

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

Р. Я. Сулейманов
А. А. Косяков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Екатеринбург
2009

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Уральский государственный университет путей сообщения
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

Р. Я. Сулейманов
А. А. Косяков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторный практикум

Часть 1

Для студентов специальностей
190401 – «Электроснабжение железных дорог»,
190303 – «Электрический транспорт железных дорог»,
210700 – «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
220401 – «Мехатроника»

3-е издание, исправленное

Екатеринбург
2009

УДК 621.3 (072)

С 89

Сулейманов Р. Я., Косяков А. А.

С89 Теоретические основы электротехники: лабораторный практикум. – 3-е изд., испр. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009.– Ч. 1. – 48 с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов электромеханического, электротехнического и механического факультетов, изучающих курсы «Теоретические основы электротехники» и «Электротехника и электроника».

В первую часть включены лабораторные работы по проверке основных законов электрических цепей постоянного и переменного тока, повышению коэффициента мощности электроустановок и исследованию резонансных явлений в электрических цепях.

Изложены краткие теоретические сведения и задания по каждой работе. При подготовке к выполнению лабораторных работ студент должен ознакомиться с соответствующими разделами курса, используя рекомендуемую литературу, лекционный материал и материал практических занятий.

Рекомендован к изданию на заседании кафедры ТОЭ, протокол № 7 от 22 января 2009 г.

Авторы: Р. Я. Сулейманов – доцент кафедры ТОЭ,
канд. техн. наук, УрГУПС

А. А. Косяков – доцент кафедры ТОЭ,
канд. техн. наук, УрГУПС

Рецензент: А. П. Сухогузов – зав. кафедрой ТОЭ, профессор,
канд. техн. наук, УрГУПС

© Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), 2009

Оглавление

Введение.....	4
Правила техники безопасности при выполнении работ в лаборатории ТОО.....	5
Правила выполнения лабораторных работ.....	5
1. Лабораторная работа № 1. Преобразование пассивных элементов электрических цепей.....	7
2. Лабораторная работа № 2. Основные законы электрических цепей, принципы расчёта.....	13
3. Лабораторная работа № 3. Метод эквивалентного генератора.....	18
4. Лабораторная работа № 5. Простейшие цепи переменного тока.....	22
5. Лабораторная работа № 6. Повышение коэффициента мощности электрических установок.....	33
6. Лабораторная работа № 7. Резонансные явления в линейных электрических цепях переменного тока.....	38
Библиографический список.....	47

Введение

Выполнение лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) закрепляет знания, полученные на лекциях и практических занятиях, а также даёт навыки практической работы с измерительными приборами и электротехническим оборудованием, знакомит с техникой и методами исследований. Отчёты по лабораторным работам служат прообразом технических отчётов по тем или иным испытаниям, которые приходится проводить инженеру в его практической деятельности.

Описание каждой лабораторной работы включает в себя формулировку цели работы, краткие теоретические сведения, описание установки и методов измерений, задание и требования к содержанию отчёта. Все работы проиллюстрированы необходимыми схемами, формами таблиц для записи результатов измерений и вычислений. Работы рассчитаны на два часа, включая оформление отчётов.

Работа в лаборатории ТОЭ связана с электричеством, напряжение которого в некоторых опытах достигает 300...400 В, что является опасным для жизни. Поэтому перед началом работ необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, расписаться в журнале инструктажа по технике безопасности и строго соблюдать эти правила в процессе работы.

Лаборатория оснащена современным, дорогостоящим и редким оборудованием, с которым нужно обращаться аккуратно и бережно. Для того, чтобы избежать выхода из строя приборов при ошибочном включении в электрическую цепь и успешно выполнить всю работу, необходимо соблюдать определённые правила, которые приведены ниже.

Студенты работают в лаборатории в бригадах в составе двух-трёх человек. В процессе выполнения работы они знакомятся с описанием работы, подготавливают предварительную часть отчёта с заготовленными таблицами, графиками и расчётными формулами. Схемы собираются поочередно всеми студентами с последующей взаимной проверкой. Результаты измерений заносятся в протокол испытаний (один на бригаду).

В конце занятий преподаватель подписывает протокол и делает отметку в журнале о выполнении работы. Разбирать схемы до проверки результатов измерений преподавателем не рекомендуется.

Каждый студент обязан к началу занятия подготовить отчёт установленной формы по предыдущей работе. Отчёт должен иметь законченный вид и содержать введение (цель работы), основную часть (описание установки, описание хода работы, схему измерений, результаты измерений, расчёты, графики) и заключение (выводы по работе). Неряшливо выполненные отчёты не принимаются, а студенты к следующей работе не допускаются.

После выполнения двух-трёх работ студенты защищают свои отчёты. Для этого они должны:

- 1) изучить теоретический и практический материал по каждой защищаемой работе;
- 2) знать схемы лабораторных установок и правила работы с измерительными приборами;
- 3) знать порядок проведения работы;
- 4) проанализировать результаты экспериментов.

Правила техники безопасности при выполнении работ в лаборатории ТООЭ

Работа в лаборатории ТООЭ производится при напряжениях до 400 В, представляющих опасность для жизни.

Собирать электрическую схему соединений и производить переключения в схеме разрешается только при снятом напряжении. Производить переключения в схемах и подключение приборов и оборудования под напряжением категорически запрещается.

Запрещается брать за токоведущие части, находящиеся под напряжением, а также за вращающиеся части.

Запрещается производить какие-либо работы на внутренней стороне щитов и приборов. Смена сгоревших предохранителей должна производиться при снятом напряжении.

При нарушении нормального режима работы электрооборудования, приборов и трансформаторов следует немедленно отключить установку.

При появлении дыма или запаха в соединительных проводах, обмотках трансформаторов или приборах из-за перегрузки или неправильной сборки схемы необходимо немедленно отключить установку от питающей сети.

При нарушении правил техники безопасности виновный снимается с занятий и допускается к повторной работе только с разрешения заведующего кафедрой и после повторного прохождения инструктажа по технике безопасности.

Правила выполнения лабораторных работ

1. К работе в лаборатории допускаются студенты, прослушавшие и изучившие соответствующие разделы теоретического курса и ознакомленные с правилами техники безопасности.

2. Студенты, допущенные к выполнению лабораторных работ, делятся на бригады по два-три человека.

3. Каждая работа выполняется за отдельными столами, укомплектованными необходимыми приборами и оборудованием.

4. Брать другие приборы с соседних столов без разрешения преподавателя не разрешается.

5. Перед началом занятия студент должен ознакомиться с содержанием работы, её оборудованием и приборами, заготовить протокол со схемой и необходимыми таблицами измерений.

6. При сборке схемы рекомендуется измерительные приборы и оборудование располагать так, чтобы схема получалась наглядной и легкодоступной для регулирования и отсчёта показаний приборов.

7. При наличии многопредельных приборов особое внимание следует обратить на устанавливаемые величины пределов измерений.

8. Соединение схемы следует начать с последовательных токовых цепей, начиная с зажима источника питания, и, обойдя последовательно все элементы схемы, закончить на другом зажиме источника; затем соединить параллельные цепи.

9. Перед включением схема обязательно должна быть проверена преподавателем или лаборантом и только тогда может быть включена.

10. После включения схемы необходимо убедиться в нормальном отклонении стрелок приборов.

11. При неправильном отклонении или зашкаливании стрелок приборов, искрении контактов и т.п. следует быстро выключить схему и устранить неполадки.

12. В случае порчи приборов или оборудования студент сообщает об этом преподавателю.

13. Показания приборов заносятся в таблицы протокола, после чего схема отключается во избежание перегрева оборудования.

14. После окончания опытов следует предъявить протокол преподавателю до разборки схемы; если работа выполнена правильно, нужно схему разобрать и сдать рабочее место преподавателю или лаборанту.

15. Каждый студент перед занятием должен предъявить преподавателю отчёт по предыдущей работе, без которого студент не допускается к очередной работе.

16. Отчёт должен содержать: наименование работы, перечень приборов и оборудования, схемы соединений, таблицы с вычисленными данными, расчётные формулы, графики и векторные диаграммы, предусмотренные заданием, краткие выводы по работе.

1. Преобразование пассивных элементов электрических цепей

1.1. Цель работы

Целью данной работы является опытная проверка методов преобразования пассивных электрических цепей.

1.2. Краткие теоретические сведения

Расчёт и исследование сложных электрических цепей во многих случаях можно значительно облегчить путём преобразования схем одного вида в схемы другого вида. Соответствующее преобразование электрической схемы цепи приводит к уменьшению числа её ветвей или узлов, следовательно, и числа уравнений, определяющих её электрическое состояние. В настоящей работе исследуются преобразования только пассивных частей схем.

При любом преобразовании должны соблюдаться условия эквивалентности, состоящие в том, что токи и напряжения в тех частях схемы, которые не затронуты преобразованием, должны остаться неизменными. Суммарная мощность преобразованной и не преобразованной схемы должна быть одинакова.

Основные виды эквивалентных преобразований следующие:

- а) замена ряда последовательно соединённых сопротивлений одним;
- б) замена ряда параллельно соединённых сопротивлений одним;
- в) замена сопротивлений, соединённых звездой, сопротивлениями, соединёнными в треугольник, и наоборот.

Исходя из условия эквивалентности преобразований:

- 1) эквивалентное сопротивление цепи, состоящее из последовательно соединённых сопротивлений, равно их сумме, т. е.

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} + R_n; \quad (1.1)$$

- 2) эквивалентная проводимость цепи, состоящей из параллельно соединённых сопротивлений, равна сумме проводимостей всех ветвей, т. е.

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_2 + \dots + G_{n-1} + G_n \quad (1.2)$$

или

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n}; \quad (1.3)$$

3) если известны сопротивления треугольника R_1 , R_2 , R_3 (рис. 1.1), то сопротивления эквивалентной звезды определяются по формулам

$$\begin{cases} R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, \\ R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \\ R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \end{cases} \quad (1.4)$$

обратное преобразование (если известны сопротивления звезды) производится по следующим формулам:

$$\begin{cases} R_1 = R_{12} + R_{13} + \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}}, \\ R_2 = R_{12} + R_{23} + \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{13}}, \\ R_3 = R_{23} + R_{13} + \frac{R_{23} \cdot R_{13}}{R_{12}}. \end{cases} \quad (1.5)$$

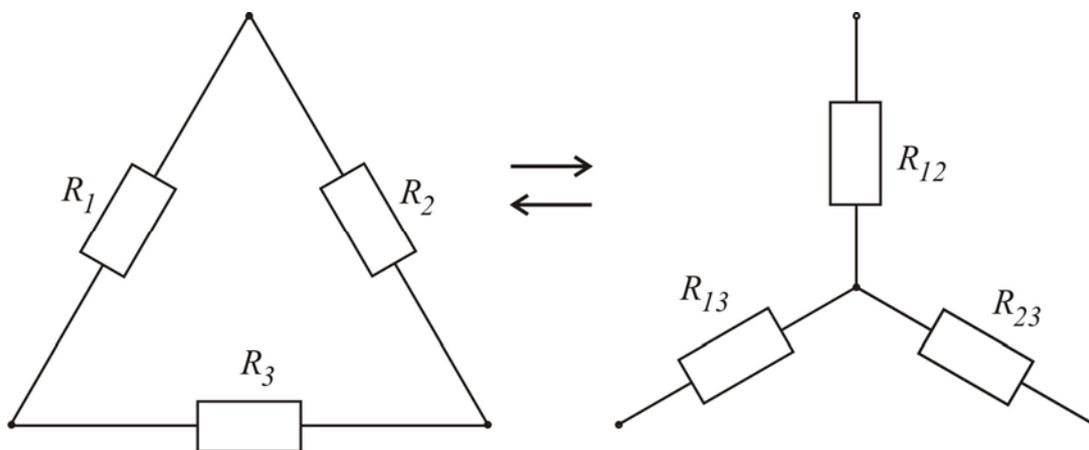


Рис. 1.1. Преобразование звезды в треугольник

Эквивалентность преобразований можно проверить путём сравнения токов, подходящих к преобразуемой части цепи, т. е. к вершинам треугольника и эквивалентной звезды. Равенство соответствующих токов указывает на эквивалентность преобразований.

1.3. Содержание работы и описание установки

В лабораторной работе измеряются сопротивления по методу амперметра и вольтметра. Схема измерений изображена на рис. 1.2.

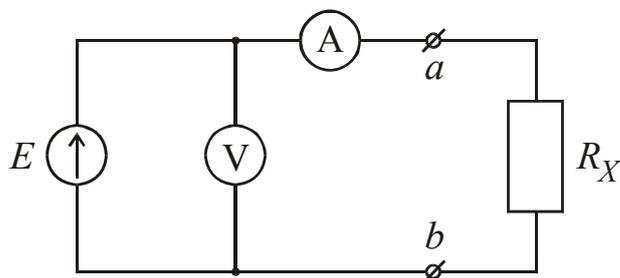


Рис. 1.2. Схема измерения сопротивлений

Получив показания приборов, сопротивления вычисляют по закону Ома. Например, если $U = 5$ В, а $I = 0,2$ А, то

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,2} = 25 \text{ Ом.} \quad (1.6)$$

1.3.1. Лабораторная работа может быть проведена на лабораторных стендах двух типов.

1.3.2. Назначение блоков лабораторного стенда первого типа (рис. 1.3).

НАБОР МИНИБЛОКОВ	БЛОК МУЛЬТИМЕТРОВ	БЛОК МУЛЬТИМЕТРОВ		ПАНЕЛЬ ДЛЯ МИНИБЛОКОВ
КОННЕКТОР	НАБОРНАЯ ПАНЕЛЬ	ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	ГЕНЕРАТОР СИНУСО-ИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Рис. 1.3. Внешний вид лабораторного стенда первого типа

1.3.2.1. На панели или в наборе миниблоков расположены миниблоки с элементами цепи, необходимыми для выполнения лабораторной работы.

1.3.2.2. На стенде смонтированы пять мультиметров: три на одном блоке (предназначенные для работы в режиме амперметра) и два на другом (предназначенные для работы в режиме вольтметра).

1.3.2.3. Коннектор предназначен для компьютерного анализа процессов, происходящих в исследуемой схеме.

