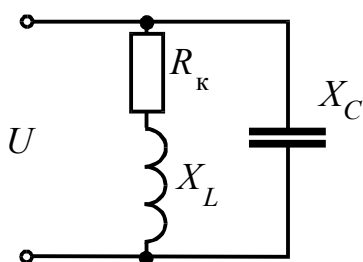
а) $g = \frac{1}{R}$; $b = \frac{1}{X_C}$; $y = g + b$;

б) $g = \frac{1}{R}$; $b = \frac{1}{X_C}$; $y = \sqrt{g^2 + b^2}$;

в) $g = \frac{R}{R^2 + X_C^2}$; $b = \frac{X_C}{R^2 + X_C^2}$; $y = g + b$;

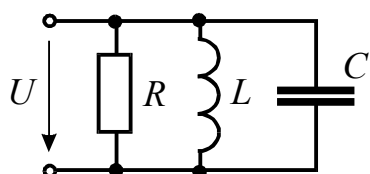
г) $g = \frac{R}{R^2 + X_C^2}$; $b_L = \frac{X_C}{R^2 + X_C^2}$; $y = \sqrt{g^2 + b^2}$.

5.7.15 Как изменится проводимость резистивного элемента при уменьшении частоты в два раза?



5.7.16 Начертите треугольник мощностей для электрической цепи, изображенной на рисунке.

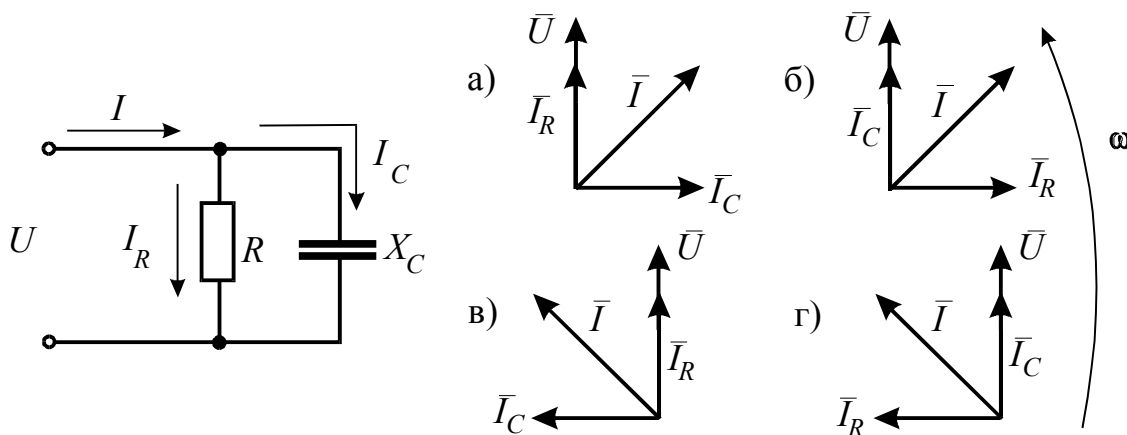
5.7.17 Как изменится проводимость емкостного элемента при увеличении частоты в два раза?



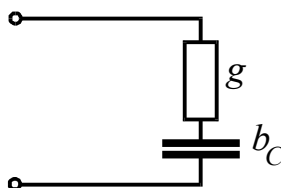
5.7.18 Для схемы, изображенной на рисунке: $R=12$ Ом; $X_L=6$ Ом; $X_C=18$ Ом, величина приложенного напряжения $U=72$ В. Определите

полную проводимость цепи

5.7.19 Укажите векторную диаграмму, соответствующую электрической цепи, изображенной на рисунке. Поясните ответ.



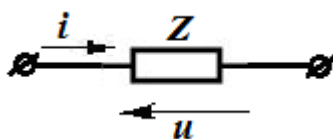
5.7.20 Начертите в общем виде треугольник проводимостей для электрической цепи, представленной на рисунке.



5.7.21 Что называют коэффициентом мощности? Как его можно определить?

5.7.22 В цепи известны ток и напряжение: $i = 10 \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ A}$,

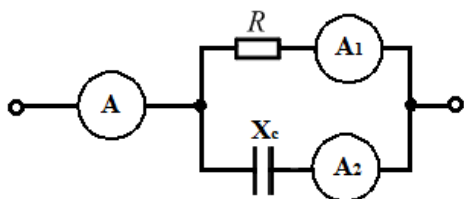
$$u = 100 \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ B}.$$



Определить активную и реактивную мощности.

1. $P = 865 \text{ Вт}$; $Q = -500 \text{ ВАр}$
2. $P = 0$; $Q = 100 \text{ ВАр}$
3. $P = 433 \text{ Вт}$; $Q = -250 \text{ ВАр}$
4. $P = 500 \text{ Вт}$; $Q = 865 \text{ ВАр}$
5. $P = 250 \text{ Вт}$; $Q = -865 \text{ ВАр}$

5.7.23 В цепь синусоидального тока включены три амперметра. Определить показание амперметра A_2 , если амперметры A и A_1 показывают соответственно 10 А и 6 А.



6 Лабораторная работа: Исследование резонанса токов

Цель работы. Исследование явления резонанса токов в разветвленной цепи синусоидального тока с элементами R , L и C в параллельных ветвях.

6.1 Краткие теоретические и практические сведения

«Явление резонанса токов наблюдается в разветвленных цепях переменного тока, содержащих ветви с индуктивностью и емкостью. Резонанс токов представляет собой такой режим работы цепи, при котором реактивная проводимость всей цепи равна нулю. Соответственно угол сдвига фаз между напряжением и общим током цепи равен нулю и цепь потребляет только активную мощность.

В настоящей работе исследуется разветвленная цепь из двух параллельных ветвей, в соответствии с рисунком 6.1. В одну ветвь включена катушка индуктивности (R_K , L). Вторая ветвь состоит из батареи конденсаторов емкостью C (активное сопротивление конденсаторов настолько мало, что им можно пренебречь).» [6]

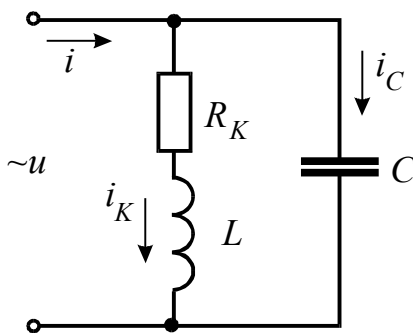


Рисунок 6.1 – Разветвленная электрическая цепь переменного тока с реальной катушкой индуктивности и конденсатором

Условие возникновения резонанса токов в такой цепи – это равенство реактивной индуктивной проводимости ветви с катушкой (b_L) и реактивной емкостной проводимости ветви с конденсатором (b_C). Так как $b_L = \frac{X_L}{Z_K^2}$ и

$b_C = \frac{X_C}{Z_C^2} \approx \frac{1}{X_C}$, то условие резонанса токов выражается формулой

$$\frac{\omega L}{R_K^2 + \omega^2 L^2} = \omega C. \quad (6.1)$$

Отсюда выражаем угловую резонансную частоту – это угловая частота, при которой в контуре с заданными величинами L и C достигается резонанс токов

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_K^2}{\frac{L}{C}}}, \quad (6.2)$$

или резонансная частота

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_K^2}{\frac{L}{C}}}. \quad (6.3)$$

Если принять активное сопротивление R_K катушки индуктивности равным нулю (это допустимо при условии $R_K \ll \omega L$), то выражение (6.1) примет вид:

$$\omega^2 LC = 1. \quad (6.4)$$

отсюда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (6.5)$$

или

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (6.6)$$

Характеристическое или волновое сопротивление резонансной цепи определяется выражениями:

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6.7)$$

где ρ - волновое или характеристическое сопротивление.

Резонанс токов может быть достигнут изменением частоты питающего

напряжения или изменении параметров цепи. Для этого надо соответственно изменять частоту питания f , индуктивность L или емкость C .

На рисунке 6.2 показаны векторные диаграммы для электрической цепи, изображенной на рисунке 6.1, при $f = \text{const}$ и $L = \text{const}$ и переменной емкости.

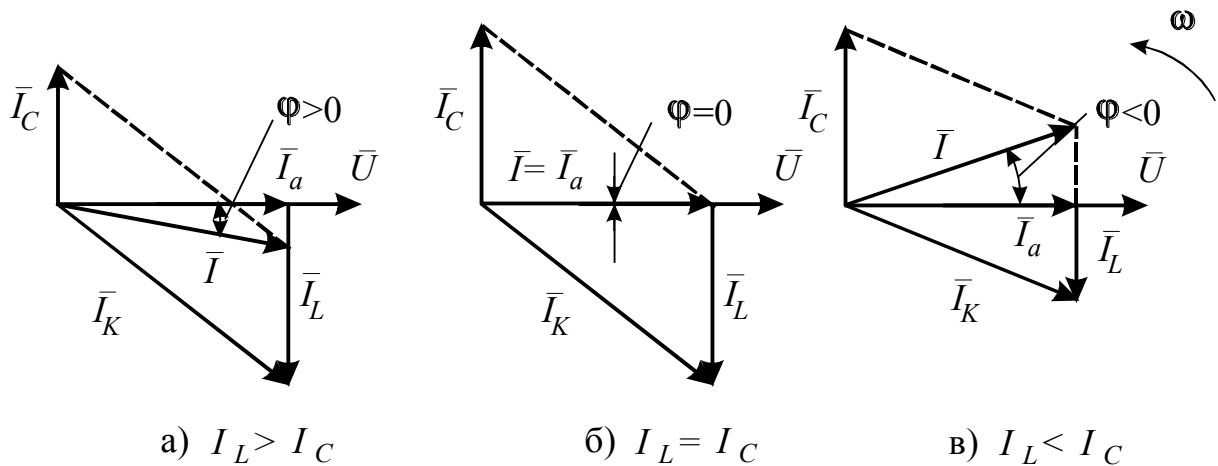


Рисунок 6.2 – Векторные диаграммы разветвленной цепи с R, L, C при различных соотношениях индуктивного и емкостного токов

Общий ток цепи выражается формулой

$$I = U \cdot Y = U \sqrt{g^2 + \left(b_L - b_C \right)^2}. \quad (6.8)$$

При резонансе

$$I_0 = U \cdot Y_0 = Ug = \frac{UR_K}{R_K^2 + \omega_0^2 L^2}. \quad (6.9)$$

Ток будет иметь только активную составляющую, так как полная проводимость цепи Y_0 не имеет в этом случае реактивной составляющей.

При резонансе токов токи в ветвях с конденсатором и индуктивной катушкой могут значительно превышать общий ток цепи. Эти реактивные токи будут равны друг другу по величине $I_L = I_C$, или

$$U \frac{\omega_0 L}{R_K^2 + \omega_0^2 L^2} = U \omega_0 C, \quad (6.10)$$

но противоположны по фазе.

6.2 Описание лабораторной установки

Измерительное оборудование, источники питания и нагрузочные элементы электрических цепей, используемые в лабораторной работе, размещены на лицевой панели универсального стенда, рисунок 6.3.

В качестве источника питания синусоидального напряжения в работе используется генератор низкочастотный ГЗ-123. На панели стенда имеются набор катушек индуктивностей $L_1 - L_4$, батарея емкостей $C_1 - C_4$ и резистор R_1 . Для проведения измерений величины тока используем миллиамперметр М 42300. Для измерения напряжений используется цифровой мультиметр ВР-11А



Рисунок 6.3 – Элементы и измерительные приборы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

6.3 Подготовка к работе

6.3.1 Повторите разделы курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в которых рассматривается явление резонанса в линейных электрических цепях синусоидального тока.

6.3.2 Подготовьте бланк отчета лабораторной работы, в котором приведите схемы опытов, необходимые расчетные формулы и таблицу.

6.3.3 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

6.4 Рабочее задание

6.4.1 Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой рисунка 6.4. Включить в цепь индуктивности L_1, L_2 и емкости C_1, C_4 , миллиамперметры

mA_1 - mA_3 переключить на диапазон $\times 3$.

6.4.2 На генераторе ГЗ-123 установить выходное напряжение 15 В и частоту $f=100$ Гц.

6.4.3 После проверки электрической цепи преподавателем включите питание переключателем П1. Оставляя значения L и C неизменными, изменением частоты генератора ГЗ-123 настройте цепь в резонанс токов (при резонансе значение тока в неразветвленной части I_1 будет минимальным).

6.4.4 Проведите измерения напряжения на входе цепи, токов в ветвях и запишите частоту питающего напряжения в режиме резонанса $b_L = b_C$. Результаты измерений занесите в таблицу 6.1.

6.4.5 Изменяя частоту генератора вниз от резонансной, получите режим работы электрической цепи, при котором $b_L > b_C$. Повторите измерения и занесите результаты опытов в таблицу 6.1.

6.4.6 Изменяя частоту генератора вверх от резонансной, получите режим работы электрической цепи, при котором $b_L < b_C$. Повторите измерения и занесите результаты опытов в таблицу 6.1.

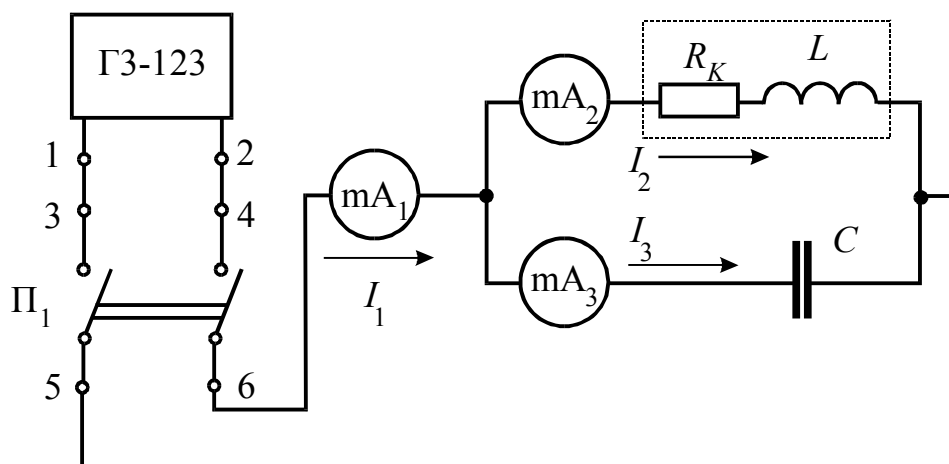


Рисунок 6.4 – Схема электрического параллельного колебательного контура с потерями

Таблица 6.1 – Результаты измерений и вычислений

Режимы работы цепи	Измерено					Вычислено					
	U	f	I_1	I_2	I_3	g	b_L	b_C	y_K	I_{1a}	$\cos \varphi$
	В	Гц	мА	мА	мА	См	См	См	См	мА	-
$b_L = b_C$											
$b_L > b_C$											
$b_L < b_C$											

6.5 Обработка результатов опытов

6.5.1 По результатам измерений рассчитайте значения активной, реактивных и полной проводимостей, используя следующие зависимости.

Активная проводимость цепи (*определять только из режима резонанса токов, когда $b_L = b_C$*)

$$g = \frac{I_{10}}{U}.$$

Полная проводимость катушки индуктивности

$$y_K = \frac{I_2}{U}.$$

Реактивная индуктивная проводимость катушки

$$b_L = \sqrt{y_K^2 - g^2}.$$

Реактивная емкостная проводимость конденсатора

$$b_C = \frac{I_3}{U}.$$

Активная составляющая тока

$$I_{1a} = U \cdot g.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}.$$

6.5.2 Используя опытные данные в таблице 6.1, построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжения для каждого опыта.

6.6 Содержание отчета

6.6.1 Цель работы

6.6.2 Схема цепи в соответствии с рисунком 6.4.

6.6.3 Таблица 6.1 опытных и расчетных данных.

6.6.4 Расчетные формулы.

6.6.5 Построенные в масштабе векторные диаграммы токов и напряжения для каждой строки таблицы 6.1.

6.6.6 Выводы по работе.

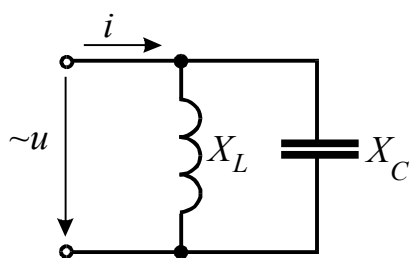
6.7 Контрольные вопросы

6.7.1 Что понимают под резонансом в электрических цепях?

6.7.2. Запишите условие возникновения резонанса токов в цепи.

6.7.3 Изобразите схемы электрических цепей идеального и реального параллельного колебательного контура.

6.7.4 Запишите мгновенное значение тока i в неразветвленной части цепи, если приложенное напряжение $u = 141 \sin \omega t$, а сопротивления равны: $X_L = X_C = 10 \text{ Ом}$.



а) $i = 20 \sin \omega t$;

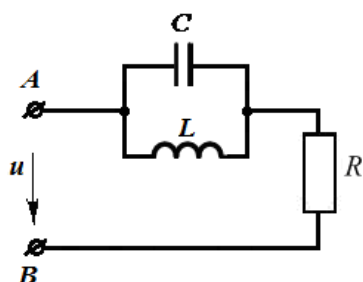
б) $i = 10\sqrt{2} \sin \omega t$;

в) $i = 20 \sin (\omega t - 90^\circ)$;

г) $i = 0$;

д) $i = 14,1 \sin (\omega t + 90^\circ)$.

6.7.5 Определить частоту f , при которой в цепи с $L = 0,1 \text{ Гн}$, $C = 25,4 \text{ мкФ}$, $R = 50 \text{ Ом}$ наступит резонанс токов.



1. $f = 50 \text{ Гц}$

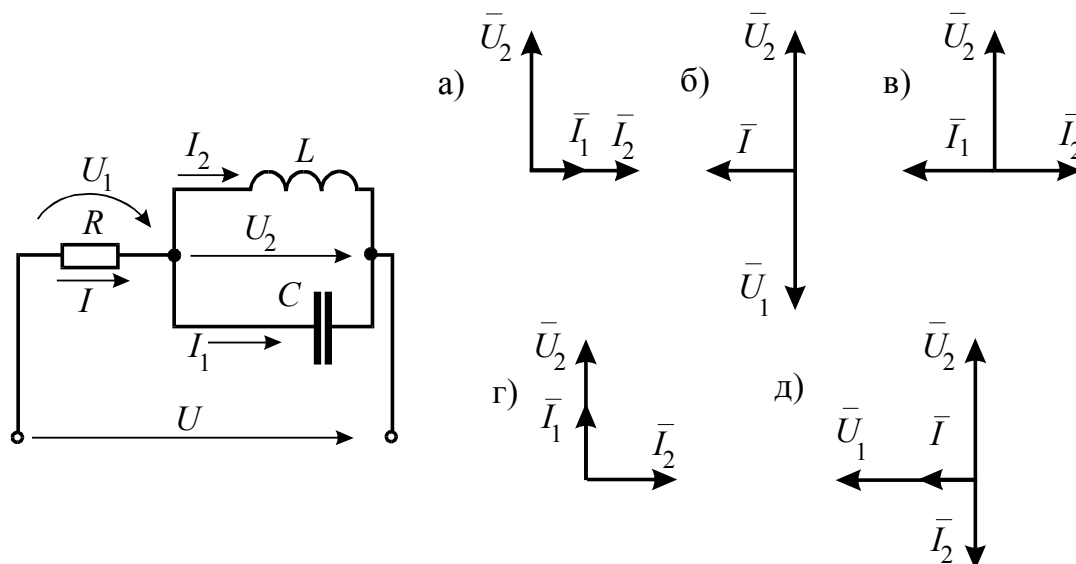
2. $f = 400 \text{ Гц}$

3. $f = 150 \text{ Гц}$

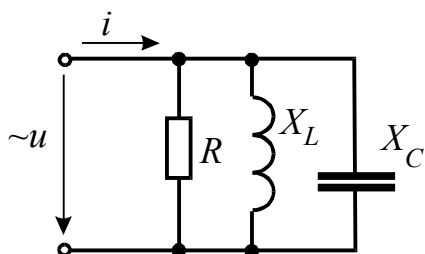
4. $f = 100 \text{ Гц}$

6.7.6 Чему равны полная проводимость и ток в неразветвленной части цепи идеального параллельного колебательного контура при резонансе?

6.7.7 Укажите какая из векторных диаграмм соответствует приведенной схеме цепи в режиме резонанса? Поясните ответ.

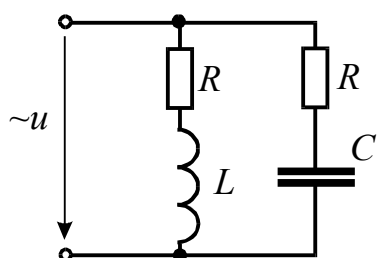
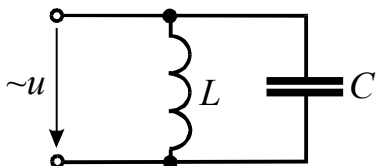


6.7.8 Запишите выражение мгновенного значения тока i в неразветвленной части цепи, если приложенное напряжение $u = 141 \sin \omega t$, а сопротивления равны $X_L = X_C = R = 10 \text{ Ом}$.



- а) $i = 30\sqrt{2} \sin(\omega t - 90^\circ)$;
- б) $i = 10 \sin \omega t$;
- в) $i = 14,1 \sin \omega t$;
- г) $i = 14,1 \sin(\omega t + 90^\circ)$.

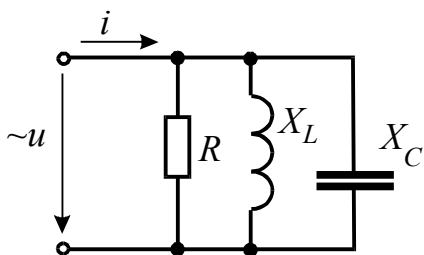
6.7.9 Параметры электрической цепи, изображенной на рисунке: $L = 0,1 \text{ Гн}$; $C = 101,4 \text{ мкФ}$; $f = 50 \text{ Гц}$. Выполняется ли условие резонанса?



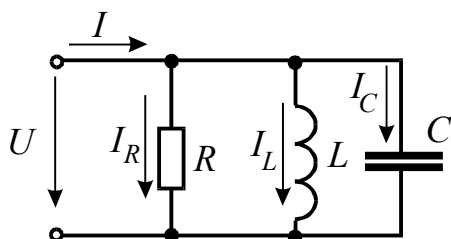
6.7.10 Постройте векторную диаграмму напряжения и токов для колебательного контура, изображенного на

рисунке, при $\omega = \omega_0$.

6.7.11 Приведите выражения, по которым можно рассчитать волновое (характеристическое) сопротивление параллельного колебательного контура.



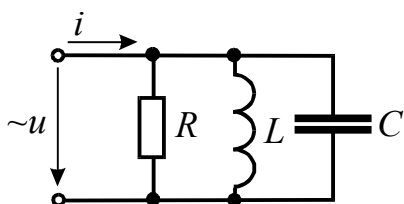
6.7.12 Параметры электрической цепи, изображенной на рисунке: $R=16$ Ом; $L=16$ мГн; $C=25$ мкФ. Определите резонансную частоту.



6.7.13 Используя векторную диаграмму, определите ток I в неразветвленной части цепи, если токи в ветвях равны: $I_R=8$ А; $I_L=12$ А; $I_C=6$ А.

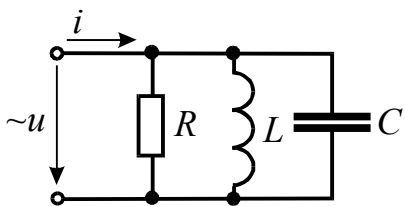
6.7.14 Почему электрическая цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора называется колебательным контуром? Какую мощность потребляет из сети такая цепь в режиме резонанса?

6.7.15 Чему равен угол φ между напряжением U и током I в режиме резонанса? Поясните ответ.



- а) $\varphi=90^\circ$;
- б) $\varphi=45^\circ$;
- в) $\varphi=0$;
- г) $\varphi=-45^\circ$;
- д) $\varphi=-90^\circ$.

6.7.16 Как определить угловую резонансную частоту параллельного колебательного контура с потерями?



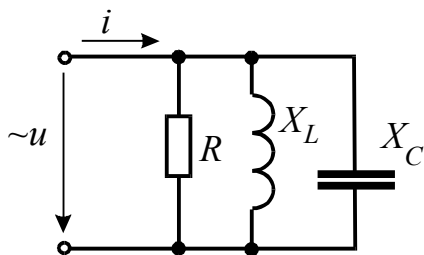
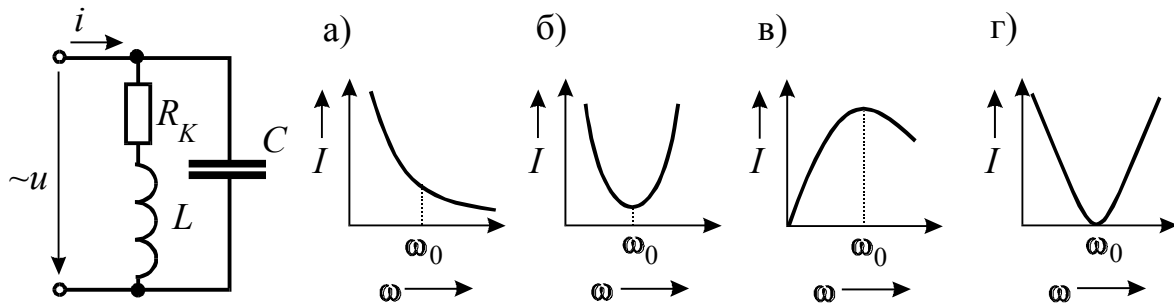
6.7.17 Генератор синусоидального напряжения, частота которого равна 1000 Гц, подключен к изображенной цепи. Чему равна индуктивность L , при которой в цепи

возникнет резонанс, если $R=30$ Ом; $C=20$ мкФ?