1.3.2.4. Наборная панель представляет собой поле клемм, имеющих соединения, на наборной панели собираются схемы из миниблоков.

1.3.2.5. Генератор постоянных напряжений содержит три независимых источника постоянных ЭДС 15 В / 0,3 А, причем один из них регулируемый в пределах от 0 до 15 В.

1.3.2.6. Генератор синусоидальных напряжений содержит два независимых источника синусоидальной ЭДС 10 В / 0,1 А, 24 В / 0,1 А и источник симметричной трёхфазной ЭДС с фазным напряжением 7 В и допустимым током 0,05 А.

1.3.2.7. Генератор напряжений специальной формы позволяет получить регулируемое по амплитуде (от 0 до 7 В) и частоте (от 10 Гц до 100 кГц) напряжение специальной формы: синусоидальное, прямоугольное двухполюсное и прямоугольное однополюсное.

1.3.3. Для проведения лабораторной работы на стенде первого типа используют генератор постоянных напряжений, два мультиметра и постоянные резисторы $R_1 = 470 \text{ Ом}$, $R_2 = 330 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$.

1.3.4. Лабораторный стенд второго типа (рис. 1.4) включает следующие элементы.

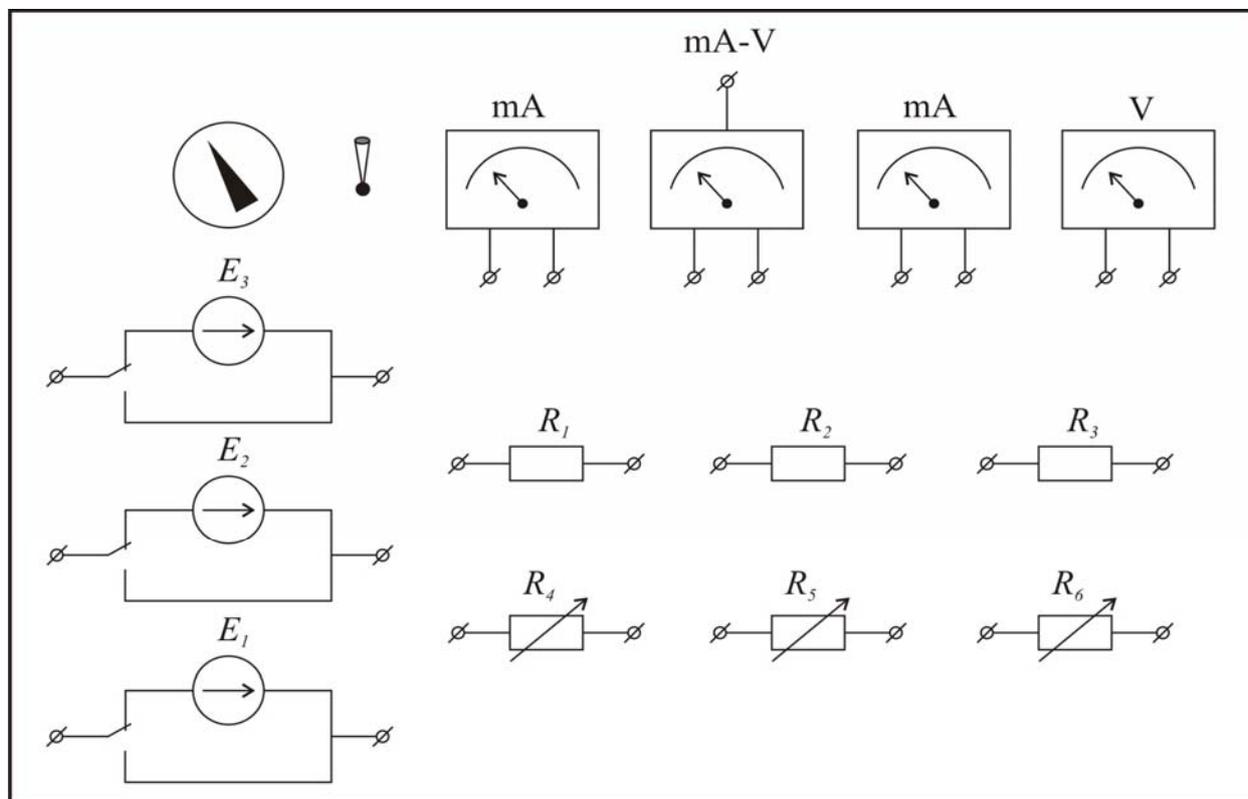


Рис. 1.4. Внешний вид лабораторного стенда второго типа

1.3.4.1. Сетевой выключатель и общий регулятор напряжения трёх источников ЭДС E_1 , E_2 и E_3 .

1.3.4.2. Три постоянных (R_1 , R_2 , R_3) и три переменных (R_4 , R_5 , R_6) резистора.

1.3.4.3. Измерительные приборы магнитоэлектрической системы:

– два миллиамперметра на 0,25 А;

– вольтметр на 10 В;

– комбинированный прибор – миллиамперметр на 0,25 А и вольтметр на 25 В.

1.3.5. Для проведения лабораторной работы на стенде второго типа используют источник ЭДС, вольтметр, миллиамперметр и любые три резистора.

1.4. Порядок выполнения работы

1.4.1. Ознакомиться со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

1.4.2. Измерить величину ЭДС источника.

1.4.3. Измерить сопротивления постоянных резисторов R_1 , R_2 , R_3 методом амперметра и вольтметра (рис. 1.2).

1.4.4. Собрать схемы (рис. 1.5 а, 1.5 б, 1.5 в, 1.5 г) и измерить эквивалентные сопротивления этих цепей. Результаты измерений записать в табл. 1.1.

1.4.5. Рассчитать эквивалентные сопротивления цепей, результаты записать в табл. 1.1 и сравнить с опытными данными.

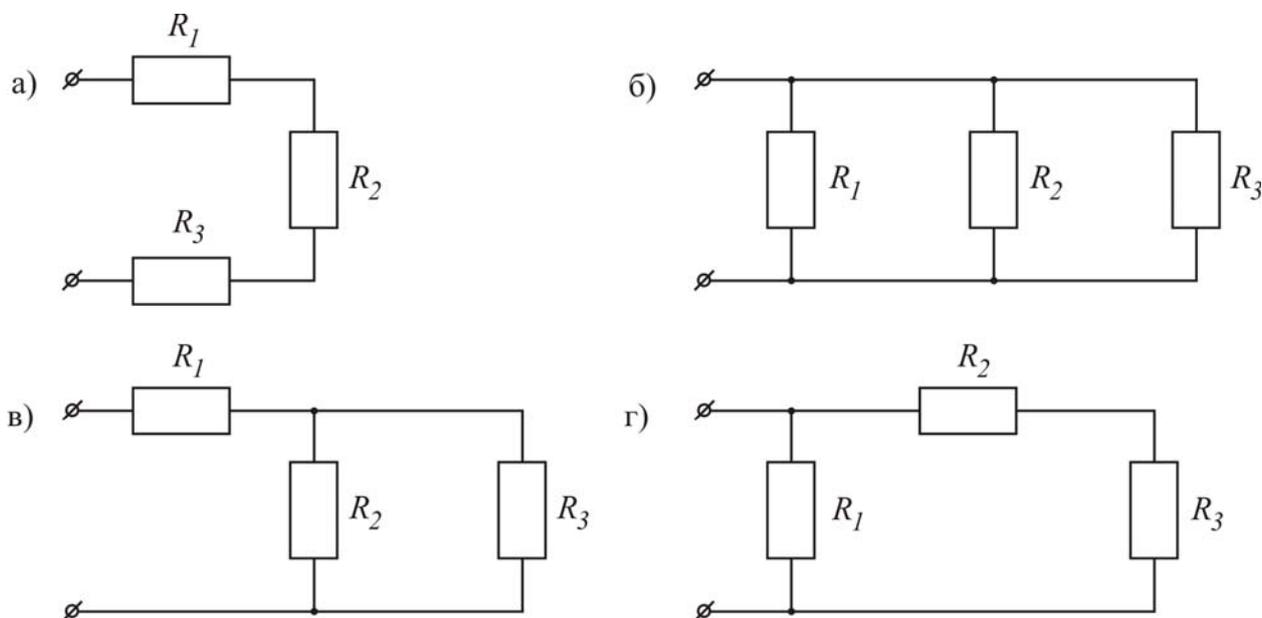


Рис. 1.5. Схемы опытов

Результаты опытов

Схема	U , В	I , А	$R_{\text{Э}}$, Ом	Формула эквивалентного преобразования	$R'_{\text{Э}}$, Ом	ΔR , Ом
1.5а 1.5б 1.5в 1.5г						

Примечания к табл. 1.1:

- 1) $R_{\text{Э}}$ определяется по показаниям приборов;
- 2) $R'_{\text{Э}}$ определяется из аналитического расчёта по параметрам схемы;
- 3) $\Delta R = R_{\text{Э}} - R'_{\text{Э}}$.

1.5. Содержание отчёта

В отчёте по работе должна быть отражена цель работы, приведены схемы измерений, таблица опытных и расчётных данных и выводы по работе.

2. Основные законы электрических цепей, принципы расчёта

2.1. Цель работы

Целью данной работы является экспериментальная проверка законов Кирхгофа, принципов наложения и взаимности.

2.2. Краткие теоретические сведения

Все процессы в электрических цепях подчиняются первому и второму законам Кирхгофа. Если заданы ЭДС источников и сопротивления приёмников, то по законам Кирхгофа можно найти токи в ветвях и напряжения на всех элементах цепи.

Первый закон Кирхгофа – алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, т.е.

$$\sum I_K = 0. \quad (2.1)$$

Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре, т.е.

$$\sum I_K \cdot R_K = \sum E_K. \quad (2.2)$$

При составлении уравнений по законам Кирхгофа необходимо предварительно произвольно задать направления токов во всех ветвях, а также направления обхода контуров. При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа токи, входящие в узел, обычно записываются со знаком плюс, а выходящие – со знаком минус. В уравнения, записанные по второму закону Кирхгофа, соответствующие слагаемые входят со знаком плюс, если направления тока или ЭДС совпадают с направлением обхода, и наоборот.

При расчёте электрических цепей важную роль играет принцип наложения, устанавливающий независимость действия каждого из источников ЭДС или тока, включённых в цепь. Исходя из принципа наложения, ток в любой ветви равен алгебраической сумме токов, создаваемых в этой ветви каждой из ЭДС (или источников тока) в отдельности. Ток от одного источника называется частичным током. Принцип наложения справедлив также и для контурных токов и узловых потенциалов.

Также существенное значение для расчётов имеет принцип взаимности, установленный Максвеллом для линейных цепей. Если ЭДС $E_{ab} = E$, действуя в ветви ab цепи любой сложности при отсутствии других ЭДС, вызывает в ветви cd этой же цепи ток $I_{cd} = I$, то при перемещении этой ЭДС в ветвь cd она создаёт в ветви ab такой же ток $I_{ab} = I$.

Второй закон Кирхгофа иллюстрирует потенциальная диаграмма, т.е. график распределения потенциала вдоль электрической цепи. При построении

потенциальной диаграммы по оси абсцисс откладывают в принятом масштабе величины сопротивлений, встречающихся при обходе вдоль контура, начиная с произвольной точки, а по оси ординат – величины электрического потенциала в соответствующем масштабе. Потенциальная диаграмма позволяет определить напряжение между любыми точками контура.

2.3. Содержание работы и описание установки

В данной лабораторной работе измеряют токи и напряжения в разветвлённой цепи постоянного тока. По результатам измерений выполняют расчёты по законам Кирхгофа и по методу наложения и строят потенциальную диаграмму.

Лабораторная работа может быть проведена на лабораторных стендах двух типов.

Для проведения лабораторной работы на стенде первого типа используют генератор постоянных напряжений, мультиметры, два переменных резистора по 100 Ом и три постоянных резистора 150 Ом, 220 Ом, 330 Ом.

Для проведения лабораторной работы на стенде второго типа используют три источника ЭДС, три миллиамперметра и пять резисторов.

Внутренние сопротивления источников постоянных ЭДС в этой работе принимаются равными нулю, что вполне соответствует действительности. Для удобства работы источники снабжены переключателями.

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Ознакомиться со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

2.4.2. Измерить величины ЭДС всех источников и записать в табл. 2.1.

2.4.3. Собрать схему (рис. 2.1), пользуясь монтажной схемой (рис. 2.2 или рис. 2.3). В отчёте монтажную схему можно не приводить.

2.4.4. Задать направления токов.

2.4.5. Включая поочерёдно источники в цепь, записать показания приборов в табл. 2.2 с учётом направления токов. При совпадении истинного направления тока с условно выбранным показание миллиамперметра записывается со знаком плюс.