6.7.18 Объясните причину возможного превышения токов в ветвях

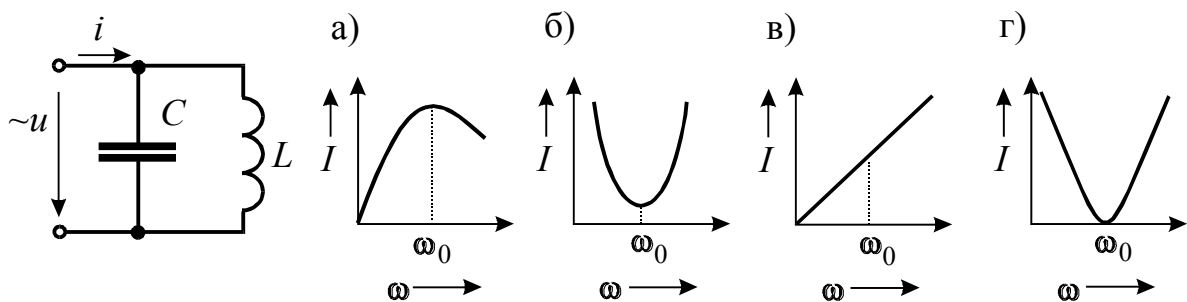
параллельного колебательного контура относительно тока в неразветвленной части цепи. С помощью какого параметра можно оценить степень такого превышения?

6.7.19 Укажите график, соответствующий изменению тока I в данной цепи, в зависимости от частоты? Поясните ответ.



6.7.20 Рассчитайте характеристическое сопротивление и добротность контура, если в этом контуре $R=20$ Ом; $L=60$ мГн; $C=30$ мкФ.

6.7.21 Укажите график, соответствующий изменению тока I в данной цепи, в зависимости от частоты? Поясните ответ.



7 Лабораторная работа: Исследование резонанса напряжений

Цель работы. Изучение явления резонанса напряжений в цепи синусоидального тока с последовательным соединением R , L и C , приобретение навыков по настройке цепи и по производству измерений, освоение методики и практики вычислений и построений векторных диаграмм по данным измерений.

7.1 Краткие теоретические и практические сведения

Рассмотрим неразветвленную цепь с последовательным соединением R , L и C , в соответствии с рисунком 7.1,а. Если цепь подключить к генератору синусоидального напряжения, то в ней будет протекать синусоидальный ток.

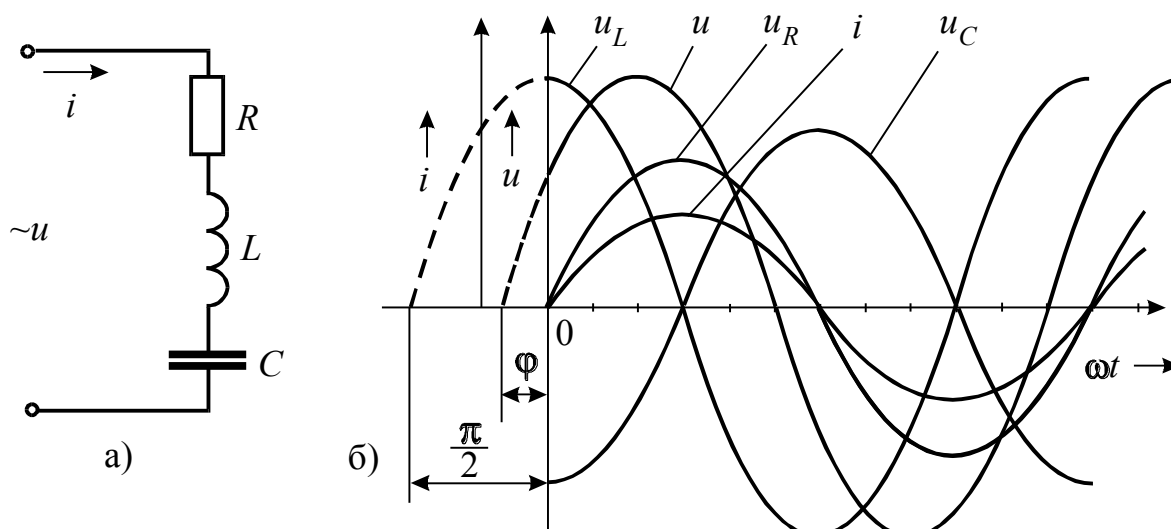


Рисунок 7.1 – Схема (а) и графики мгновенных значений тока и напряжений (б) в неразветвленной цепи с R , L , C

Мгновенное значение тока, если начальная фаза тока равна нулю ($t = 0$):

$$i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (7.1)$$

Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током:

$$u_R = i \cdot R = R \cdot I_m \cdot \sin \omega t. \quad (7.2)$$

Амплитуда этого напряжения $U_{Rm} = RI_m$, а действующее значение $U_R = RI$.

Напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на угол $+\frac{\pi}{2}$, то

есть

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L \cdot I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (7.3)$$

Амплитуда этого напряжения $U_{Lm} = \omega L I_m$, а действующее значение $U_L = \omega L I$.

Напряжение на емкости отстает по фазе от тока на угол $-\frac{\pi}{2}$,

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (7.4)$$

Амплитуда этого напряжения $U_{Cm} = \frac{1}{\omega C} I_m$, а действующее значение

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I.$$

На рисунке 7.2 изображены векторные диаграммы тока и напряжений рассматриваемой цепи.

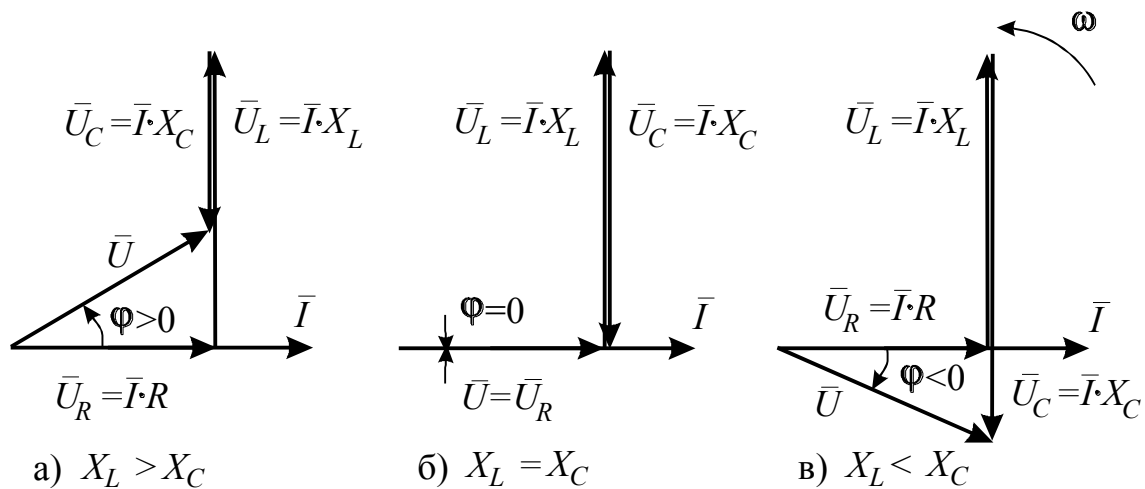


Рисунок 7.2 – Векторные диаграммы тока и напряжений для различных соотношений реактивных сопротивлений

При последовательном соединении R , L , C напряжение на зажимах цепи в любой момент времени равно сумме падений напряжения на элементах:

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (7.5)$$

Напряжения на индуктивности и емкости сдвинуты относительно друг друга по фазе на полпериода или на угол 180° , их алгебраическая сумма

называется реактивным напряжением

$$u_p = u_L + u_C, \quad (7.6)$$

где

$$\begin{aligned} u_p &= U_{Lm} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + U_{Cm} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= U_{Lm} - U_{Cm} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{pm} \cdot \sin\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Подставляя в (7.5) значения u_R и u_p , получим:

$$u = U_{Rm} \cdot \sin \omega + U_{pm} \cdot \sin\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \sin(\omega t \pm \varphi), \quad (7.8)$$

или

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t \pm \varphi), \quad (7.9)$$

где

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{Lm} - U_{Cm}} = \sqrt{U_{Rm}^2 + U_{pm}^2}; \quad (7.10)$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_{Lm} - U_{Cm}}{U_{Rm}} = \arctg \frac{\pm U_{pm}}{U_{Rm}}. \quad (7.11)$$

Разделив в уравнении (7.10) все амплитудные величины на $\sqrt{2}$ получим выражение для действующих значений напряжения

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L - U_C} = \sqrt{U_R^2 + U_p^2}. \quad (7.12)$$

Подставив в формулу (7.12) вместо напряжений их выражения по закону Ома, найдем:

$$U = \sqrt{R^2 + \left(I\omega L - I\frac{1}{\omega C}\right)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (7.13)$$

Здесь

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X_L - X_C}, \quad (7.14)$$

является *полным* сопротивлением цепи. Поэтому выражение (7.13) соответствует закону Ома для цепи переменного тока.

Построение векторной диаграммы напряжений начинается с построения вектора тока. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивности опережает ток на угол 90^0 , а напряжение на емкости отстает от тока на угол 90^0 . Напряжение на входе цепи является геометрической суммой напряжений на элементах цепи.

Если стороны треугольника напряжений, в соответствии с рисунком 7.2, разделить на ток, то получим подобный треугольник, катеты которого изображают в определенном масштабе активное R и реактивное $X_p = X_L - X_C$ сопротивления, а гипотенуза является полным сопротивлением Z (рисунок 7.3).

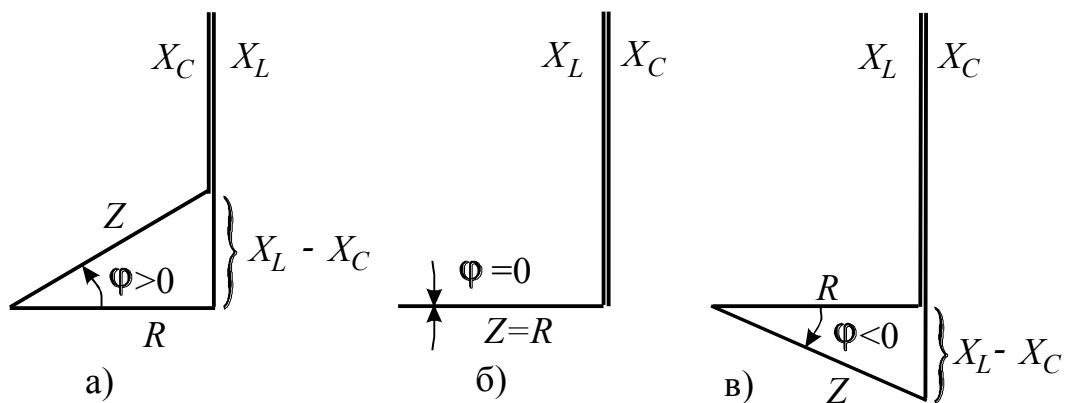


Рисунок 7.3 – Треугольники сопротивлений неразветвленной цепи с R , L и C

Резонанс напряжений - это такой режим работы электрической цепи с последовательным соединением элементов R , L , C , при котором напряжение на входе цепи совпадает по фазе с током.

Условием возникновения резонанса служит равенство реактивных сопротивлений

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (7.15)$$

отсюда резонансная угловая частота

$$\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (7.16)$$

Подставляя вместо угловой частоты ее значение, найдем резонансную частоту цепи

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (7.17)$$

При резонансе напряжений сопротивление любого из реактивных участков цепи

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho, \quad (7.18)$$

принято называть характеристическим (или волновым) сопротивлением.

Полное сопротивление цепи при резонансе напряжений

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2} = R, \quad (7.19)$$

равно активному сопротивлению цепи (рисунок 7.3,б).

Величина тока в цепи при резонансе напряжений достигает максимального значения и совпадает с напряжением по фазе. Таким образом

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{R}. \quad (7.20)$$

При резонансе напряжение на индуктивности $U_{L0} = I\omega_0 L$ и на емкости $U_{C0} = I \frac{1}{\omega_0 C}$, сдвинуты по фазе на угол 180° и равны по величине. Напряжение на зажимах цепи U равно напряжению на активном сопротивлении (рисунок 7.2,б).

Отношение напряжения на зажимах цепи к напряжению на любом из реактивных участков, в режиме резонанса напряжений, равно

$$\frac{U}{U_L} = \frac{U}{U_C} = \frac{IR}{I\omega_0 L} = \frac{IR}{I \frac{1}{\omega_0 C}} = \frac{R}{X_{L0}} = \frac{R}{X_{C0}} = \frac{R}{\rho}, \quad (7.21)$$

отсюда

$$U_{L0} = U_{C0} = U \frac{X_{C0}}{R} = U \frac{X_{L0}}{R} = U \frac{\rho}{R}. \quad (7.22)$$

При $\rho > R$ напряжения U_{L0} и U_{C0} больше приложенного к зажимам цепи напряжения в ρ/R раз. Таким образом, при резонансе напряжений в цепи могут возникать перенапряжения на отдельных участках цепи. Величина, равная отношению ρ/R , называется *добротностью* контура и обозначается буквой Q .

Режим резонанса напряжений в электрической цепи может быть достигнут изменением частоты питающего напряжения или изменением параметров цепи. Для этого надо соответственно изменять частоту питания f , индуктивность L или емкость C . Изменение переменного параметра производят до тех пор, пока не будет выполняться условие $\omega L = 1/\omega C$.

7.2 Описание лабораторной установки

Измерительное оборудование, источники питания и нагрузочные элементы электрических цепей, используемые в лабораторной работе, размещены на лицевой панели универсального стенда, рисунок 7.4.

В качестве источника питания синусоидального напряжения в работе используется генератор низкочастотный ГЗ-123. На панели стенда имеются набор катушек индуктивностей $L_1 - L_4$, батарея емкостей $C_1 - C_4$ и резистор R_1 . Для проведения измерений величины тока используем миллиамперметр М 42300. Для измерения напряжений в качестве вольтметра используется цифровой мультиметр ВР-11А



Рисунок 7.4 – Элементы и измерительные приборы универсального стенда, используемые в лабораторной работе

7.3 Подготовка к работе

7.3.1 Повторите разделы курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в которых рассматривается явление резонанса в линейных электрических цепях синусоидального тока.

7.3.2 Подготовьте бланк отчета лабораторной работы, в котором приведите схемы опытов, необходимые расчетные формулы и таблицу.

7.3.3 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

7.4 Рабочее задание

7.4.1 Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 7.5. Включите в цепь индуктивности L_1 , L_2 и емкости C_1 , C_4 , вращая ручку резистора R_1 , установите ее в крайнее левое положение; миллиамперметр mA_1 переключить на диапазон $\times 3$.

7.4.2 На генераторе ГЗ-123 установите напряжение питания 15 В и частоту $f = 100$ Гц.

7.4.3 После проверки электрической цепи преподавателем включить питание переключателем $П_1$.

Оставляя величины R_1 , L и C неизменными, настройте последовательный колебательный контур в резонанс напряжений, изменяя только частоту генератора ГЗ-123 (в режиме резонанса напряжения величина

тока, измеряемого mA_1 , будет максимальной).

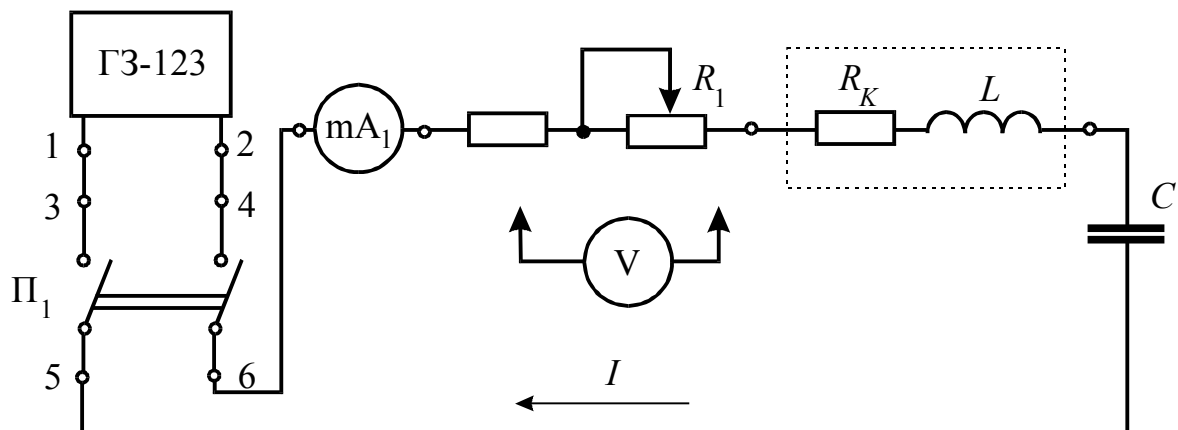


Рисунок 7.5 – Схема электрического последовательного колебательного контура

7.4.4 Проведите измерения напряжения на входе и на всех элементах цепи, величину тока в режиме резонанса ($X_L = X_C$) и резонансную частоту питающего напряжения. Результаты измерений занесите в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты измерений и вычислений

	Измерено						Вычислено								
	U_Γ	U_K	U_{R_1}	U_C	I	f	R_1	R_K	Z_K	X_L	X_C	L	C	Q	
	В	В	В	В	мА	Гц	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	мкФ	-	
$X_L = X_C$															
$X_L < X_C$															
$X_L > X_C$															

7.4.5 Уменьшите частоту генератора от резонансной (не менее чем на 100 Гц) и установите режим работы цепи, при котором $X_L < X_C$. Повторите измерения. Результаты измерений занесите в таблицу 7.1.

7.4.6 Увеличьте частоту генератора от резонансной (не менее чем на 100 Гц) и установите режим работы цепи, при котором $X_L > X_C$. Повторите измерения. Результаты измерений занесите в таблицу 7.1.

7.5 Обработка результатов опытов

7.5.1 По данным таблицы 7.1 вычислите параметры элементов электрической цепи.

Полное активное сопротивление цепи (определяется только из режима резонанса)

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_K = \frac{U_{\Gamma}}{I_0}. \quad (7.23)$$

Сопротивление резистора R_1

$$R_1 = \frac{U_1}{I}. \quad (7.24)$$

Активное сопротивление катушки индуктивности

$$R_K = R_{\Sigma} - R_1. \quad (7.25)$$

Полное сопротивление катушки индуктивности

$$Z_K = \frac{U_K}{I} = \sqrt{R_K^2 + X_L^2}, \quad (7.26)$$

отсюда

$$X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = 2\pi fL. \quad (7.27)$$

Реактивное емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{U_C}{I} = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (7.28)$$

Добротность контура

$$Q = \frac{U_{C0}}{U_{\Gamma}}. \quad (7.29)$$

7.6 Содержание отчета

7.6.1 Цель работы

7.6.2 Схема последовательного колебательного контура, рисунок 7.5.

7.6.3 Расчетные формулы.

7.6.4 Таблица опытных и расчетных данных.

7.6.5 Построенные в масштабе векторные диаграммы тока и напряжений для каждой строки таблицы 6.1.

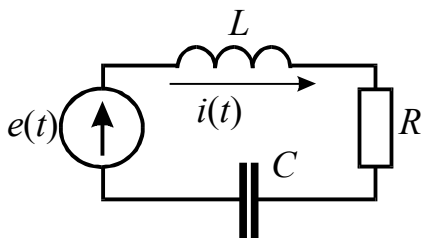
7.6.6 Выводы по работе.

7.7 Контрольные вопросы

7.7.1 Дайте определение режима резонанса напряжений в электрических цепях.

7.7.2 При каком условии в цепи установится резонанс напряжений и к каким последствиям может привести?

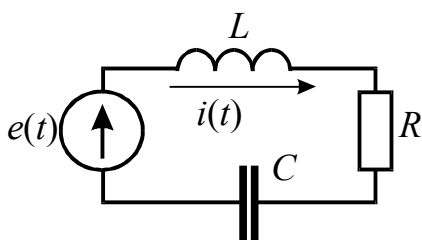
7.7.3 Определите величину емкости C , при которой в изображенной цепи установится резонанс напряжений:



$$\begin{aligned} R &= 40 \text{ Ом}; \\ L &= 100 \text{ мГн}; \\ f_0 &= 50 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

7.7.4 Как определить волновое (характеристическое) сопротивление колебательного контура? От каких параметров оно зависит?

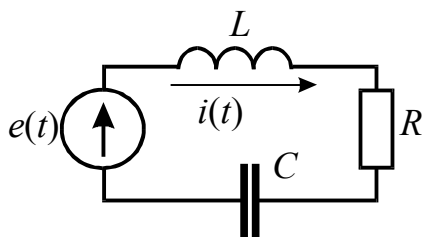
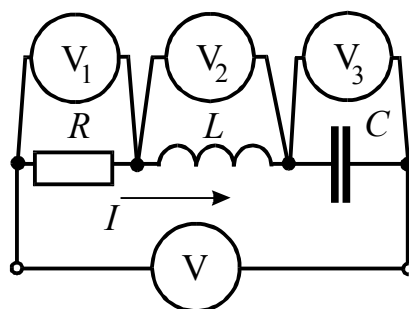
7.7.5 Определите добротность контура электрической цепи, изображенной на рисунке, если



$$\begin{aligned} R &= 20 \text{ Ом}; \\ L &= 50 \text{ мГн}; \\ C &= 5 \text{ мкФ}; \\ f &= 50 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

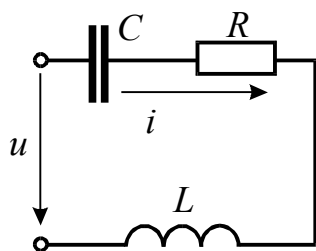
7.7.6 Дайте определение параметров ρ ; f_0 ; Q колебательного контура. Как их определить?.

7.7.8 В электрической цепи, приведенной на рисунке, вольтметры V_1 , V_2 , V_3 показывают по 100 В. Определите показания вольтметра V и величину тока, если $R=20 \text{ Ом}$



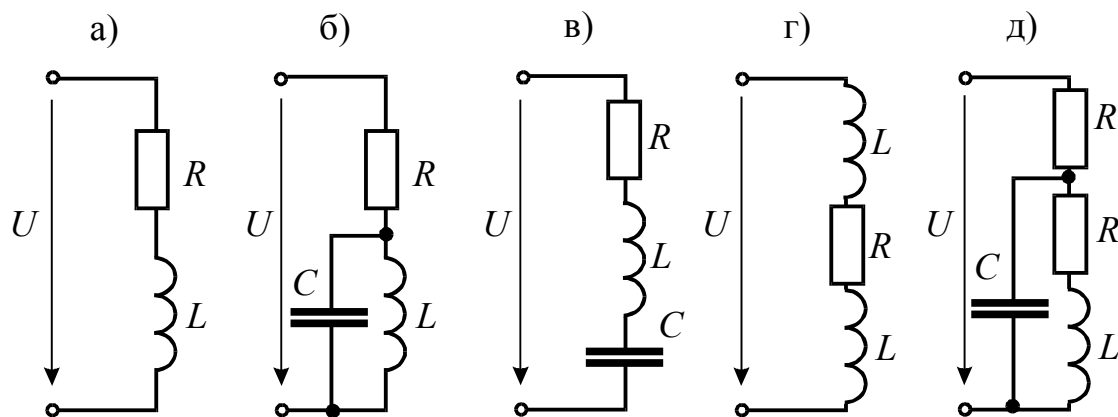
7.7.9 В электрической цепи установлен режим резонанса, потребляемая мощность составляет $P = 100$ Вт. Определите ток в цепи, если $R = 25$ Ом; $L = 20$ мГн; $C = 500$ мкФ.

7.7.10 Напряжение на элементах цепи R , L и C составляют $U_R = 30$ В; $U_L = 20$ В; $U_C = 60$ В. Определите напряжение на входе цепи U .



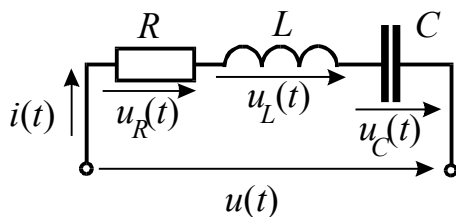
- а) 90 В;
- б) 110 В;
- в) 80 В;
- г) 50 В;
- д) 60 В.

7.7.11 Укажите схему, в которой может возникнуть резонанс напряжений?



7.7.12 Как настроить последовательный колебательный контур в резонанс напряжений?

7.7.13 Определите мгновенное значение напряжения на L при резонансе, если $u = 100 \sin \omega t$; $R = 20$ Ом; $X_C = 10$ Ом.



а) $u_L = \frac{100}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + 90^\circ)$, В;

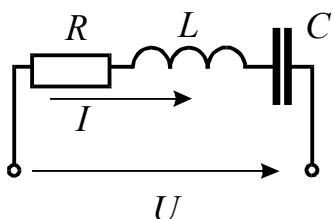
б) $u_L = 10 \sin(\omega t - 45^\circ)$, В;

в) $u_L = 10 \sin(\omega t - 90^\circ)$, В;

г) $u_L = 50 \sin(\omega t + 90^\circ)$, В;

д) $u_L = \frac{100}{\sqrt{2}} \sin \omega t$, В.

7.7.14 Вычислите угловую частоту при резонансе для цепи, приведенной на рисунке, если $R=20$ Ом; $L=20$ мГн; $C=50$ мкФ.



а) 10^2 рад/с;

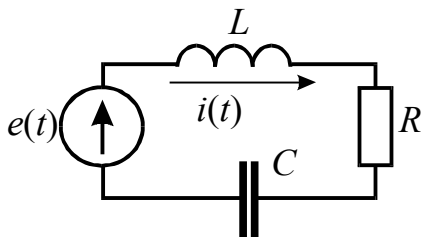
б) $\frac{1}{\sqrt{10^{-7}}}$ рад/с;

в) 10^{-3} рад/с;

г) 10^3 рад/с;

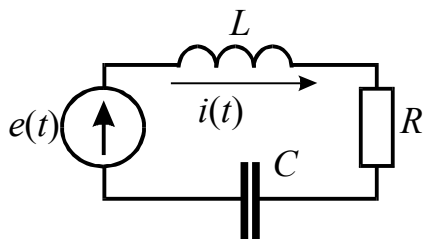
д) $\frac{10^3}{2\pi}$ рад/с.

7.7.15 Определите значение резонансной частоты f_0 для схемы, изображенной на рисунке, если:



$R=50$ Ом;
 $L=100$ мГн;
 $C=10$ мкФ.

7.7.16 Определите волновое сопротивление для схемы, изображенной на рисунке, если



$R=10$ Ом;
 $L=100$ мГн;
 $C=10$ мкФ.

7.7.17 Объясните почему возможно возникновение перенапряжений на отдельных элементах электрической цепи в режиме резонанса напряжений.

7.7.18 Начертите схемы электрических цепей идеального и реального последовательного колебательного контура.

8 Лабораторная работа: Исследование трехфазной цепи при соединении приемников звездой

Цель работы. Изучить трехфазную цепь при соединении нагрузки звездой. Экспериментально подтвердить соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами, научиться строить векторные диаграммы.