2.4.6. Включить все источники и записать показания приборов в табл. 2.2. Измерить вольтметром напряжения на сопротивлениях цепи, записать показания в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений напряжений

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$U_4, \text{В}$	$U_5, \text{В}$

Включено	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	$\sum I$, мА
E_1				
E_2				
E_3				
Все источники				
Сумма частичных токов				

Результаты измерений токов

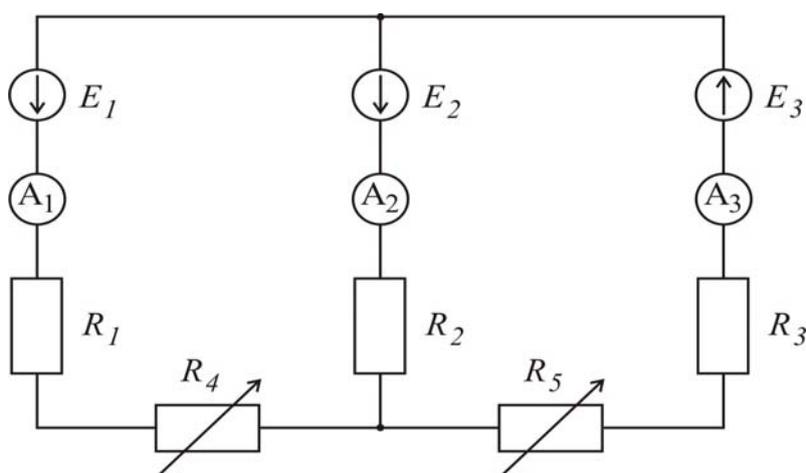


Рис. 2.1. Принципиальная схема опытов

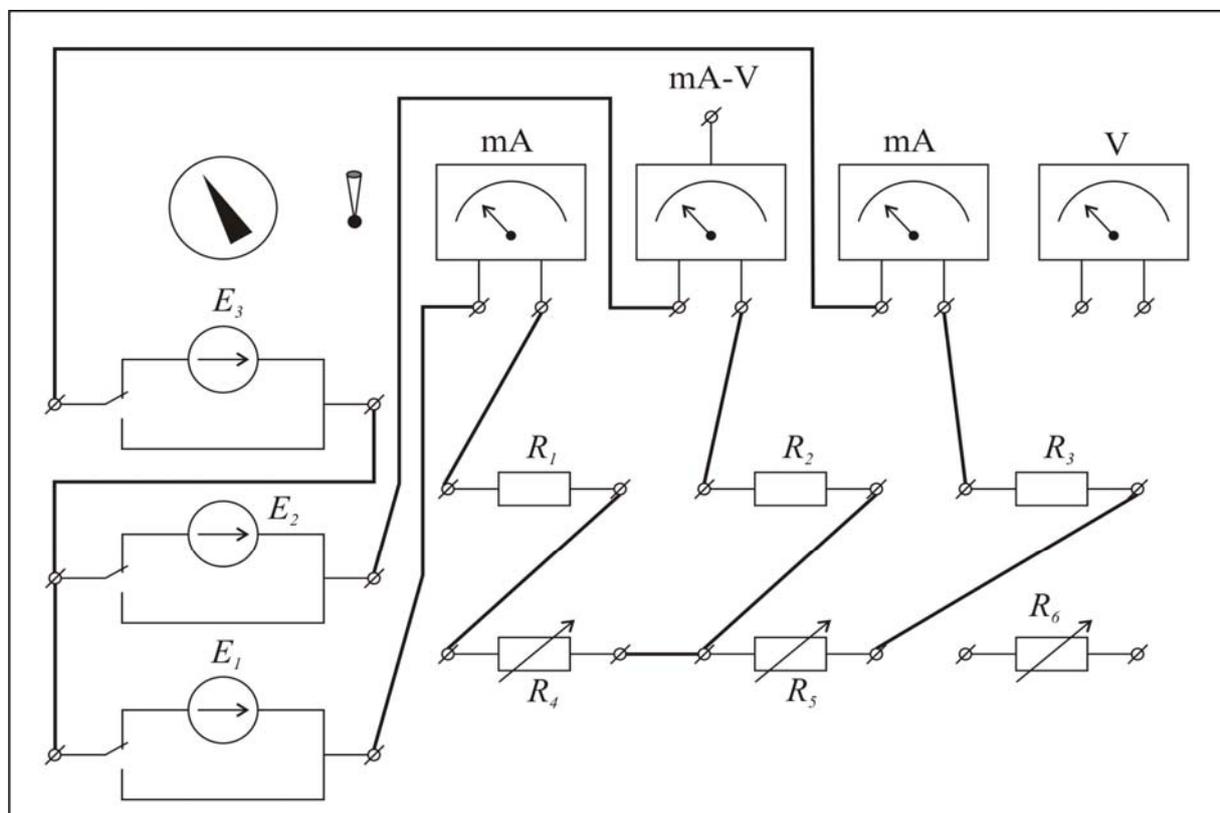


Рис. 2.2. Монтажная схема опытов на лабораторном стенде второго типа

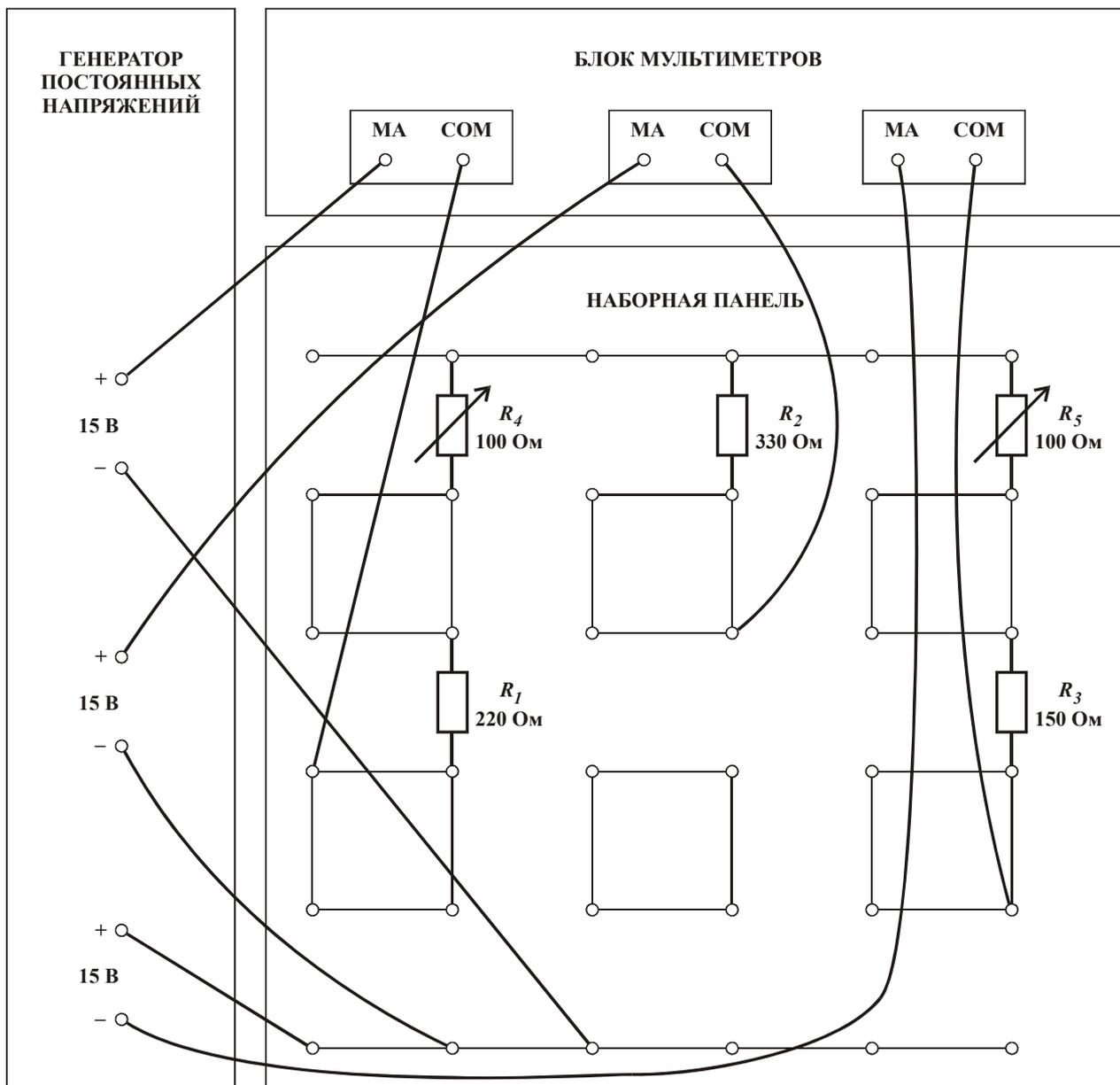


Рис. 2.3. Монтажная схема опытов на лабораторном стенде первого типа

2.4.7. Проверить соблюдение первого закона Кирхгофа и принципа наложения по данным табл. 2.2.

2.4.8. Пользуясь данными таблиц, определить величины сопротивлений по закону Ома.

2.4.9. Зная параметры цепи (из предыдущих измерений и расчётов), рассчитать токи методом наложения. Результаты сравнить с опытными данными (табл. 2.2).

2.4.10. Составить уравнения по второму закону Кирхгофа для двух контуров и проверить их соблюдение.

2.4.11. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура при всех включённых ЭДС.

2.4.12. Пользуясь данными табл. 2.2, проверить принцип взаимности.

2.5. Содержание отчёта

В отчёте по работе должна быть отражена цель работы, приведены схемы измерений, таблица опытных и расчётных данных, аналитические расчёты, потенциальная диаграмма и выводы по работе.

3. Метод эквивалентного генератора

3.1. Цель работы

Целью данной работы является опытная проверка одного из методов расчёта электрических цепей – метода эквивалентного генератора.

3.2. Краткие теоретические сведения

Сущность метода эквивалентного генератора заключается в том, что по отношению к выделенной ветви ab с сопротивлением $R_{ab} = R_n$ вся остальная часть сложной цепи, содержащей сопротивления и источники, может быть заменена одним эквивалентным генератором с ЭДС $E = U_{xx}$ и внутренним сопротивлением R_{BH} . Тогда ток, протекающий через сопротивление R_{ab} можно найти по формуле

$$I_{ab} = \frac{U_{xx}}{R_{BH} + R_{ab}}. \quad (3.1)$$

Таким образом, при определении тока I_{ab} задача сводится к отысканию ЭДС $E = U_{xx}$ и сопротивления r . Эти величины определяются из двух крайних режимов работы эквивалентного генератора: холостого хода и короткого замыкания.

Напряжение U_{xx} можно определить опытным путем, разомкнув данную ветвь и подключив вольтметр. Сопротивление r определяют из опыта короткого замыкания по формуле (3.1), полагая R_{ab} равным нулю, т. е. при $I_{ab} = I_{abк}$. Тогда

$$R_{BH} = \frac{U_{xx}}{I_{abк}}. \quad (3.2)$$

Внутреннее сопротивление можно определить также и методом амперметра и вольтметра, замкнув все источники ЭДС в исходной цепи и подключив к точкам a и b постороннюю ЭДС. Тогда сопротивление r определится по закону Ома.

3.3. Содержание работы и описание установки

В данной лабораторной работе измеряют токи и напряжения в разветвлённой цепи постоянного тока. По результатам измерений выполняют расчёты по методу эквивалентного генератора.

Лабораторная работа может быть проведена на лабораторных стендах двух типов.

Для проведения лабораторной работы на стенде первого типа используют генератор постоянных напряжений, мультиметры, один переменный резистор $R_H = 1$ кОм и три постоянных резистора $R_1 = 470$ Ом, $R_2 = 220$ Ом и $R_3 = 150$ Ом.

Для проведения лабораторной работы на стенде второго типа используют три источника ЭДС, миллиамперметр, вольтметр и четыре резистора.

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Ознакомиться со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

3.4.2. Собрать схему (рис. 3.1), пользуясь монтажной схемой (рис. 3.3 или рис. 3.4). Включить ЭДС E_1 и E_2 . Меняя сопротивление R_H от бесконечности (ветвь разомкнута) до нуля, записать в табл. 3.1 показания приборов при 8...10 значениях $R_{ab} = R_H$.

3.4.3. Собрать схему (рис. 3.2). Для этого следует включить ЭДС E_3 в разомкнутую ветвь ab , выключить E_1 и E_2 и замкнуть нагрузочное сопротивление R_{ab} . Записать показания приборов.

3.4.4. Рассчитать мощность P . По данным табл. 3.1 построить в одних осях в соответствующих масштабах зависимости $U_H(R_H)$, $I_H(R_H)$, $P(R_H)$.

3.4.5. По данным опытов 4.2 и 4.3 определить $R_{вн}$ (среднее значение). Определить U_{xx} по опытным данным. Принимая произвольные значения R_H (удобно воспользоваться значениями, полученными в пункте 4.1), вычислить значения U'_H , I'_H , P' , записать их в табл. 3.1 и построить по этим данным зависимости $U'_H(R_H)$, $I'_H(R_H)$, $P'(R_H)$ в тех же осях в соответствующих масштабах.