8.1 Краткие теоретические и практические сведения

Трехфазная цепь представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол 120° и индуцированные в одном источнике энергии.

Фазой называют участок цепи, по которому протекает один и тот же ток. Токи отдельных участков трехфазных цепей сдвинуты относительно друг друга по фазе.

Совокупности ЭДС (напряжений, токов) в трехфазных цепях называют **трёхфазной системой** ЭДС (напряжений, токов).

В трёхфазной симметричной системе ЭДС (напряжений, токов) три синусоидальных ЭДС (напряжений, токов) одинаковой частоты ω и амплитуды E_m сдвинуты по фазе на $2\pi/3$ рад (120°).

В качестве основного источника электрической энергии в трехфазных цепях используют трехфазные синхронные генераторы. В трех обмотках генератора, называемых фазами и жестко закрепленных так, что их магнитные оси сдвинуты в пространстве друг относительно друга на угол $2\pi/3$, индуцируются три ЭДС – e_A , e_B , e_C , образующие симметричную систему.

Мгновенные значения симметричной системы трёхфазных ЭДС можно записать в следующем виде

$$\begin{cases} e_A = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ e_B = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{cases} \quad (8.1)$$

Графики мгновенных значений симметричной системы ЭДС представлены на рисунке 8.1,а, векторная диаграмма – на рисунке 8.1,б.

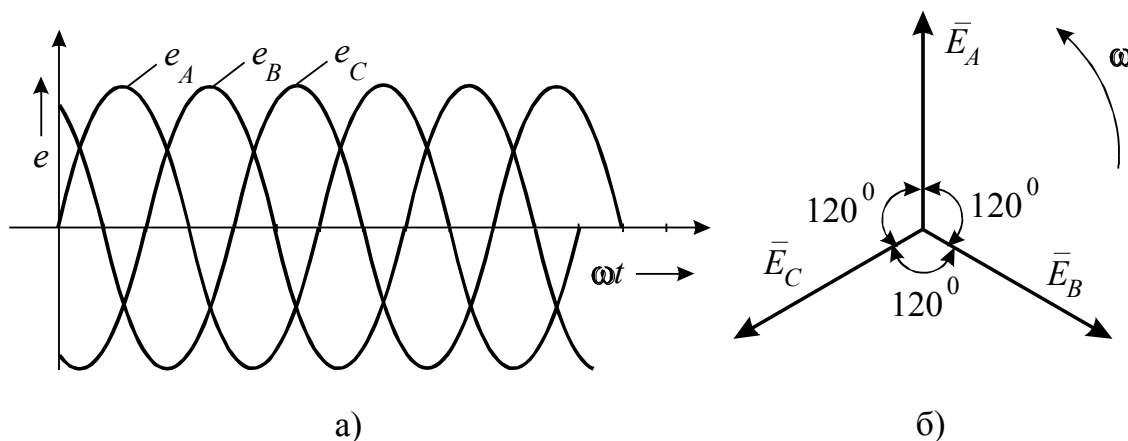


Рисунок 8.1 – Графики мгновенных значений системы ЭДС (а) и векторная (б) диаграммы симметричной трехфазной системы ЭДС

Для симметричной системы ЭДС (напряжений, токов) справедливо соотношение

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (8.2)$$

Каждую обмотку генератора называют **фазой генератора**, напряжения на них – **фазными напряжениями генератора**, токи в них – **фазными токами генератора**.

Каждую нагрузку называют **фазой нагрузки**, напряжения на них – **фазными напряжениями нагрузки**, токи в них – **фазными токами нагрузки**.

Провода, соединяющие генератор и нагрузку, называют **линейными проводами**. Токи, текущие по линейным проводам, называют **линейными**. **Линейное напряжение** – это напряжение между линейными проводами.

При соединении звездой точку, в которой объединены три обмотки генератора, называют **нулевой точкой генератора**, точку, в которой

объединены три конца трёхфазной нагрузки, **нулевой точкой нагрузки**. Провод, соединяющий нулевые точки генератора и нагрузки, называется **нулевым или нейтральным проводом**, ток в нем – **током нулевого провода**. Напряжение между нулевыми точками называется **напряжением смещения нейтрали**.

Трёхфазная цепь и трёхфазная нагрузка называются **симметричными**, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы. В противном случае их называют несимметричными.

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c. \quad (8.3)$$

или

$$Z_a = Z_b = Z_c; \quad \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c. \quad (8.4)$$

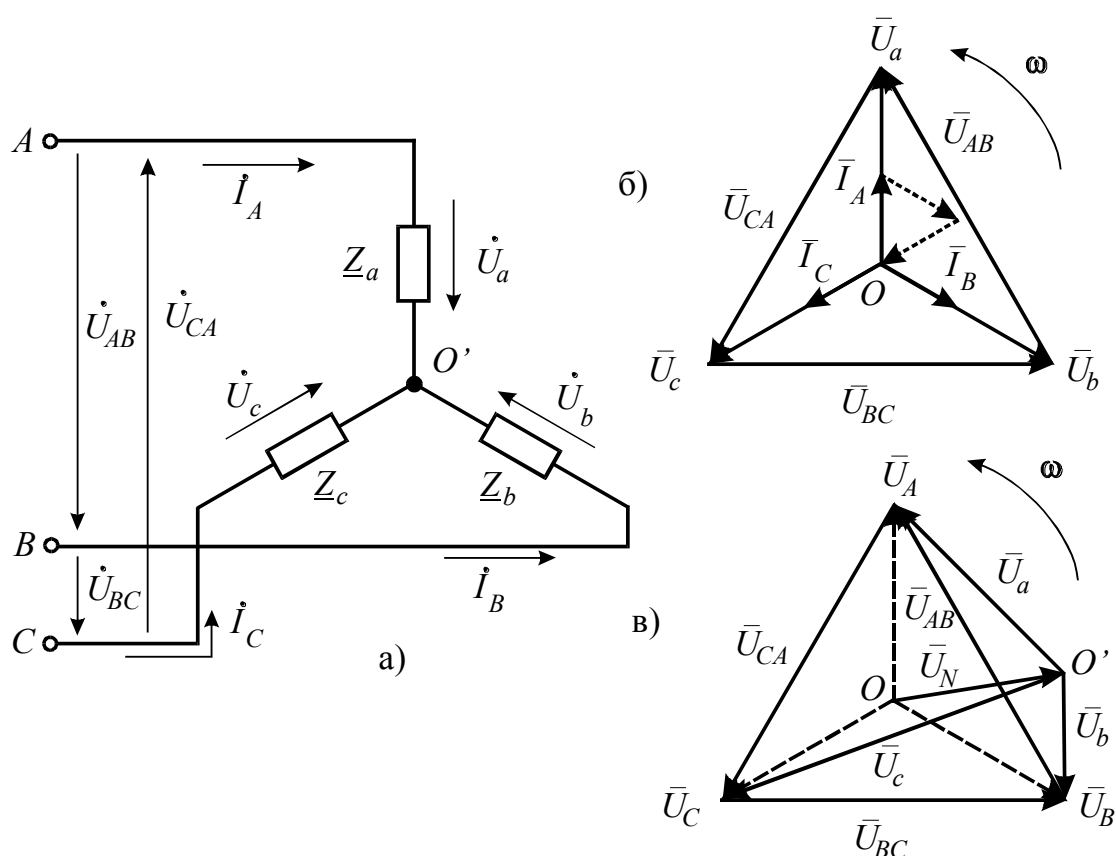


Рисунок 8.2 – Схема соединений (а) и векторные диаграммы трехпроводной трехфазной цепи при соединении приемников звездой при симметричной (б) и несимметричной (в) нагрузках

Если к симметричной трехфазной цепи приложена симметричная трехфазная система напряжений генератора, то в ней будет иметь место симметричная система токов. Режим работы трехфазной цепи, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны, называется **симметричным режимом**.

На рисунке 8.2,а представлена схема соединения приемников звездой в трехфазной цепи синусоидального тока. К началам фаз приемников подводят линейные провода, концы фаз приемников соединяют в общую нулевую точку, которая может быть подсоединена к нулевой точке генератора.

При данной схеме соединения приемников, очевидно, что

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}. \quad (8.5)$$

Для определения соотношения между фазными и линейными напряжениями применяем второй закон Кирхгофа к контурам $AO'BA$, $BO'CB$, $CO'AC$ (рисунок 8.2,а) в соответствии с которым

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \quad (8.6)$$

Если пренебречь сопротивлениями линейных и нейтрального проводов сети, то фазные напряжения приемника будут равны фазным напряжениям источника. Имея векторы фазных напряжений $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$ и пользуясь соотношениями (8.6), построим векторы линейных напряжений $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$ в соответствии с рисунком 8.2,б.

Очевидно, что в этом случае фазные и линейные напряжения нагрузки образуют симметричную систему векторов, где справедливо соотношение

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}. \quad (8.7)$$

На основании первого закона Кирхгофа для узла O' справедливо уравнение

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (8.8)$$

Если сопротивление нейтрального провода $Z_N \neq 0$, тогда между нейтральными точками источника и нагрузки возникнет напряжение, которое можно определить по методу двух узлов

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (8.9)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – комплексы фазных напряжений источника;

$\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$ – комплексы проводимостей фаз нагрузки и нейтрального провода.

Фазные напряжения нагрузки будут определяться

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_N. \quad (8.10)$$

При симметричной нагрузке $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}_\phi$, поэтому из (8.9) получим

$$\dot{U}_N = \frac{\underline{Y}_\phi \cdot (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{3 \cdot \underline{Y}_\phi + \underline{Y}_N} = 0, \quad (8.11)$$

т.к. фазные напряжения источника образуют симметричную систему векторов и их векторная сумма равна нулю. Тогда из (8.10) следует, что фазные напряжения источника будут равны фазным напряжениям нагрузки. Исходя из уравнений (8.6), строим векторы линейных напряжений (рисунок 8.2,б), которые образуют симметричную систему векторов.

Токи нагрузки так же образуют симметричную систему, ток в нейтральном проводе равен нулю. Если отключить нейтральный провод, то получают трехпроводную трехфазную цепь.

Включение несимметричной нагрузки в трехпроводную трехфазную цепь (т.е. при отсутствии нейтрального провода) приведет к возникновению напряжения смещения $\dot{U}_N$, следовательно (8.10) фазные напряжения нагрузки будут образовывать несимметричную систему, рисунок 8.2,в. Соотношение (8.7) между фазными и линейными напряжениями нарушится. Положение точки O' на диаграмме зависит от сочетания величин и характеров фазных

сопротивлений нагрузки в звезде. Напряжение $\dot{U}_N$ может изменяться в широких пределах.

Для восстановления равенства фазных напряжений при несимметричной нагрузке фаз необходимо подключить четвертый (нейтральный) провод, при этом получают четырехпроводную трехфазную цепь, рисунок 8.3,а. В четырехпроводной трехфазной цепи при любой нагрузке фаз справедливо соотношение (8.7), а в трехпроводной трехфазной – только при симметричной нагрузке. Ток в нулевом проводе в четырехпроводной трехфазной цепи при несимметричной нагрузке определяется выражением (8.8) или геометрической суммой векторов фазных токов, в соответствии с рисунком 8.3,б.

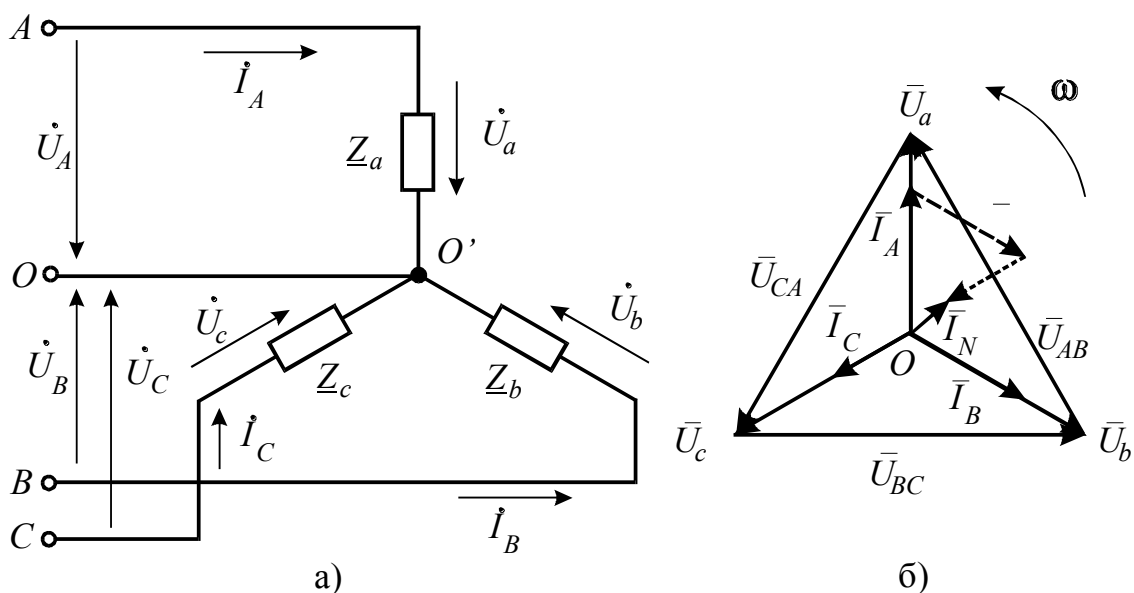


Рисунок 8.3 – Схема соединений (а) и векторная диаграмма токов и напряжений (б) четырехпроводной трехфазной цепи при соединении приемников звездой

В случае обрыва одной из фаз (разрыв внутри приемника или обрыв линейного провода) в трехпроводной системе, например фазы C , две другие фазы оказываются включенными последовательно на линейное напряжение U_{AB} . При одинаковом сопротивлении этих фаз на каждую из них вместо фазного напряжения придется половина линейного напряжения U_{AB} , что составляет 87 % от напряжения при нормальном режиме (рисунок 8.4,а).

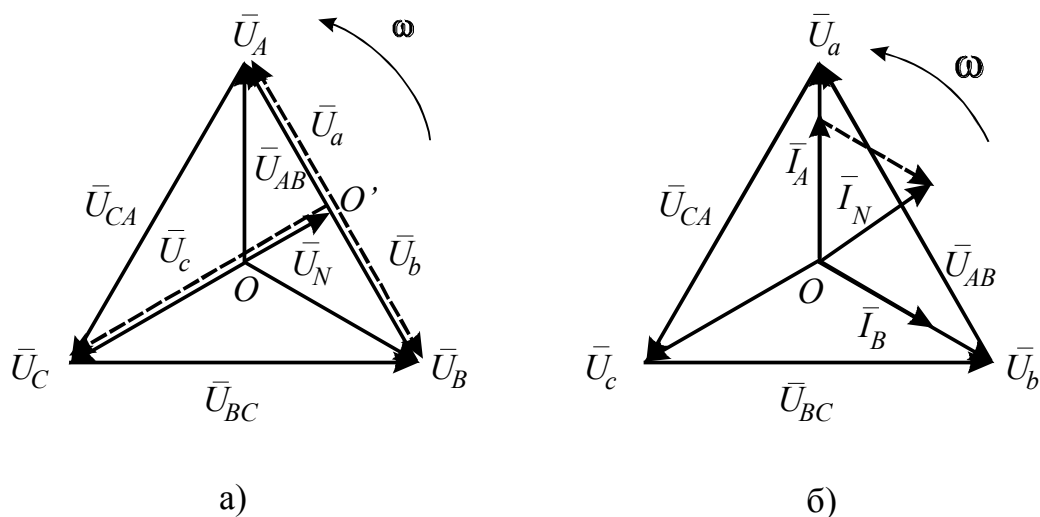


Рисунок 8.4 – Векторные диаграммы токов и напряжений трехпроводной (а) и четырехпроводной (б) трехфазной цепи при обрыве фазы C

В четырехпроводной цепи обрыв одной из фаз не влияет на другие фазы (рисунок 8.4,б).

Для определения мощностей используют нижеприведенные выражения

Активные мощности фаз:

$$P_a = U_a \cdot I_a \cdot \cos \varphi_a; \quad P_b = U_b \cdot I_b \cdot \cos \varphi_b; \quad P_c = U_c \cdot I_c \cdot \cos \varphi_c. \quad (8.12)$$

Реактивные мощности фаз:

$$Q_a = U_a \cdot I_a \cdot \sin \varphi_a; \quad Q_b = U_b \cdot I_b \cdot \sin \varphi_b; \quad Q_c = U_c \cdot I_c \cdot \sin \varphi_c. \quad (8.13)$$

Для трехфазной нагрузки при соединении звездой активная и реактивная мощности определяются в соответствии с формулами:

$$P_{\Sigma} = P_a + P_b + P_c; \quad Q_{\Sigma} = \pm Q_a \pm Q_b \pm Q_c. \quad (8.14)$$

Для индуктивной нагрузки $Q \geq 0$, для емкостной нагрузки $Q \leq 0$.

В случае симметричной нагрузки

$$P_{\Sigma} = 3 \cdot P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cos \varphi; \quad Q_{\Sigma} = 3 \cdot Q_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \sin \varphi. \quad (8.15)$$

8.2 Описание лабораторной установки

Элементы трехфазной электрической цепи и измерительное оборудование, используемые в лабораторной работе, показаны на рисунке 8.5.



Рисунок 8.5 – Элементы и приборы, используемые в лабораторной работе

На лицевую панель стенда выведены клеммы фаз «А», «В», «С» трехфазного источника питания.

В качестве нагрузки используются переменные резисторы R_1 , R_2 , R_3 . Для измерения токов предназначены миллиамперметры типа М 42300, а для измерения напряжений – цифровой мультиметр ВР-11А.

8.3 Подготовка к работе

8.3.1 Повторите раздел курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в котором изложена теория трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки звездой.

8.3.2 Подготовьте бланк отчета лабораторной работы, в котором приведите схему опытов, необходимые расчетные формулы и таблицу.

8.3.3 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

8.4 Рабочее задание

8.4.1 Соберите четырехпроводную трехфазную цепь, изображенную на рисунке 8.6. Движки резисторов $R_1 - R_3$ переведите в средние положения, миллиамперметры $mA_1 - mA_4$ переключить на диапазон $\times 3$.

8.4.2 После проверки электрической цепи преподавателем подключите ее к источнику трехфазного напряжения. Установите поочередно следующие режимы работы трехфазной цепи: симметричную, несимметричную нагрузки и обрыв одной из фаз нагрузки. Для каждого из режимов работы проведите

измерения фазных токов, тока в нейтральном проводе, фазных и линейных напряжений. Результаты измерений занесите в таблицу 8.1. Отключите питание.

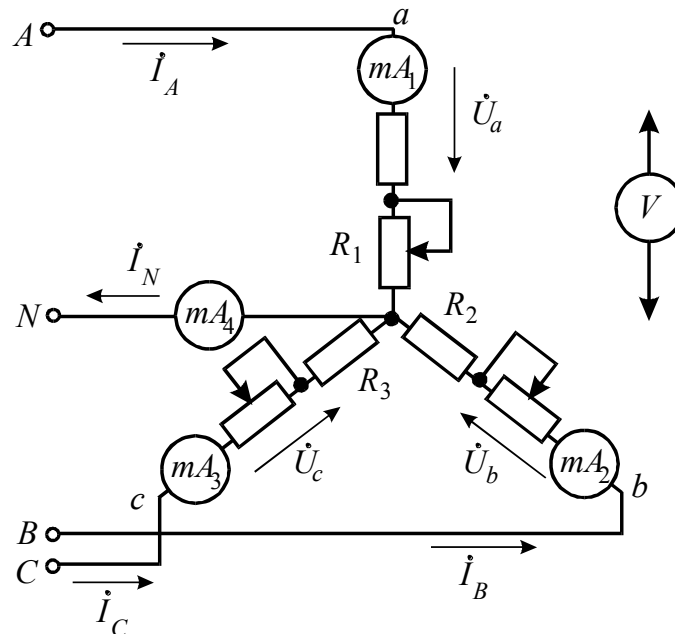


Рисунок 8.6 – Электрическая схема первого опыта

8.4.3 Отсоедините нейтральный провод и повторите измерения для каждого из режимов фазных токов, фазных и линейных напряжений и напряжения смещения нейтрали. Результаты измерений занесите в таблицу 8.1.

8.5 Обработка результатов опытов

8.5.1 Вычислите активные мощности каждой фазы и активную мощность трехфазного приемника, используя формулы (8.12), (8.14), (8.15). Результаты вычислений свести в таблицу 9.1.

8.5.2 По результатам эксперимента постройте в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследуемых режимов работы трехфазной цепи.

8.6 Содержание отчета

8.6.1 Цель работы

8.6.2 Схема в соответствии с рисунком 8.6.

Таблица 8.1 – Результаты измерений и вычислений опытов

№ п/п	Линия	Нагрузка	Измерено										Вычислено				
			U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_a	U_b	U_c	I_A	I_B	I_C	I_N	U_N	P_a	P_b	P_c	P_Σ
			В	В	В	В	В	В	В	мА	мА	мА	В	Вт	Вт	Вт	Вт
1	четырёхпроводная	симметричная															
2		несимметричная															
3		обрыв фазы															
4	трёхпроводная	симметричная															
5		несимметричная															
6		обрыв фазы															

8.6.3 Расчетные формулы.

8.6.4 Таблица 8.1 опытных и расчетных данных.

8.6.5 Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные в масштабе.

8.6.6 Выводы по работе.

8.7 Контрольные вопросы

8.7.1 Дайте определение трехфазного напряжения (трехфазной системы ЭДС).

8.7.2 Что называется трехфазной цепью?

8.7.3 Что называется фазой трехфазной цепи?

8.7.4 Какое устройство вырабатывает трехфазную систему ЭДС?

8.7.5 Какая система ЭДС (напряжений, токов) называется симметричной, а какая несимметричной?

8.7.6 Назовите главное свойство симметричной системы ЭДС (напряжений, токов).

8.7.7 Какое чередование фаз называется прямым, а какое – обратным?

8.7.8 К чему приводит неправильное подключение чередования фаз?

8.7.9 Что называется фазой генератора?

8.7.10 Что называется фазой нагрузки?

8.7.11 Какая трехфазная цепь называется симметричной?

8.7.12 Какое напряжение называется фазным напряжением генератора, фазным напряжением нагрузки? Как их измерить?

8.7.13 Какое напряжение называется линейным напряжением? Как измерить линейные напряжения?

8.7.14 Какие соотношения между фазными и линейными напряжениями, между фазными и линейными токами существуют в схеме трехфазной цепи – «звезда»?

8.7.15 Какие соотношения между фазными и линейными напряжениями, между фазными и линейными токами существуют в схеме трехфазной цепи –

«треугольник»?

8.7.16 Какое напряжение называется напряжением смещения нейтрали, как его измерить?

8.7.17 Между какими точками трехфазной цепи включается нулевой провод?

8.7.18 В каких случаях ток нулевого провода будет равным нулю?

8.7.19 Зачем нужен нулевой провод? К чему приводит его обрыв?

8.7.20 Порядок построения векторной диаграммы в трехфазной цепи – «звезда-звезда с нулевым проводом».

8.7.21 Порядок построения векторной диаграммы в трехфазной цепи «звезда-звезда».

8.7.22 Что такое перекося фаз? Объясните на векторной диаграмме.

8.7. 23 В какой из исследуемых схем фазы работают независимо друг от друга?

8.7. 24 Под каким напряжением окажутся неповрежденные фазы при обрыве линейного провода в схеме «звезда-звезда»?

8.7.25 Под каким напряжением окажутся неповрежденные фазы при коротком замыкании фазы нагрузки в схеме «звезда-звезда»?

8.7.26 Как рассчитать активную мощность в симметричной и несимметричной трехфазной цепи?

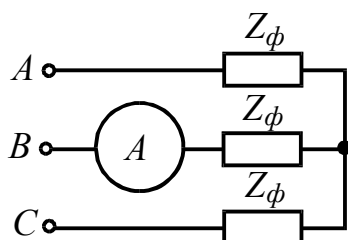
8.7.27 Симметричная нагрузка соединена звездой. Линейные напряжение и ток равны 380 В и 10 А. Чему равны фазные напряжение и ток? Укажите правильный ответ.

а) 380 В, $\frac{10}{\sqrt{3}}$ А;

б) 220 В, 10 А;

в) 127 В, $10\sqrt{3}$ А;

г) 190 В, 14 А.



8.7.28 Симметричный трехфазный приемник подключен к трехфазному источнику. Что покажет амперметр, если $U_{\text{л}}=380$ В, $Z_{\phi}=11$ Ом.

9 Лабораторная работа: Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

Цель работы. Изучить трехфазную цепь при соединении нагрузки треугольником. Экспериментально подтвердить соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами, научиться строить векторные диаграммы.

9.1 Краткие теоретические и практические сведения

Под трёхфазной симметричной системой ЭДС (напряжений, токов) понимают совокупность трёх синусоидальных ЭДС (напряжений, токов) одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120° .

При соединении приемников трехфазной системы треугольником конец каждой предыдущей фазы приемника соединяется с началом последующей, а к вершинам образовавшегося таким образом треугольника подводятся линейные провода.

На рисунке 9.1 приведена схема трехфазной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки треугольником.