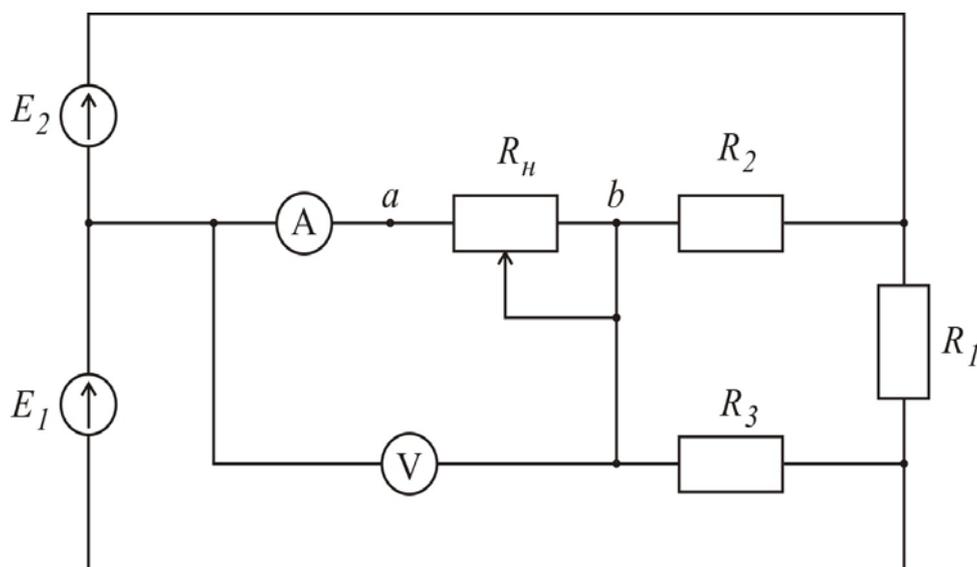


Рис. 3.1. Принципиальная схема опыта

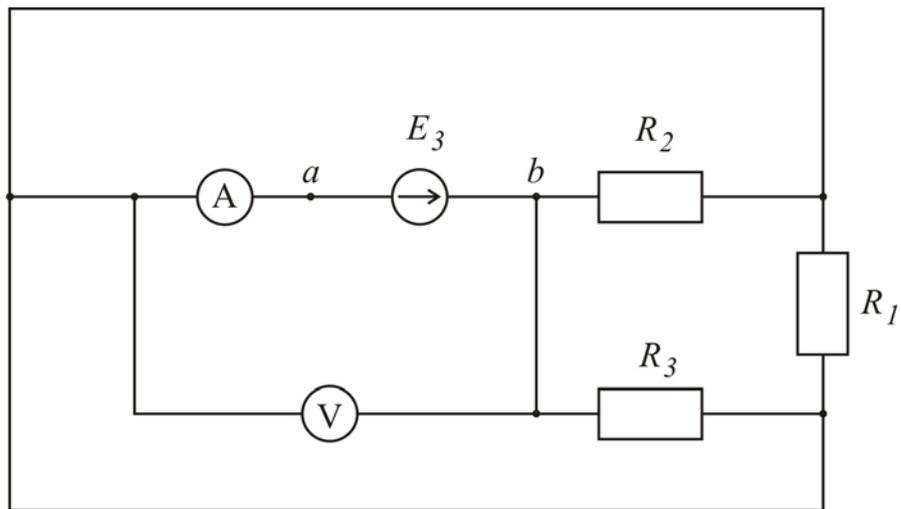


Рис. 3.2. Схема для измерения $R_{вн}$

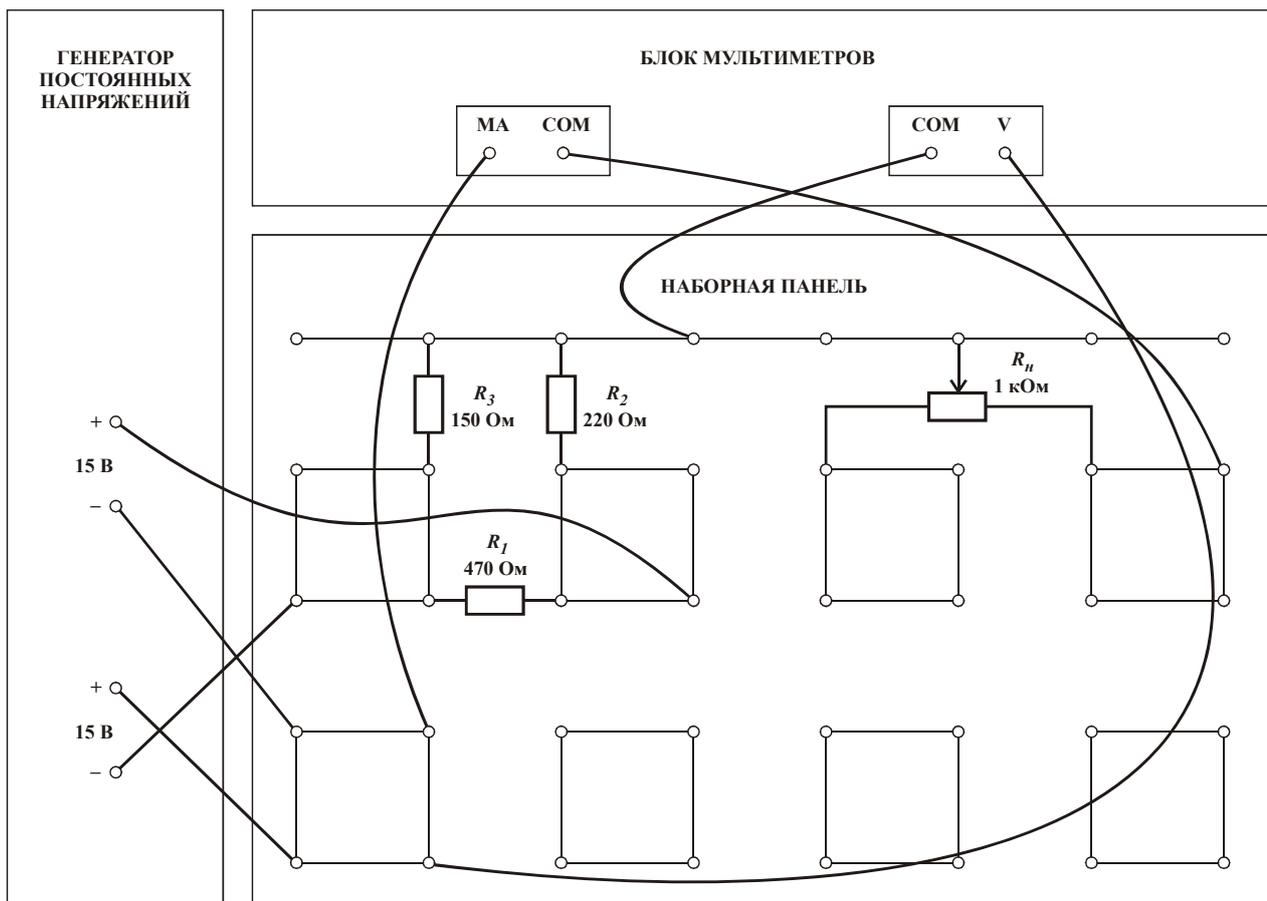


Рис. 3.3. Монтажная схема опытов на лабораторном стенде первого типа

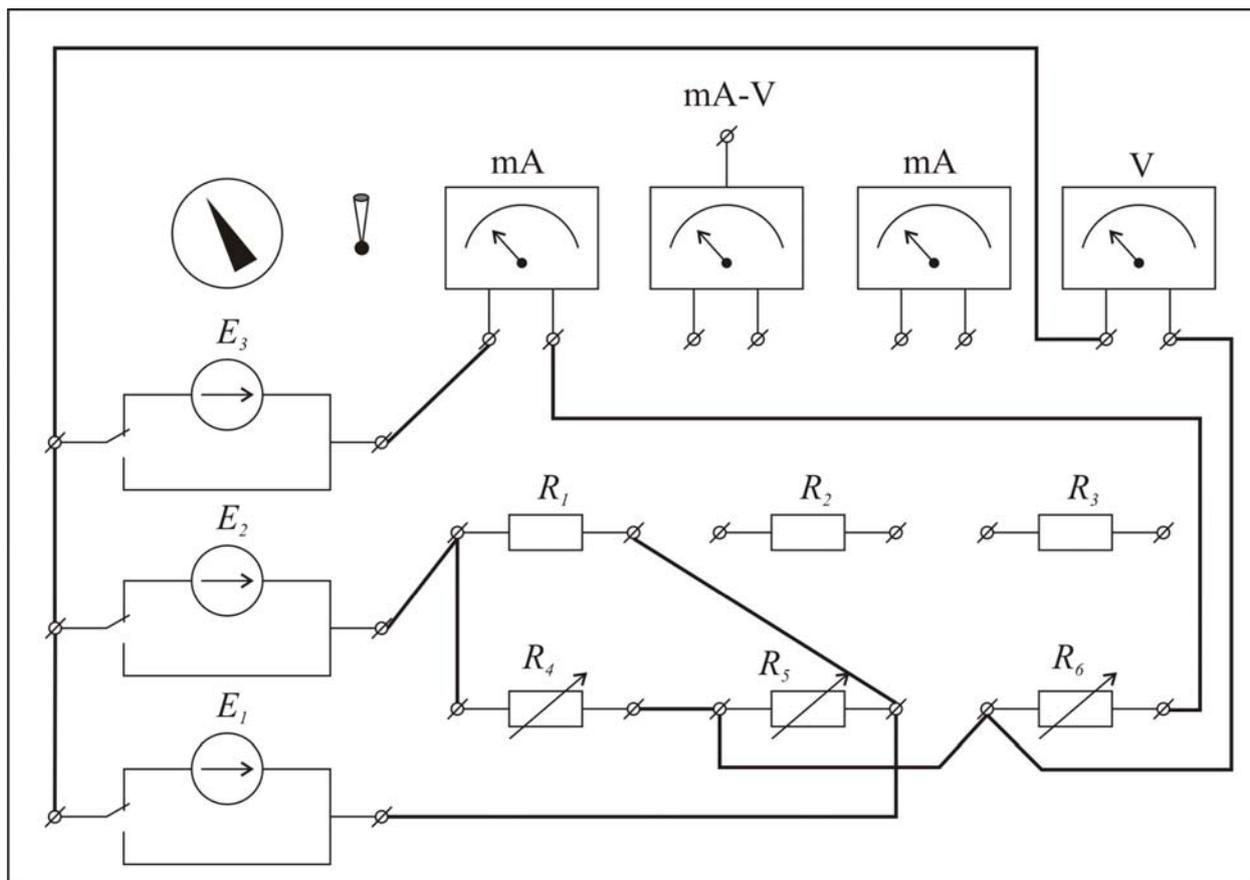


Рис. 3.3. Монтажная схема опытов на лабораторном стенде второго типа

Таблица 3.1

Результаты измерений и расчётов

$U_n, \text{В}$	Опыт								0
	Расчёт								0
$I_n, \text{А}$	Опыт	0							
	Расчёт	0							
$R_n = \frac{U}{I}, \text{Ом}$	Опыт	∞							0
	Расчёт	∞							0
$P, \text{Вт}$	Опыт								
	Расчёт								

3.5. Содержание отчёта

В отчёте по работе должна быть отражена цель работы, приведены схемы измерений, таблица опытных и расчётных данных, пример расчёта, графики и выводы по работе.

4. Простейшие цепи переменного тока

4.1. Цель работы

Целью работы является изучение режимов работы цепей, содержащих активные и реактивные сопротивления при их последовательном и параллельном соединении.

4.2. Краткие теоретические сведения

Переменный ток получил широкое распространение в электротехнике в связи с возможностью централизованного производства электрической энергии и передачи её на значительные расстояния. Расчёт цепей переменного тока значительно сложнее расчёта цепей постоянного тока. В данной лабораторной работе рассматриваются способы расчёта только наиболее простых цепей – при параллельном и последовательном соединении приёмников.

При последовательном соединении элементов (рис. 4.1) в каждый момент времени мгновенное значение напряжения на зажимах цепи равно сумме мгновенных значений падений напряжения на всех участках:

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (4.1)$$

где $u_R = R \cdot i$, $u_L = L \frac{di}{dt}$, $u_C = \frac{1}{C} \int idt$.

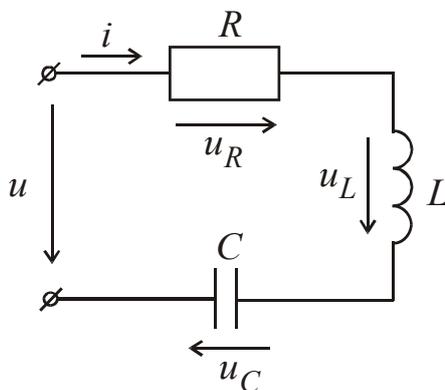


Рис. 4.1. Последовательное соединение элементов

Для получения основных соотношений будем считать, что ток в цепи изменяется по синусоидальному закону $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. С учётом этого выражение (4.1) примет вид

$$u = R \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i) + \omega L \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ). \quad (4.2)$$

Из этого выражения видно, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Напряжение на индуктивности опережает ток на 90° , а напряжение на емкости отстаёт по фазе от тока на 90° , но, так как они представляют собой две синусоиды, находящиеся в противофазе, то выражение (4.2) можно записать в виде

$$u = R \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i) + I_m \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ). \quad (4.3)$$

Далее, проделав тригонометрические преобразования, получим

$$u = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \cdot \sin \left(\omega t + \psi_i + \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right), \quad (4.4)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$ – полное сопротивление цепи.

Если обозначить $I_m \cdot Z = U_m$, $\arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \varphi$, можно записать:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi). \quad (4.5)$$

Таким образом, задача определения напряжения на входе цепи сводится к определению значений U_m и φ .

Эту задачу можно решить и в комплексной форме. Запишем комплексный ток и комплексные напряжения на основании выражений для мгновенного тока и мгновенного напряжения:

$$\begin{cases} \dot{I} = I \cdot e^{j\psi_i}, \\ \dot{U}_R = R \cdot I \cdot e^{j\psi_i} = R \cdot \dot{I}, \\ \dot{U}_L = \omega L \cdot I \cdot e^{j(\psi_i + 90^\circ)} = \omega L \cdot I \cdot e^{j\psi_i} \cdot e^{j90^\circ} = j\omega L \cdot \dot{I}, \\ \dot{U}_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I \cdot e^{j(\psi_i - 90^\circ)} = \frac{1}{\omega C} \cdot I \cdot e^{j\psi_i} \cdot e^{-j90^\circ} = -j \frac{1}{\omega C} \cdot \dot{I}. \end{cases}$$

Тогда напряжение на входе будет иметь следующее комплексное выражение:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I} + j\omega L \cdot \dot{I} - j \frac{1}{\omega C} \cdot \dot{I}. \quad (4.6)$$

Это выражение представляет собой уравнение по второму закону Кирхгофа, записанное в комплексной форме. Представим его на векторной диаграмме (рис. 4.2).

Напряжение \dot{U}_R совпадает с током по фазе, поэтому изображается одинаково с направлением \dot{I} . Напряжение \dot{U}_L опережает по фазе ток на 90° , поэтому

вектор \dot{U}_L сдвинут относительно вектора \dot{I} на угол 90° против часовой стрелки. Напряжение \dot{U}_C отстаёт по фазе от \dot{I} на 90° , поэтому вектор \dot{U}_C сдвинут относительно вектора \dot{I} на угол 90° по часовой стрелке.

Сложив векторы \dot{U}_R , \dot{U}_L и \dot{U}_C , получим вектор \dot{U} . Его длина определяется действующим значением $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, а положение относительно координатных осей – начальной фазой ψ_u .

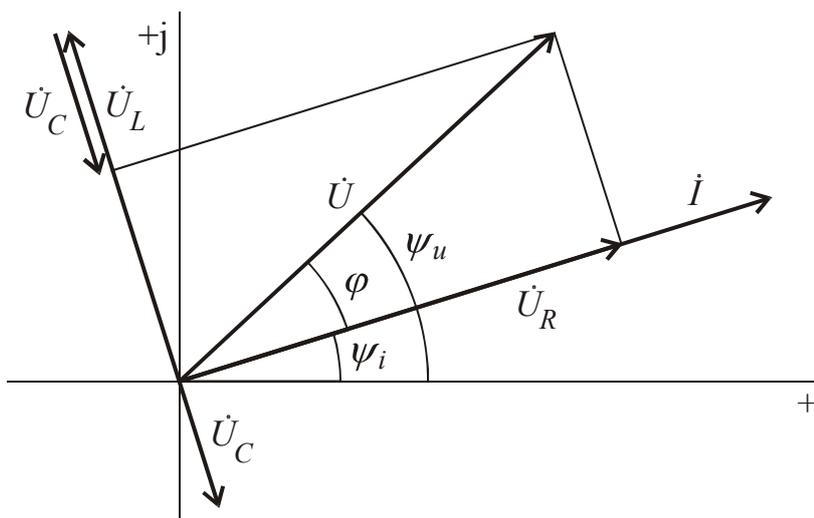


Рис. 4.2. Векторная диаграмма напряжений и тока

Рассмотрим выражение (4.6). Его можно представить в следующем виде:

$$\dot{U} = \left(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \right) \cdot \dot{I}, \quad (4.7)$$

или

$$U \cdot e^{j\psi_u} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \cdot e^{j\varphi} \cdot I \cdot e^{j\psi_i}, \quad (4.8)$$

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

Так как $U_m = U \cdot \sqrt{2}$ и $I_m = I \cdot \sqrt{2}$, то

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (4.9)$$

Таким образом, после определения амплитуды U_m и угла сдвига φ можно записать выражение для мгновенного напряжения

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi). \quad (4.10)$$

Выражение (4.7) называют законом Ома в комплексной форме. В этом выражении $\omega L = X_L$ – индуктивное сопротивление, $\frac{1}{\omega C} = X_C$ – емкостное сопротивление, $\omega L - \frac{1}{\omega C} = X$ – реактивное сопротивление.

Рассмотрим цепь, состоящую из параллельно соединённых элементов, обладающих активной проводимостью G , емкостной проводимостью B_C и индуктивной проводимостью B_L (рис. 4.3).

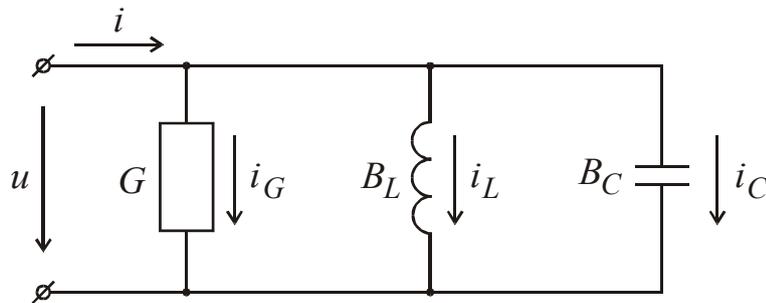


Рис. 4.3. Параллельное соединение элементов

Используя первый закон Кирхгофа, получим:

$$i_G + i_C + i_L = i, \quad (4.11)$$

где $i_G = G \cdot u$, $i_C = C \frac{du_C}{dt}$, $i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$,

или

$$G \cdot u + C \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L} \int u_L dt = i.$$

Предположим, что на входе действует напряжение, изменяющееся по закону $u = U_m \sin \omega t$, при этом и ток будет синусоидальным, его можно представить в виде

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi). \quad (4.12)$$

После некоторых преобразований можно получить:

$$I_m = U_m \sqrt{G^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)^2}, \quad (4.13)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{G}, \quad (4.14)$$

где $\frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{G}$ – полная проводимость цепи.

На рис. 4.4 изображена векторная диаграмма для данной цепи.

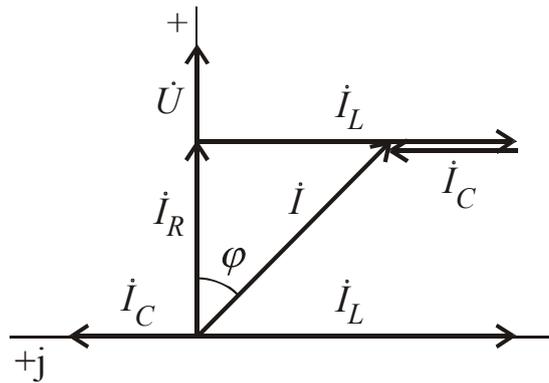


Рис. 4.4. Векторная диаграмма напряжения и токов

Для получения основных расчётных формул рассмотрим векторную диаграмму для последовательного соединения, содержащую только входной ток и напряжение (рис. 4.5). Разложим вектор напряжения \dot{U} на две составляющие: на активную составляющую \dot{U}_a , направленную вдоль вектора \dot{I} , и реактивную составляющую \dot{U}_p , направленную перпендикулярно вектору тока. Получим треугольник напряжений, для которого справедливы соотношения:

$$\begin{cases} U_a = U \cdot \cos \varphi = I \cdot R, \\ U_p = U \cdot \sin \varphi = I \cdot X, \\ U = I \cdot Z = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}. \end{cases}$$

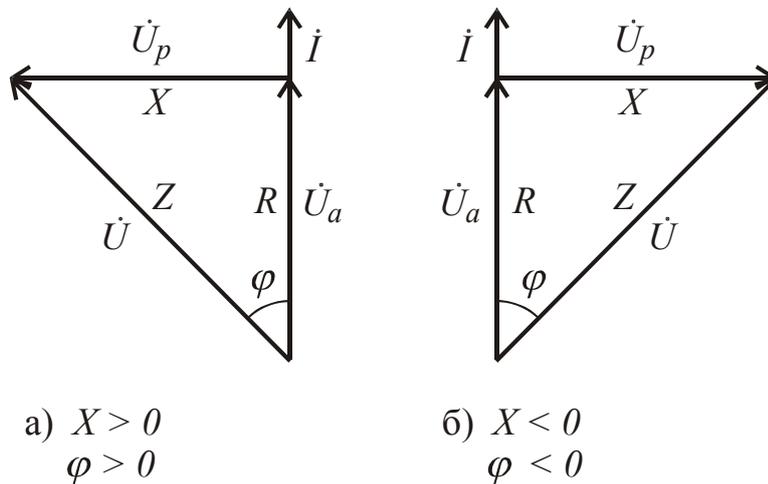


Рис. 4.5. Треугольники напряжений и сопротивлений:
а – при индуктивном, б – при емкостном характере цепи

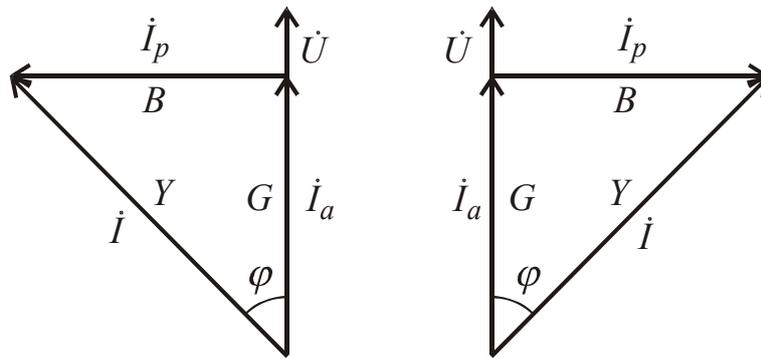
Разделив каждую сторону треугольника напряжений на величину тока I , получим треугольник сопротивлений. Из треугольника сопротивлений следует, что

$$\begin{cases} \cos \varphi = \frac{R}{Z}, \\ \sin \varphi = \frac{X}{Z}, \\ \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} R = Z \cdot \cos \varphi, \\ X = Z \cdot \sin \varphi, \\ Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \end{cases}$$

Для параллельного соединения элементов RLC можно построить треугольники токов и проводимостей (рис. 4.6).



а) $B > 0$
 $\varphi > 0$

б) $B < 0$
 $\varphi < 0$

Рис. 4.6. Треугольники токов и проводимостей:
а – при индуктивном, б – при емкостном характере цепи

Из треугольника токов можно записать:

$$\begin{cases} I_a = I \cdot \cos \varphi = U \cdot G, \\ I_p = I \cdot \sin \varphi = U \cdot B, \end{cases}$$

а из треугольника проводимостей

$$\begin{cases} \cos \varphi = \frac{G}{Y}, \\ \sin \varphi = \frac{B}{Y}, \\ \operatorname{tg} \varphi = \frac{B}{G}, \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} G = Y \cdot \cos \varphi, \\ B = Y \cdot \sin \varphi, \\ Y = \frac{I}{U} = \sqrt{G^2 + B^2}. \end{cases}$$

4.3. Содержание работы и описание установки

В данной лабораторной работе измеряют токи и напряжения в цепи переменного тока. По результатам измерений выполняют соответствующие расчёты и строят векторные диаграммы.

Лабораторная работа может быть проведена на лабораторных стендах двух типов.

Для проведения лабораторной работы на стенде первого типа используют генератор синусоидальной ЭДС напряжением 10 В, переменный резистор 1 кОм, постоянные резисторы 10 Ом и 1 кОм, конденсаторы 10 мкФ и 1 мкФ, катушку индуктивности 100 мГн, мультиметры, виртуальный двухканальный осциллограф и виртуальный ваттметр.

Для проведения лабораторной работы на стенде второго типа используют лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), реостат на 100 Ом, катушку индуктивности сопротивлением 30...60 Ом, магазин емкостей, многопредельные вольтметр и фазометр.

4.4. Порядок выполнения работы на лабораторном стенде первого типа

4.4.1. Ознакомиться со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

4.4.2. Собрать схему (рис. 4.7). Установить переключатели коннектора в положение 1:10. Подключить виртуальный осциллограф следующим образом:

- запустить программу "Приборы" в работу двукратным нажатием левой кнопки мыши;

- нажать на кнопку "Меню", расположенную в верхнем левом углу виртуальной панели, выбрать строку "Осциллограф";

- на экране в выбранном масштабе (соответствующем положению переключателей коннектора) компьютер отобразит кривые, соответствующие изменению сигнала на входах (зелёным цветом показано изменение напряжения на входе АСН1 – АСН5, белым цветом показано изменение напряжения на входе АСН0 – АСН4).

Примечание. Если изображение неустойчиво, необходимо поменять вход синхронизации, нажав на кнопку , расположенную под надписью "Вход синхр.:" внизу панели осциллографа.

Для изменения времени развёртки виртуального осциллографа необходимо перемещать движок, расположенный под надписью "Развёртка" внизу панели осциллографа.

Запрещается подавать на входы коннектора напряжение более ± 5 В при положении переключателей коннектора 1:1 и более ± 50 В при положении переключателей коннектора 1:10. Запрещается соединять элементы исследуемой схемы или генераторы напряжений со входами коннектора, кроме аналоговых входов АСН0 – АСН7.

4.4.3. Белым цветом показана волновая диаграмма напряжения на резисторе, зелёным – на конденсаторе. Снять показания приборов (и записать в табл. 4.1) для трёх режимов работы схемы:

а) при равенстве сопротивлений $R = X_C$, которое определяется по волновым диаграммам, при этом $U_C = \frac{U}{\sqrt{2}}$, что следует из векторной диаграммы (рис. 4.7б);

б) при $R > X_C$;

в) при $R < X_C$.

Зарисовать волновые диаграммы для одного из режимов работы схемы (по заданию преподавателя).

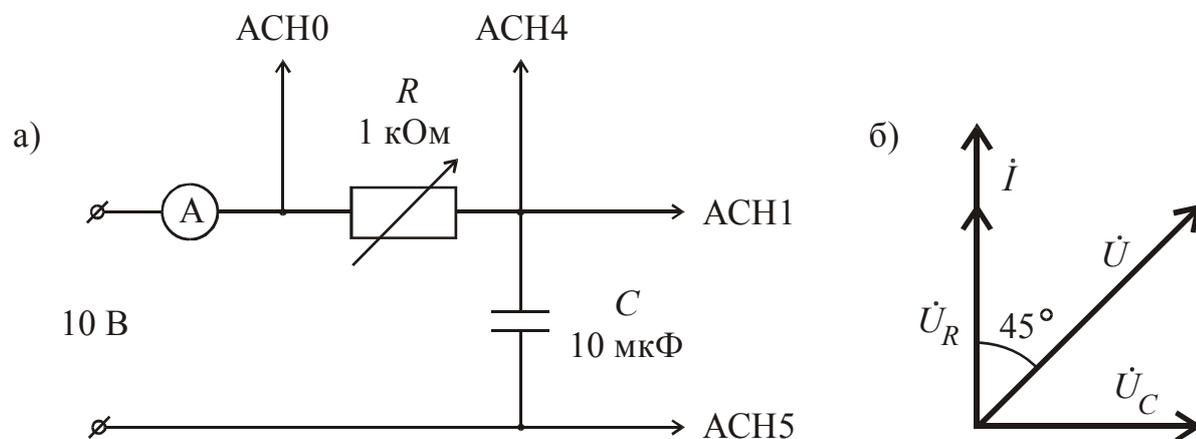


Рис. 4.7. Последовательное соединение элементов RC :
а – схема, б – векторная диаграмма

4.4.4. Собрать схему (рис. 4.8). Установить переключатели коннектора в положение 1:10. Подключить виртуальный ваттметр следующим образом:

– нажать на кнопку "Меню", расположенную в верхнем левом углу виртуальной панели вольтметра и амперметра, выбрать строку "Дополнительные приборы";

– нажать на кнопку  на виртуальной панели дополнительных приборов, выбрать строку "Ваттметр Активная мощность P".

На экране появится значение активной мощности в мВт, измеренное с учётом положения переключателей коннектора. Для получения значения реальной активной мощности следует умножить измеренное значение активной мощности на 100.

П р и м е ч а н и е. Для снятия показаний виртуальных приборов с какой-либо из трёх выведенных на экран виртуальных панелей необходимо подвести курсор к необходимой панели и нажать левую кнопку мыши.

Показания приборов записать в табл. 4.1.