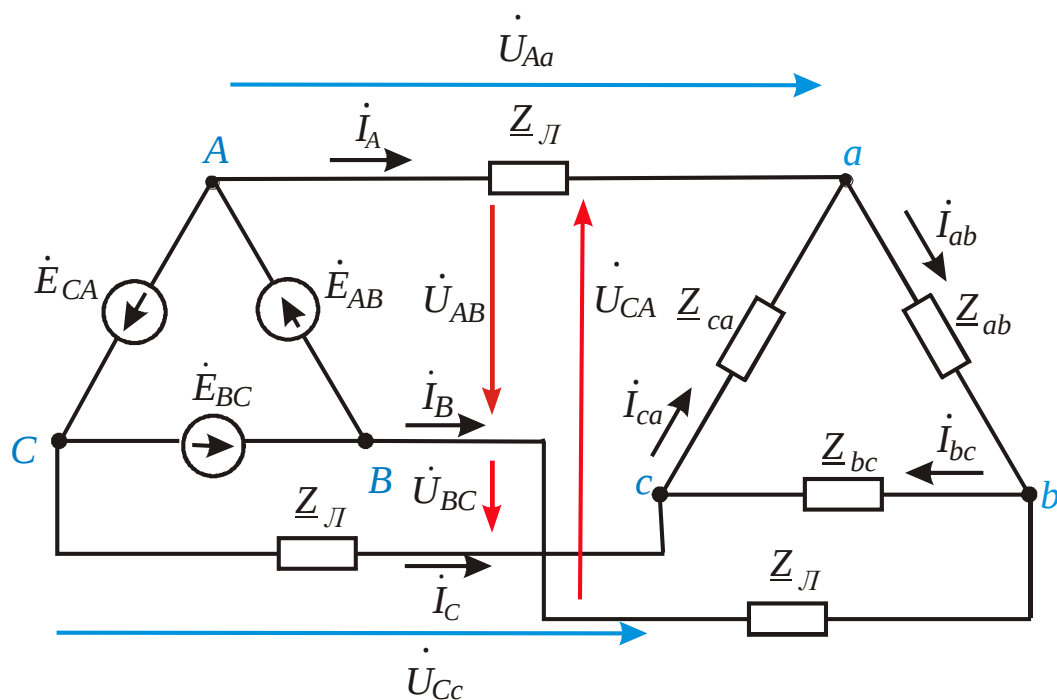


Рисунок 9.1

Работу трехфазной цепи в схеме соединения «треугольник –

треугольник» характеризуют следующие **напряжения**, обозначенные на рисунке 9.1:

- фазные (линейные) напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$;
- фазные (линейные) напряжения нагрузки $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$;
- падения напряжения в линейных проводах $\dot{U}_{Aa}, \dot{U}_{Bb}, \dot{U}_{Cc}$.

При соединении фаз треугольником соответствующие фазные и линейные напряжения равны:

$$\dot{U}_л = \dot{U}_ф . \quad (9.1)$$

Токи в схеме соединения «треугольник – треугольник», обозначенные на рисунке 9.1:

- фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$;
- линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

Между собой линейные и фазные токи связаны соотношениями

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Для симметричного режима работы трехфазной цепи **модули** линейного и фазного токов отличаются друг от друга в $\sqrt{3}$ раз

$$I_л = \sqrt{3} \cdot I_ф . \quad (9.3)$$

Если полные сопротивления всех фаз приемника одинаковы ($R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$ и $X_{ab} = X_{bc} = X_{ca}$), то фазные токи во всех фазах тоже будут одинаковы и сдвинуты относительно напряжений своих фаз на одинаковый угол. Тогда при симметричной системе ЭДС получится также симметричная система токов в соответствии с рисунком 9.2,б.

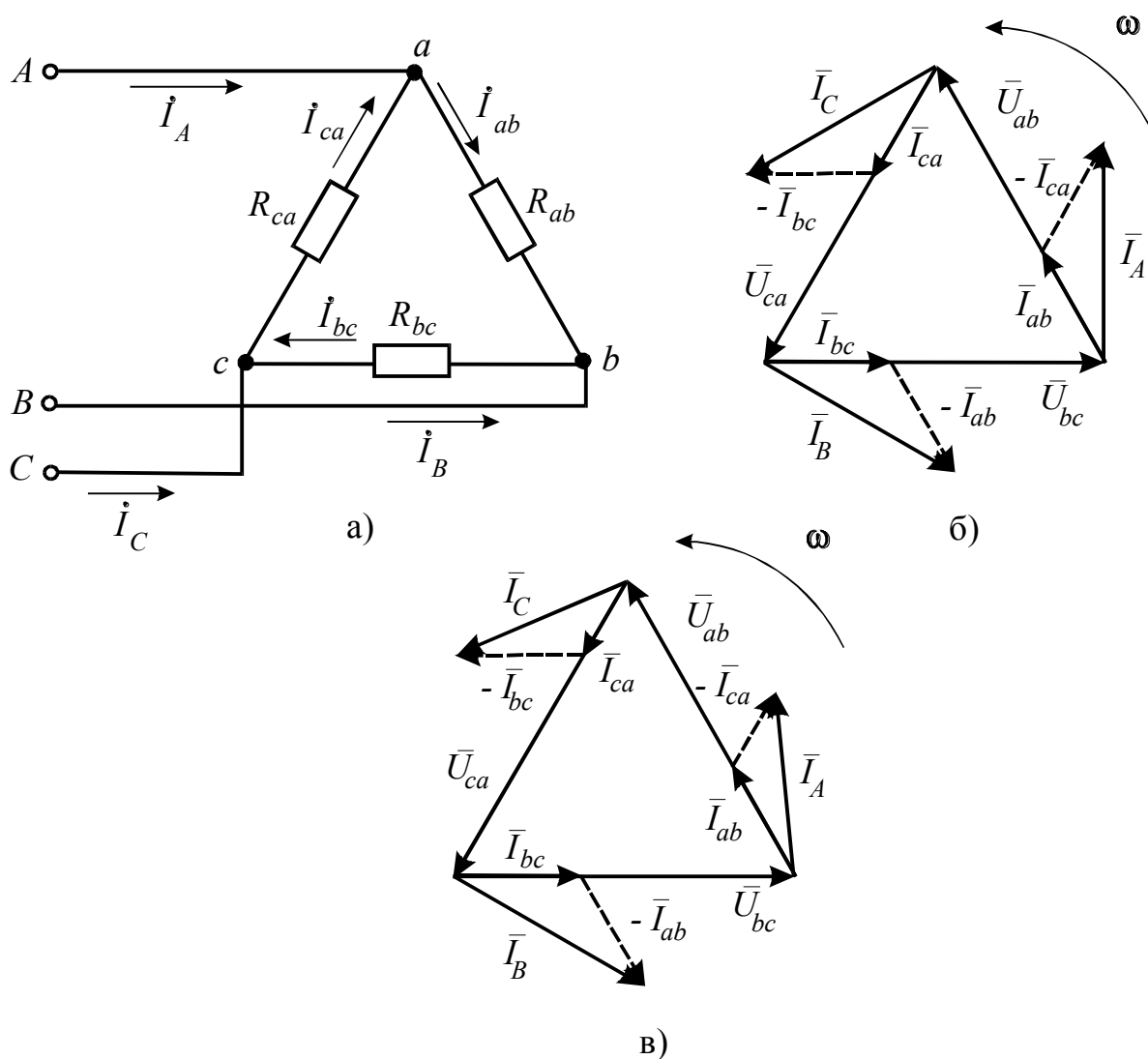


Рисунок 9.2 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником (а) и векторные диаграммы при симметричной (б) и несимметричной (в) нагрузках

При несимметричной нагрузке фаз симметрия токов в трехфазной системе с соединением нагрузки треугольником будет нарушена. Линейные токи в этом случае определяются графически (рисунок 9.2,в) по векторным соотношениям (9.2).

Рассмотрим два аварийных режима работы трехфазной цепи: обрыв одной фазы нагрузки и обрыв одного линейного провода.

При обрыве фазы *са* (рисунок 9.3,а), режим работы двух других фаз не нарушается, так как на них по-прежнему подаются соответствующие линейные напряжения. Для построения векторной диаграммы (рисунок 9.3,б) используем

выражения (9.2), учитывая равенство нулю тока фазы, в которой произошел обрыв.

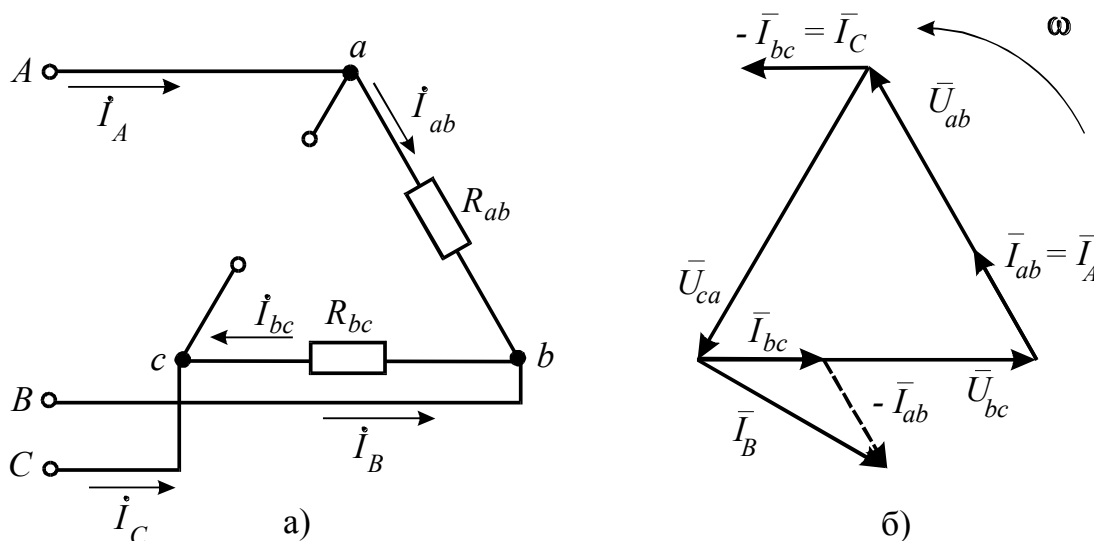


Рисунок 9.3 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) при обрыве фазы нагрузки ca

При обрыве линейного провода C (рисунок 9.4,а), режим работы одной фазы (в данном случае фазы ab) не изменится, а две оставшиеся будут включены последовательно на линейное напряжение. Трехфазная цепь преобразовалась в однофазную с двумя параллельными ветвями. Векторная диаграмма, показана на рисунке 9.4,б.

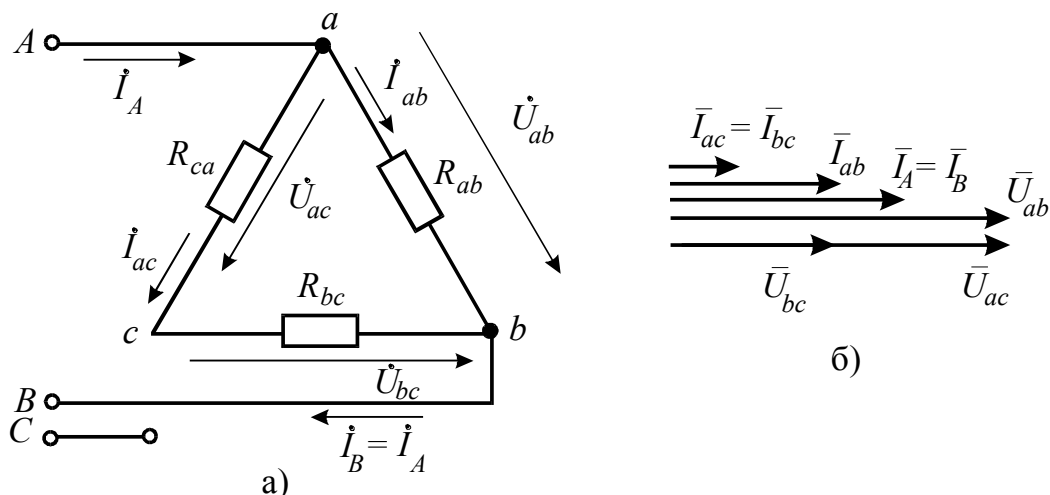


Рисунок 9.4 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) при обрыве линейного провода C

Активные, реактивные и полные мощности фаз нагрузки могут быть

определены

$$\begin{aligned} P_{ab} &= U_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \cos \varphi_{ab}; & P_{bc} &= U_{bc} \cdot I_{bc} \cdot \cos \varphi_{bc}; \\ P_{ca} &= U_{ca} \cdot I_{ca} \cdot \cos \varphi_{ca}, \end{aligned} \quad (9.4)$$

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= U_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \sin \varphi_{ab}; & Q_{bc} &= U_{bc} \cdot I_{bc} \cdot \sin \varphi_{bc}; \\ Q_{ca} &= U_{ca} \cdot I_{ca} \cdot \sin \varphi_{ca}, \end{aligned} \quad (9.5)$$

$$S_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}; \quad S_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc}; \quad S_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca}. \quad (9.6)$$

Активные и реактивные мощности трехфазного приемника определяются по формулам:

$$P_{\Sigma} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}; \quad Q_{\Sigma} = \pm Q_{ab} \pm Q_{bc} \pm Q_{ca}. \quad (9.7)$$

9.2 Описание лабораторной установки

Элементы трехфазной электрической цепи и измерительное оборудование, используемые в лабораторной работе, показаны на рисунке 9.5.



Рисунок 9.5 – Элементы и приборы, используемые в лабораторной работе

На лицевую панель стенда выведены клеммы фаз «А», «В», «С» трехфазного источника питания.

В качестве нагрузки используются переменные резисторы R_1 , R_2 , R_3 . Для измерения токов предназначены миллиамперметры типа М 42300, а для измерения напряжений – цифровой мультиметр BP-11A.

9.3 Подготовка к работе

9.3.1 Повторите раздел курса «Теоретические основы электротехники и электроника», в котором изложена теория трехфазных электрических цепей при соединении нагрузки треугольником.

9.3.2 Подготовьте бланк отчета лабораторной работы, в котором приведите схему опытов, необходимые расчетные формулы и таблицу.

9.3.3 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

9.4 Рабочее задание

9.4.1 Соберите трехфазную цепь в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 9.6. Установить движки резисторов $R_1 - R_3$ в средние положения, миллиамперметры $mA_1 - mA_4$ переключить на диапазон $\times 3$. Миллиамперметр mA_4 включается поочередно в разрыв провода между точками А-а, В-б, С-с для измерения линейных токов. При проведении переключений электрическая цепь отключается от питания.