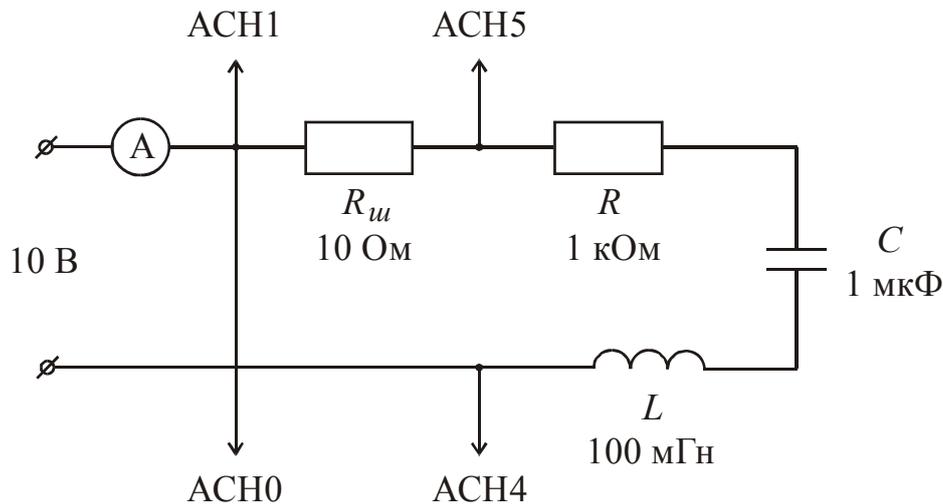


Рис. 4.8. Схема последовательного соединения элементов RLC

4.4.5. Собрать схему (рис. 4.9). Подключить виртуальный ваттметр. Показания приборов записать в табл. 4.1.

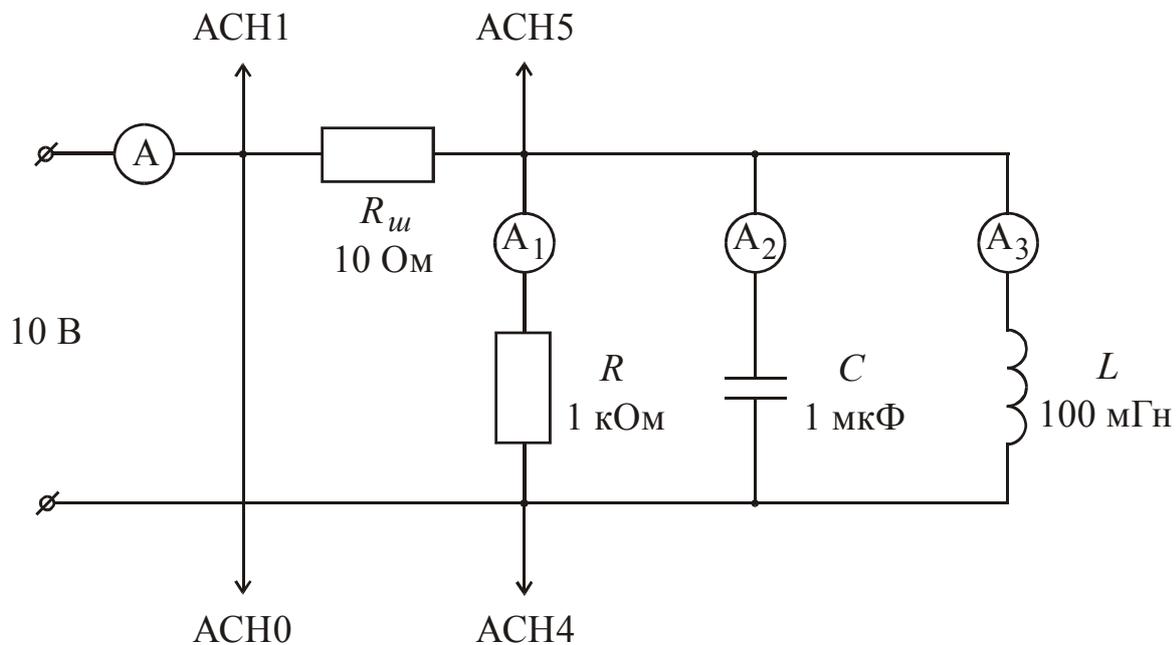


Рис. 4.9. Схема параллельного соединения элементов RLC

4.4.6. Отключить виртуальный осциллограф и виртуальный ваттметр, нажав на кнопку "Выкл." на виртуальной панели амперметра и вольтметра.

4.5. Порядок выполнения работы на лабораторном стенде второго типа

4.5.1. Ознакомьтесь со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

4.5.2. Собрать схему (рис. 4.10). Снять показания приборов (и записать в табл. 4.1) для трёх режимов работы схемы:

а) при равенстве сопротивлений $R = X_C$, которое определяется по показаниям вольтметров, при этом $U_C = \frac{U}{\sqrt{2}}$, что следует из векторной диаграммы

(рис. 4.76);

б) при $R > X_C$;

в) при $R < X_C$.

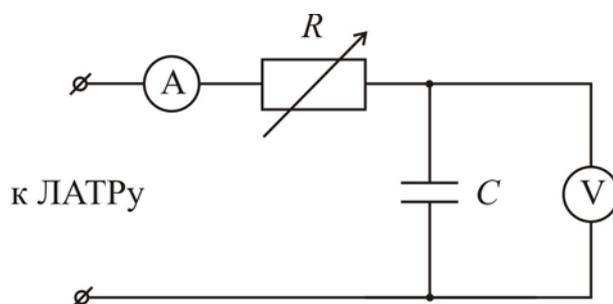


Рис. 4.10. Последовательное соединение элементов RC

4.5.3. Собрать схему (рис. 4.11). Показания приборов записать в табл. 4.1.

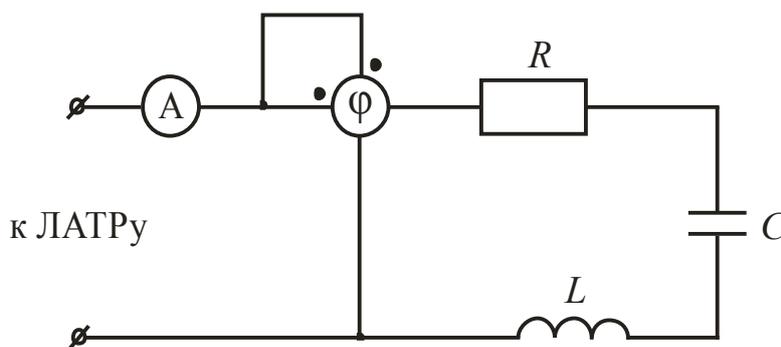


Рис. 4.11. Схема последовательного соединения элементов RLC

4.5.3. Собрать схему (рис. 4.12). Показания приборов записать в табл. 4.1.

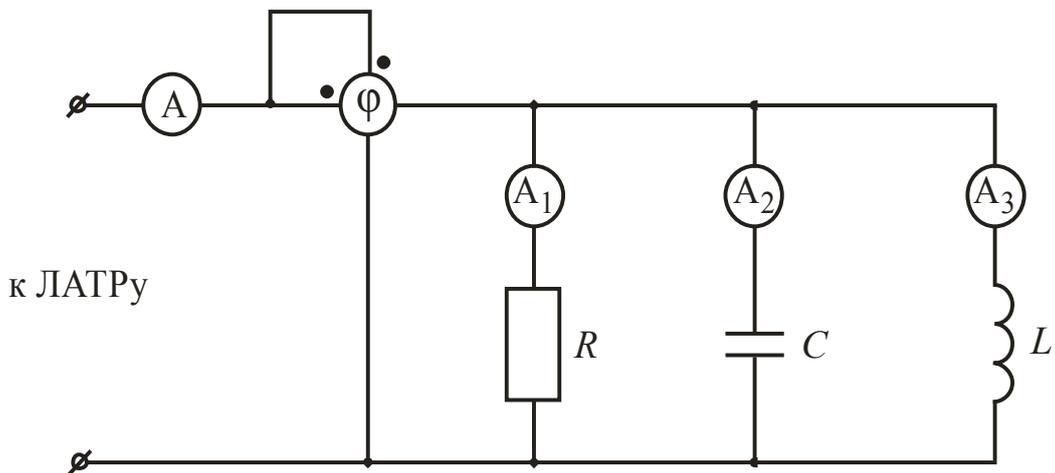


Рис. 4.12. Схема параллельного соединения элементов RLC

4.6. Порядок обработки результатов измерений

4.6.1. Определить для всех режимов активное, реактивное и полное сопротивление, угол сдвига фаз и проводимости цепи. Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

4.6.2. Построить векторные диаграммы и треугольники сопротивлений в соответствующем масштабе для всех режимов.

Таблица 4.1

Результаты измерений и вычислений

Схема		Измерено						Вычислено							
		$I,$ А	$U_R,$ В	$W,$ Вт	$U_C,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R,$ Ом	$X,$ Ом	$Z,$ Ом	φ	$Y,$ См	$B,$ См	$G,$ См
Последовательная цепь RC	$R = X_C$			—		—	—						—	—	—
	$R > X_C$			—		—	—						—	—	—
	$R < X_C$			—		—	—						—	—	—
Последовательная цепь RLC					—	—	—						—	—	—
Параллельная цепь RLC					—										

4.7. Содержание отчёта

В отчёте по работе должна быть отражена цель работы, приведены схемы измерений, таблица опытных и расчётных данных, пример расчёта, векторные и волновые диаграммы, выводы по работе.

5. Повышение коэффициента мощности электрических установок

5.1. Цель работы

Целью работы является изучение емкостного метода повышения коэффициента мощности электрической установки.

5.2. Краткие теоретические сведения

Система электроснабжения состоит из генераторов электрической энергии, линии электропередачи и потребителя, обычно удалённого на значительное расстояние. Потребитель преобразует электрическую энергию в другие виды энергии. Кроме активного сопротивления, потребитель может обладать и индуктивным сопротивлением (электродвигатели, трансформаторы и пр.), в котором в течение четверти периода накапливается энергия, а затем в течение другой четверти периода возвращается генератору обратно. Эта энергия, называемая реактивной, загружает линию электропередачи и обмотки генератора дополнительным реактивным током. Так как обмотки генератора рассчитываются на определенную величину тока независимо от его характера, то протекание в цепи реактивной составляющей тока снижает количество передаваемой полезной энергии. Кроме того, реактивный ток вызывает дополнительные потери энергии на активных сопротивлениях линии электропередачи и обмоток генератора, ухудшая тем самым КПД всей системы.

Наиболее полно работа системы электроснабжения характеризуется отношением активной мощности P к полной мощности S . Это отношение называется коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (5.1)$$

Повышение коэффициента мощности установок имеет важное народно-хозяйственное значение, так как позволяет без дополнительных капитальных затрат на расширение существующих электростанций и электросетевых объектов передать потребителям существенное количество дополнительной энергии.

Основной метод улучшения коэффициента мощности заключается в подключении емкости параллельно нагрузке (рис. 5.1).

В этом случае реактивная энергия колеблется внутри образовавшегося контура, состоящего из емкости и индуктивности, не возвращаясь в генератор. Ток генератора и линии снижается на величину I_C (рис. 5.1) за счёт снижения реактивной составляющей тока. Повышать коэффициент мощности выше значения 0,92...0,95 экономически нецелесообразно, так как тогда для сравнительно незначительного уменьшения тока в линии требуется значительная емкость.

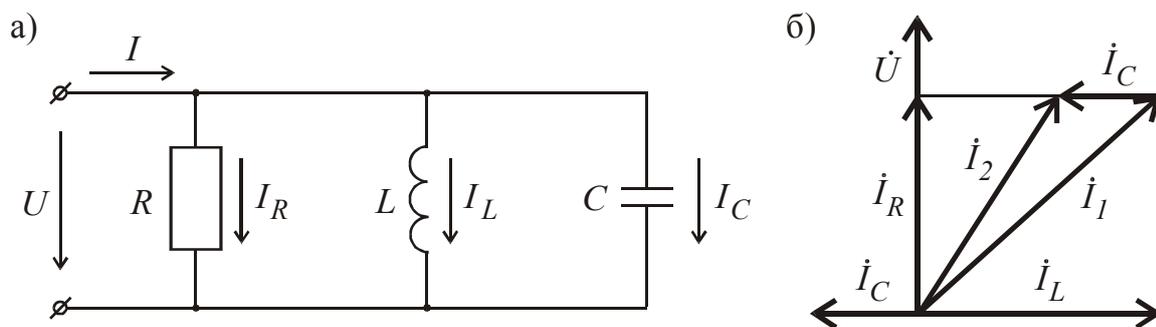


Рис. 5.1. Подключение конденсатора для повышения коэффициента мощности:
а – схема, б – векторная диаграмма токов и напряжений

Расчёт емкости, необходимой для улучшения коэффициента мощности до требуемых пределов, можно выполнить следующим образом.

На рис. 5.2 изображён вектор тока I_1 электрической установки с $\cos \varphi_1$. Предположим, что требуется улучшить коэффициент мощности до значения $\cos \varphi_2$. Из векторных диаграмм (рис 5.1 и 5.2) видно, что для этого ток конденсатора I_C должен иметь величину

$$I_C = I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2. \quad (5.2)$$

Умножив обе части этого выражения на U , получим

$$U \cdot I_C = U \cdot I_1 \sin \varphi_1 - U \cdot I_2 \sin \varphi_2, \quad (5.3)$$

где $U \cdot I_C = Q_C$ – реактивная мощность конденсаторной установки;
 $U \cdot I_1 = S$ – полная мощность.