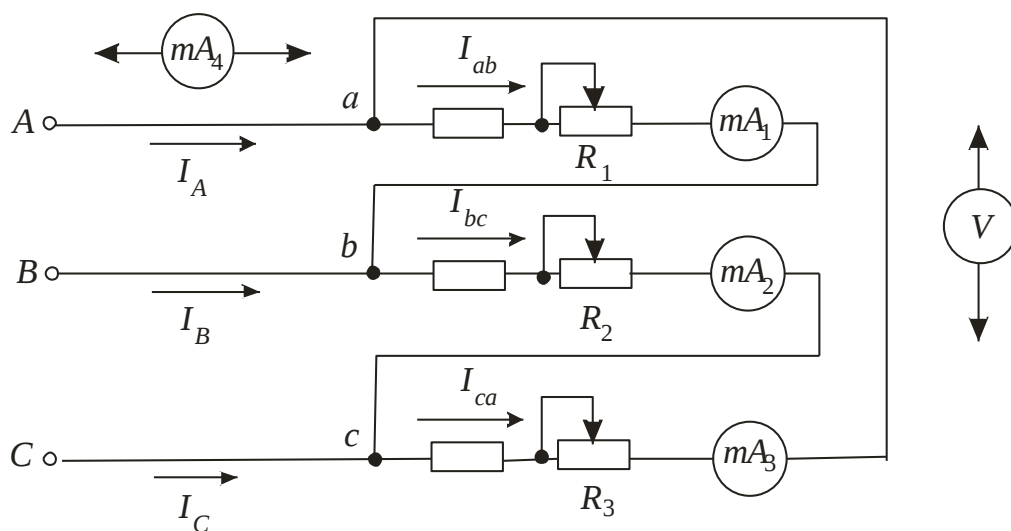


Рисунок 9.6 – Электрическая схема опыта

9.4.2 После проверки электрической цепи преподавателем включите источник питания.

9.4.3 Вращая движки резисторов, установите симметричную нагрузку трехфазного приемника и измерьте фазные напряжения, фазные и линейные токи. Результаты измерений занесите в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Результаты измерений и вычислений

№ опыта	Режим работы цепи	Измерено										Вычислено			
		U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C	P_Σ	
		В	В	В	мА	мА	мА	мА	мА	мА	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт
1	симметричная нагрузка														
2	несимметричная нагрузка														
3	обрыв фазы при симметричной нагрузке														
4	обрыв линейного провода при симметричной нагрузке														

9.4.4 Изменяя движком величину одного из сопротивлений, установите несимметричную нагрузку трехфазного приемника, повторите измерения. Результаты измерений занесите в таблицу 9.1.

9.4.5 Переключателем в фазе ab разорвите фазу с резистором R_1 . Повторите измерения. Результаты измерений занесите в таблицу 9.1. Восстановите соединение в фазе ab . Отключите питание.

9.4.6 Обрыв одного из линейных проводов проводят отключением одного из линейных проводов от клеммы питания. После проверки схемы преподавателем, включите питание и проведите измерения. Результаты измерений занесите в таблицу 9.1.

9.5 Обработка результатов опытов

9.5.1 Вычислите активные мощности отдельных фаз и активную мощность трехфазного приемника. Данные расчетов занесите в таблицу 9.1.

9.5.2 Соблюдая масштаб, постройте векторные диаграммы токов и напряжений для всех проведенных опытов.

9.6 Содержание отчета

9.6.1 Цель работы

9.6.2 Схема в соответствии с рисунком 8.5.

9.6.3 Расчетные формулы.

9.6.4 Таблица 8.1 опытных и расчетных данных.

9.6.5 Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные в масштабе.

9.6.6 Выводы по работе.

9.7 Контрольные вопросы

9.7.1 Дайте определение симметричной трехфазной системой ЭДС. Каково основное свойство такой системы ЭДС?

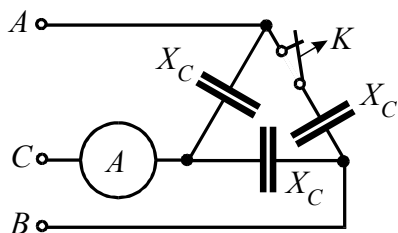
9.7.2 Что понимают под «фазой» в трехфазной электрической цепи?

9.7.3 Как соединяются фазы нагрузки при соединении трехфазного

приемника треугольником?

9.7.4 Трехфазная симметричная нагрузка соединена треугольником. Линейное напряжение равно 380 В, фазный ток – 10 А. Определите фазное напряжение и линейный ток.

9.7.5 Что покажет амперметр после размыкания ключа K , если $U_{\text{Л}}=127$ В; $X_C=10$ Ом?

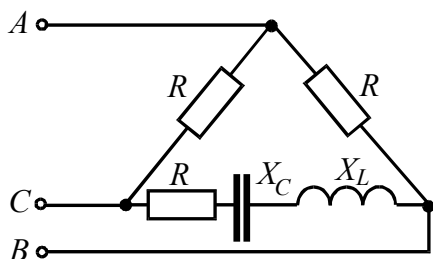


- а) 0;
- б) 7,25 А;
- в) 12,7 А;
- г) $12,7\sqrt{3}$ А;
- д) 25,4 А.

9.7.6 Трехфазный приемник симметричен, если его сопротивления равны:

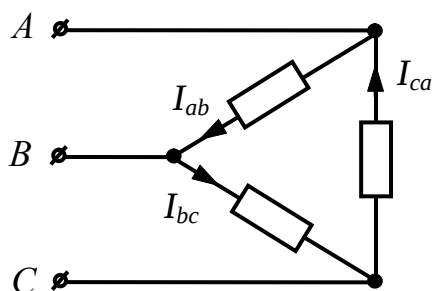
- а) $\underline{Z}_{ab}=5$; $\underline{Z}_{bc}=3+j4$; $\underline{Z}_{ca}=3-j4$;
- б) $\underline{Z}_{ab}=5$; $\underline{Z}_{bc}=5 \cdot e^{-j60^\circ}$; $\underline{Z}_{ca}=5 \cdot e^{j60^\circ}$;
- в) $\underline{Z}_{ab}=5-j2$; $\underline{Z}_{bc}=5-j2$; $\underline{Z}_{ca}=5-j2$;
- г) $\underline{Z}_{ab}=5 \cdot e^{j30^\circ}$; $\underline{Z}_{bc}=10 \cdot e^{j30^\circ}$; $\underline{Z}_{ca}=15 \cdot e^{j30^\circ}$.

9.7.7 Определите реактивную мощность трехфазной цепи, если $R=6$ Ом; $X_L=10$ Ом; $X_C=2$ Ом; $U_{\text{Л}}=100$ В.



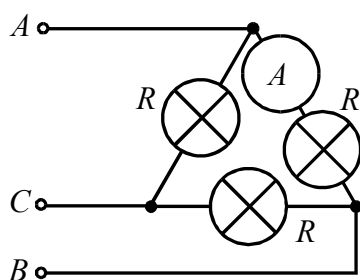
- а) 1800 ВАр;
- б) 1400 ВАр;
- в) 1200 ВАр;
- г) 1000 ВАр;
- д) 800 ВАр.

9.7.8 Фазные токи симметричного трехфазного потребителя равны $I_{ab}=I_{bc}=I_{ca}=4$ А. Каким будет ток I_{ab} , если провод А оборван?



- 1) 4 А
- 2) 6,9 А
- 3) 2 А.

9.7.9 Что покажет амперметр после перегорания лампы в фазе СА, если $U_{\text{Л}}=380 \text{ В}$; $R=200 \text{ Ом}$.



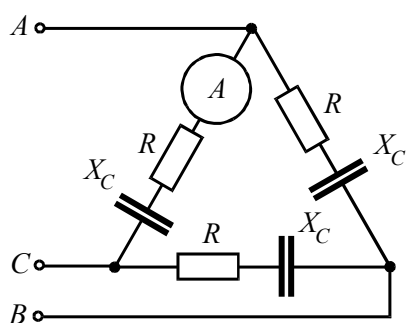
- а) 0;
- б) 0,95 А;
- в) 1,9 А;
- г) 2,2 А;
- д) 3,8 А.

9.7.10 Запишите формулы соотношений между линейными и фазными напряжениями и токами в несимметричной трехфазной цепи при соединении источника и приемника треугольником.

9.7.11 Как изменится активная мощность симметричного трехфазного приемника при переключении его фаз со звезды на треугольник?

9.7.12 Определите коэффициент мощности трехфазного симметричного приемника, соединенного треугольником, если его фазное напряжение $U_{\phi}=380 \text{ В}$, линейный ток 10 А и потребляемая мощность $P_{\phi}=5,26 \text{ кВт}$.

9.7.13 Что покажет амперметр после перегорания предохранителя в линейном проводе А, если $U_{\text{Л}}=220 \text{ В}$; $R=6 \text{ Ом}$; $X_C=8 \text{ Ом}$.



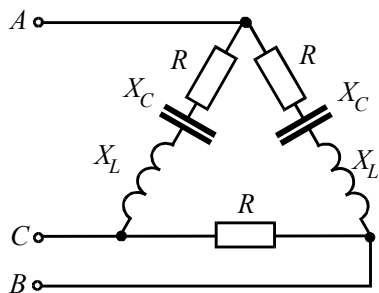
- а) 0;
- б) 11 А;
- в) 12,7 А;
- г) 22 А;
- д) 25,4 А.

9.7.14 Трехфазная симметричная нагрузка соединена треугольником. Фазное напряжение равно 220 В, линейный ток 17,3 А. Чему равны линейное напряжение и фазный ток?

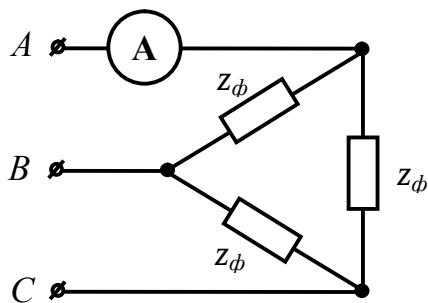
9.7.15 Трехфазный двигатель с напряжением 127 В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением 380 В. Как следует соединить обмотки двигателя?

- 1) звездой;
- 2) треугольником;
- 3) двигатель нельзя включать в эту сеть;
- 4) звездой с нейтралью.

9.7.16 Определите активную мощность трехфазного приемника, если $I_A = 17,3 \text{ A}$; $R = X_C = X_L = 10 \text{ Ом}$.

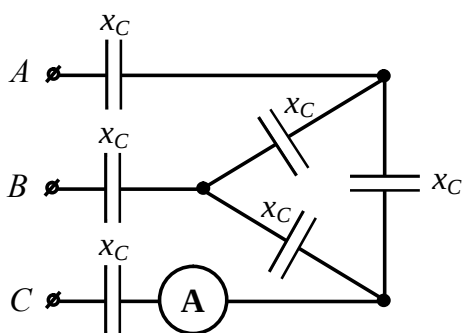


- а) 519 Вт;
- б) 1000 Вт;
- в) 1730 Вт;
- г) $1000\sqrt{3}$ Вт;
- д) 3000 Вт.



9.7.17 Система синусоидальных линейных напряжений питающей сети симметрична. Определить показания амперметра, если известно, что $U_L = 100 \text{ В}$, $Z_\phi = 10 \text{ Ом}$.

- 1) 10 А
- 2) 5,8 А
- 3) 17,3 А.



9.7.18 К трехфазной цепи приложена симметричная система линейных напряжений $U_L = 380 \text{ В}$, $X_C = 30 \text{ Ом}$. Что покажет амперметр?

- 1) 12,66 А
- 2) 5,5 А
- 3) 6,11 А.

Список использованных источников

1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов "Электротехника, электромеханика и электротехнологии", "Электроэнергетика", "Приборостроение" / Л. А. Бессонов.- 11-е изд., перераб. и доп. - Москва : Юрайт, 2013. - 702 с. - ISBN 978-5-9916-2562-

2 Кузовкин, В. А. Теоретическая электротехника [Текст] : учеб. для вузов / В. А. Кузовкин. - М. : Логос, 2006. - 480 с. - ISBN 5-98704-092-2.

3 Касаткин, А. С. Электротехника [Текст] : учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов.- 9-е изд., стер. - М. : Академия, 2005. - 544 с. - ISBN 5-7695-2144-9.

4 Быковская, Л. В.Трехфазные цепи : учебное пособие для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Л. В. Быковская, Н. Ю. Ушакова; Оренбург. гос. ун-т. - Оренбург : ОГУ, 2015 - ISBN 978-5-7410-1214-7.. - № гос. регистрации 0321503633.

5 Быковская, Л.В. Исследование электрических и электронных цепей на лабораторных стендах ТЭЦОЭ2-Н-Р: практикум / Л.В. Быковская, В.В. Быковский, Н.Ю.Ушакова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2019. - 135с.

6 Бравичев, С. Н. Электрические цепи : учеб. пособие к лаб. практикуму / С. Н. Бравичев, Г. И. Дегтярев, В. Н. Трубникова; - Оренбург : ГОУ ОГУ, 2011. - 136 с.- № гос. регистрации 0321102759.

7 Быковская, Л. В. Исследование линейных электрических цепей синусоидального тока: метод. указания к лаб. практикуму по теорет. основам электротехники / Л. В. Быковская, В. В. Быковский, В. Н. Трубникова; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург : ГОУ ОГУ, 2005.