Так как $S = \frac{P}{\cos \varphi}$, то выражение (5.3) можно записать в виде

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi_1 - P \operatorname{tg} \varphi_2. \quad (5.4)$$

С другой стороны,

$$Q_C = U \cdot I_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \cdot \omega C. \quad (5.5)$$

Объединив выражения (5.4) и (5.5), после некоторых преобразований получим

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (5.6)$$

или, с учётом, что $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$,

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right). \quad (5.7)$$

Если до улучшения коэффициента мощности генератор работал в номинальном режиме, т.е. при $I = I_n$, то после улучшения $\cos \varphi$ генератор сможет отдавать потребителю дополнительную мощность P_o . При этом полная мощность сохранит свое номинальное значение $S = S_n$:

$$S_n = U \cdot I_n = \sqrt{(P_1 + P_o)^2 + Q_2^2}. \quad (5.8)$$

Из этого выражения можно определить

$$P_o = \sqrt{S_n^2 - Q_2^2} - P_1 = U \sqrt{I_1^2 - I_2^2 (1 - \cos^2 \varphi_2)} - P_1. \quad (5.9)$$

Относительное значение дополнительной мощности

$$P_\gamma = \frac{P_o}{P_1} \cdot 100\%. \quad (5.10)$$

После подключения добавочной нагрузки, соответствующей найденной дополнительной мощности, коэффициент мощности будет иметь значение

$$\cos \varphi_3 = \frac{P + P_o}{S_n}. \quad (5.11)$$

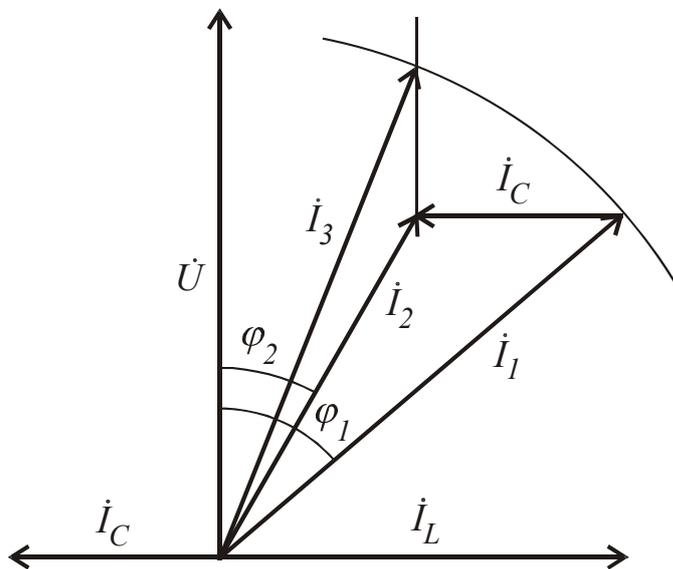


Рис. 5.2. Векторная диаграмма к расчёту величины емкости

5.3. Содержание работы и описание установки

В данной лабораторной работе измеряют токи, напряжения и мощности в цепи переменного тока. По результатам измерений выполняют соответствующие расчёты и строят векторные диаграммы.

Работа проводится на лабораторном стенде второго типа. Для проведения лабораторной работы используют лабораторный трансформатор (ЛАТР), разборный трансформатор, магазин емкостей, реостат на 150...250 Ом, два амперметра на 2 А, ваттметр многопредельный. Для получения линейной индуктивности трансформатор собирается с катушкой 500 витков и с прокладками толщиной в 1 мм между ярмом и стержнями магнитопровода.

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Ознакомьтесь со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

5.4.2. Собрать схему (рис. 5.3). Установить на входе напряжение 100 В. Изменением сопротивления реостата установить ток на входе цепи 1,5 А. Записать показания приборов при выключенном конденсаторе в табл. 5.1.

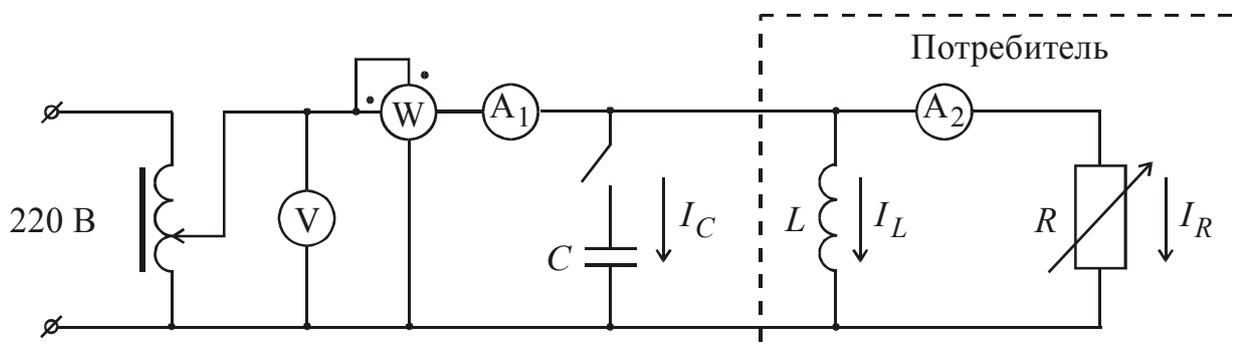


Рис. 5.3. Схема опытов

Таблица 5.1

Результаты измерений и вычислений

Опыт	U , В	I , А	I_R , А	P , Вт	$\cos \varphi_1$	R , Ом	I_p , А	$\cos \varphi_2$	$\cos \varphi_3$
1	100	1,5						—	—
2	100				—				—
3	100	1,5			—			—	

5.4.3. Рассчитать емкость, необходимую для повышения коэффициента мощности установки до значения $\cos \varphi_2$, взятого из табл. 5.2, по формуле (5.6) или (5.7).

Таблица 5.2

Значения $\cos \varphi_2$

Бригада	1	2	3	4
$\cos \varphi_2$	0,92	0,93	0,94	0,95

5.4.4. Подключить емкость рассчитанной величины, записать показания приборов в табл. 5.1. Вычислить фактическое значение $\cos \varphi_2$ для этого режима.

5.4.5. По формуле (5.10) рассчитать значение дополнительной мощности P_{δ} , которую можно получить за счёт разгрузки линии от реактивного тока.

5.4.6. Проверить на опыте результаты расчёта, для чего, изменяя сопротивление реостата, установить первоначальное значение входного тока. Определить значение P_{δ} , $\cos \varphi_3$.

5.4.7. Построить в выбранном масштабе векторную диаграмму, отразив на ней все изменения, произошедшие в цепи.

5.5. Содержание отчёта

В отчёте по работе должна быть отражена цель работы, приведена схема измерений, таблица опытных и расчётных данных, пример расчёта, векторная диаграмма, выводы по работе.

6. Резонансные явления в линейных электрических цепях переменного тока

6.1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование явлений резонанса напряжений и резонанса токов.

6.2. Краткие теоретические сведения

В электрических цепях переменного тока, содержащих разнохарактерные реактивные элементы, может возникнуть явление резонанса, при котором входное сопротивление или входная проводимость цепи становятся активными и, следовательно, напряжение и ток на входе совпадают по фазе. В линейных электрических цепях добиться резонансного режима можно путём подбора параметров цепи или изменением частоты питающего напряжения.

При изучении резонансных явлений различают резонанс напряжений, возникающий в цепи с последовательным соединением относительно источника разнохарактерных реактивных элементов, и резонанс токов, появляющийся при их параллельном соединении относительно источника питания.

Рассмотрим простейшую цепь с последовательным соединением линейных элементов RLC (рис. 6.1). Комплекс полного сопротивления этой цепи определяется выражением

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (6.1)$$

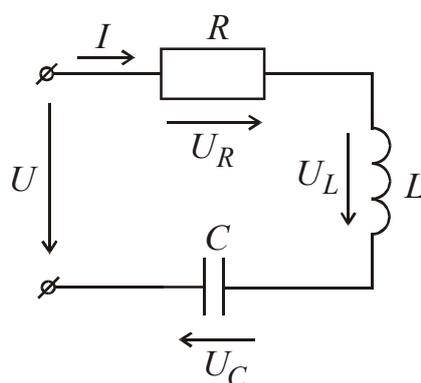


Рис. 6.1. Последовательное соединение элементов

При резонансе напряжений реактивное сопротивление этой цепи равно нулю, т.е.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (6.2)$$

Для выполнения этого условия достаточно изменять одну из трёх величин ω , L , C , не затрагивая две другие. Значение индуктивного или емкостного сопротивления при резонансе называют характеристическим сопротивлением контура

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6.3)$$

где ω_0 – резонансная частота, рад/с.

При исследовании резонансных явлений вводят также понятие добротности контура Q , численно равной отношению характеристического сопротивления к активному сопротивлению контура,

$$Q = \frac{\rho}{R}. \quad (6.4)$$

Легко показать, что добротность контура определяет, во сколько раз напряжение на реактивном элементе цепи при резонансе превышает входное напряжение источника питания. Значения токов, напряжений, угла сдвига фаз могут быть записаны для цепи (рис. 6.1) в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \\ U_L = I \cdot \omega L, \\ U_R = I \cdot R, \\ U_C = I \cdot \frac{1}{\omega C}, \\ \varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}, \\ \omega = 2\pi f. \end{array} \right. \quad (6.5)$$

Если считать входное напряжение U неизменным, а в качестве переменной величины рассмотреть, например, значение ω , то характер основных зависимостей можно представить в виде графиков (рис. 6.2).

При резонансной частоте ω_0 входное сопротивление цепи имеет минимальное значение и, следовательно, ток I достигает максимума. При уменьшении ω или при её увеличении от резонансного значения ток уменьшается, так как входное сопротивление цепи всегда оказывается больше, чем при резонансной частоте.

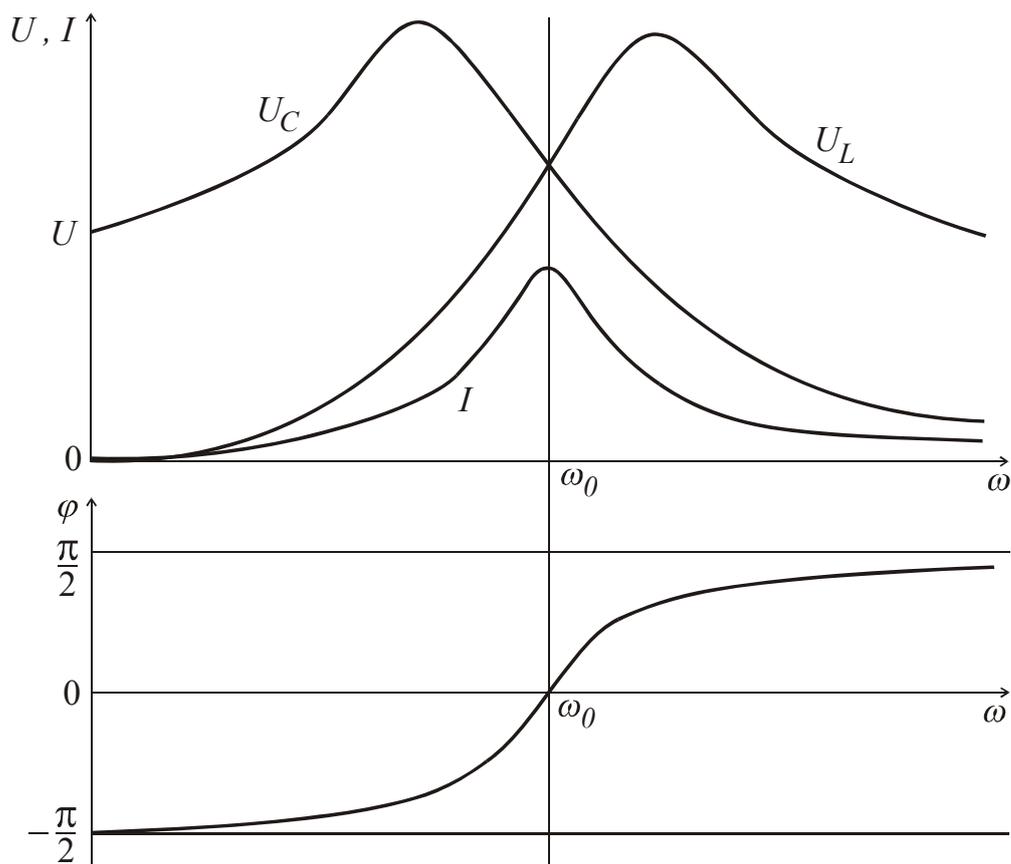


Рис. 6.2. Амплитудно-частотные характеристики резонанса напряжений

Кривая напряжения на емкости имеет более сложный характер, чем кривая тока. При уменьшении частоты сопротивление емкости возрастает до бесконечности и напряжение на конденсаторе становится практически равным входному. При значительном увеличении частоты ее сопротивление стремится к нулю, поэтому напряжение на конденсаторе уменьшается практически до нуля. Максимум напряжения на конденсаторе в общем случае не совпадает с максимумом тока.

При резонансе наступает равенство модулей U_L и U_C . Учитывая разную фазу этих напряжений, их суммарное напряжение становится равным нулю. В результате входное напряжение оказывается равным напряжению на активном сопротивлении R , т. е.

$$U = U_R = I \cdot R. \quad (6.6)$$

Векторная диаграмма напряжений и токов для резонанса напряжений и случая, когда $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, приведена на рис. 6.3.

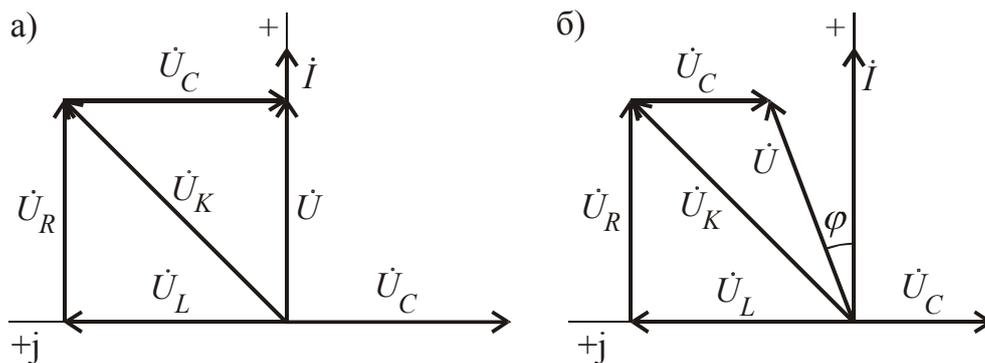


Рис. 6.3. Векторные диаграммы напряжений и тока:

а– при резонансе напряжений; б – при $\omega L > \frac{1}{\omega C}$

При проведении экспериментальных исследований используются реальные катушки индуктивности, имеющие также активное сопротивление. В этом случае напряжение на катушке U_K , определяемое вольтметром, содержит составляющие U_R и U_L и определяется как

$$U_K = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}. \quad (6.7)$$

Для определения действительных значений U_R и U_L существует ряд практических приемов. В данной лабораторной работе активное сопротивление катушки можно определить омметром или рассчитать при резонансном режиме, когда $U_L = U_C$, следовательно, $U_K = U_R = I \cdot R$.

При параллельном соединении элементов, имеющих разный характер, может возникнуть резонанс токов (рис. 6.4). Проводимость такой цепи будет чисто активной, если будут скомпенсированы реактивные проводимости, а именно

$$\omega C = \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (6.8)$$

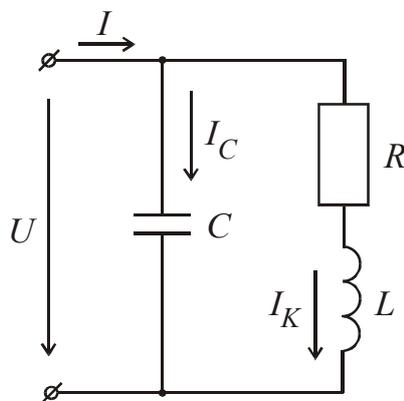


Рис. 6.4. Параллельное соединение элементов

Для определения основных величин можно использовать следующие формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2}, \\ B = \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} - \omega C, \\ I = U \cdot \sqrt{G^2 + B^2}, \\ I_K = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \\ I_C = U \cdot \omega C, \\ \varphi = \arctg \frac{B}{G}. \end{array} \right. \quad (6.9)$$

Если считать входное напряжение U неизменным, а в качестве переменной величины рассмотреть, например, значение ω , то характер основных зависимостей можно представить в виде графиков (рис. 6.5).

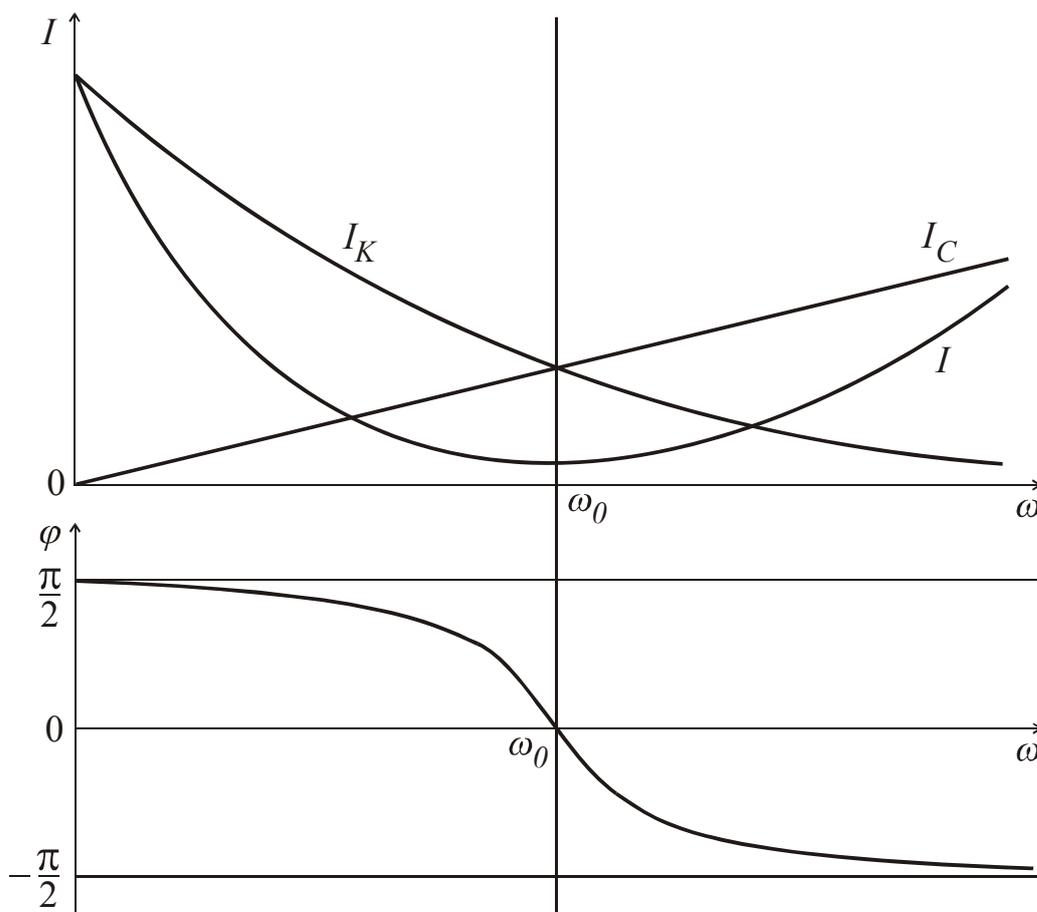


Рис. 6.5. Амплитудно-частотные характеристики резонанса токов

При резонансной частоте ω_0 входная проводимость цепи имеет минимальное значение и, следовательно, ток I минимален. При уменьшении ω или при ее увеличении от резонансного значения ток увеличивается, так как входная проводимость цепи всегда оказывается больше, чем при резонансной частоте.

Векторные диаграммы, поясняющие резонансный режим и случай, когда $B_C > B_L$, приведены на рис. 6.6.

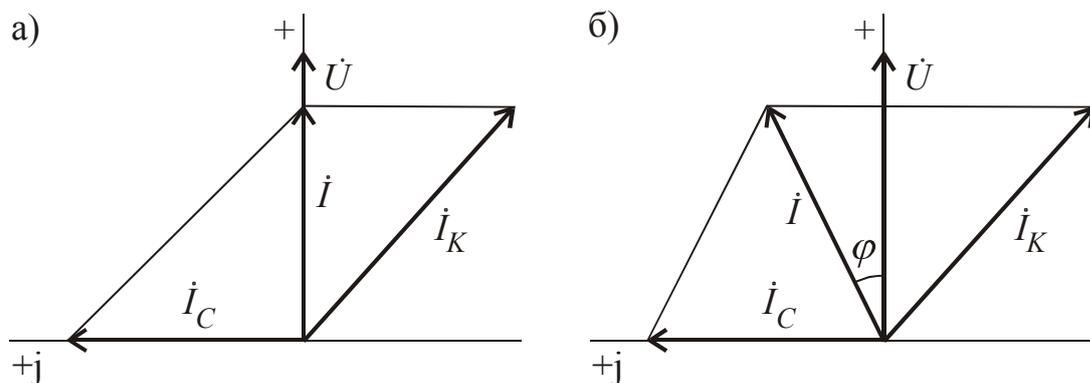


Рис. 6.6. Векторные диаграммы напряжения и токов:
а – при резонансе токов, б – при $B_C > B_L$

6.3. Содержание работы и описание установки

В данной лабораторной работе измеряют токи и напряжения в цепи переменного тока. По результатам измерений выполняют соответствующие расчёты, строят векторные диаграммы и амплитудно-частотные характеристики резонансных режимов.

Лабораторная работа может быть проведена на лабораторных стендах двух типов.

Для проведения лабораторной работы на стенде первого типа используют генератор напряжений специальной формы, конденсатор емкостью 10 мкФ, катушку индуктивности 10 мГн, токоограничивающий резистор 100 Ом, мультиметры. На индикаторе генератора напряжений специальной формы отображается выходная частота в Гц. Трёхпозиционный переключатель генератора необходимо переместить в положение "синусоидальное напряжение". Выходы генератора обозначены как "0 В" и "ВЫХОД". С помощью двухпозиционного переключателя можно переключать диапазоны выходных частот: от 10 до 1000 Гц и от 1 до 100 кГц.

Для проведения лабораторной работы на стенде второго типа используют лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), катушку индуктивности с регулируемым значением L , магазин емкостей, три вольтметра на напряжения до 600 В и три амперметра на токи до 5 А.

6.4. Порядок выполнения работы

6.4.1. Ознакомиться со стендом и основным оборудованием для лабораторной работы. После сборки каждой схемы следует проверить схему и показать преподавателю.

6.4.2. В зависимости от типа лабораторного стенда собрать схему по рис. 6.7 или 6.8. Изменяя частоту или индуктивность, опытным путём добиться режима резонанса напряжений. Показания приборов занести в табл. 6.1.

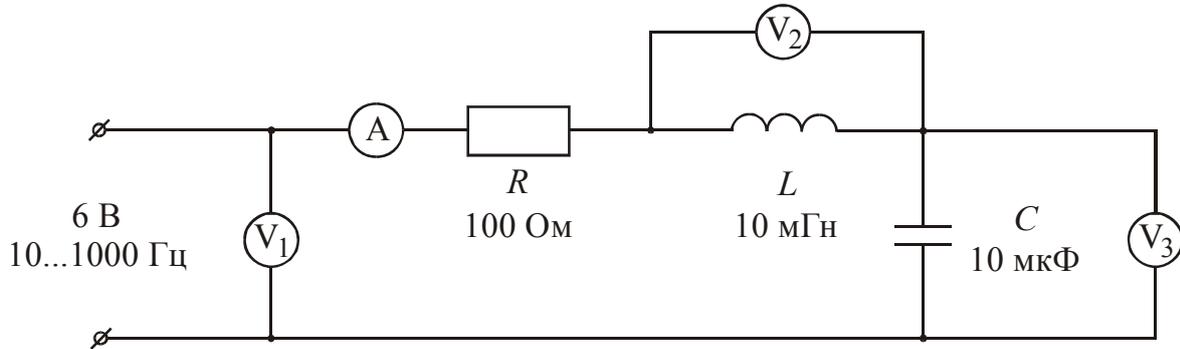


Рис. 6.7. Схема исследования резонанса напряжений на лабораторном стенде первого типа

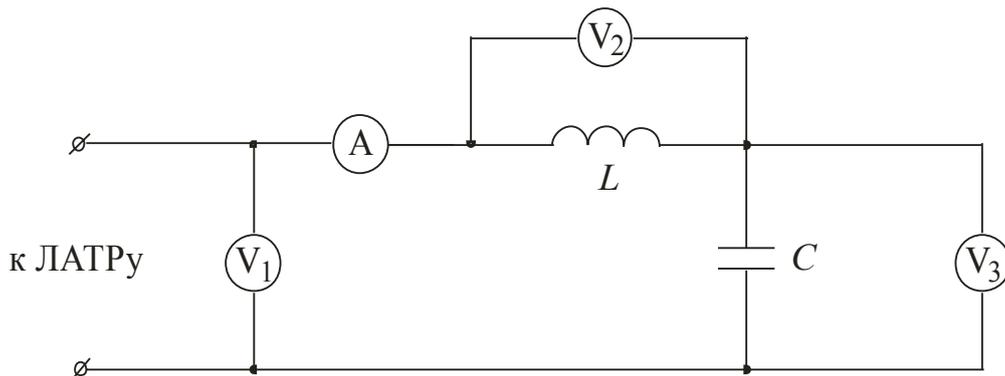


Рис. 6.8. Схема исследования резонанса напряжений на лабораторном стенде второго типа

Таблица 6.1

Исследование режимов работы цепи
с последовательным соединением индуктивности и емкости

Опыт	Опытные данные				Результаты расчёта			
	f , Гц	I , А	U_K , В	U_C , В	L , Гн	U_L , В	U_R , В	φ

6.4.3. Изменяя частоту или индуктивность, провести 3-4 опыта при $f < f_0$ или $L < L_0$ и 3-4 опыта при $f > f_0$ или $L > L_0$. Результаты измерений внести в табл. 6.1.

6.4.4. Измерить активное сопротивление катушки омметром и выполнить расчёт U_L , U_R и φ , используя формулы (6.5) и (6.7). Результаты расчётов внести в табл. 6.1.

6.4.5. В зависимости от типа лабораторного стенда собрать схему по рис. 6.9 или 6.10. Изменяя частоту или индуктивность, опытным путём добиться режима резонанса токов. Показания приборов занести в табл. 6.2.

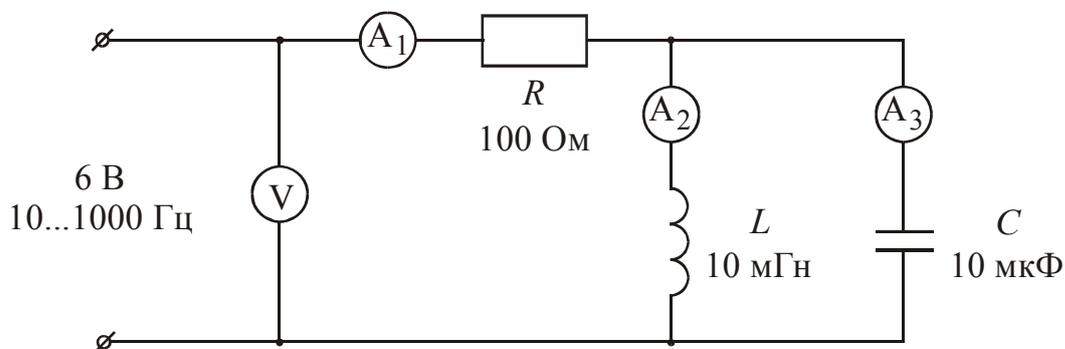


Рис. 6.9. Схема исследования резонанса токов на лабораторном стенде первого типа

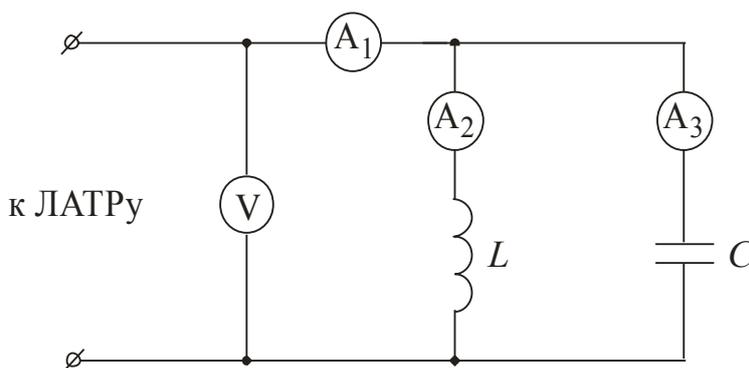


Рис. 6.10. Схема исследования резонанса токов на лабораторном стенде первого типа

Таблица 6.2

Исследование режимов работы цепи с параллельным соединением индуктивности и емкости

f , Гц	L , Гн	I , А	I_K , А	I_C , А	φ

6.4.7. Изменяя частоту или индуктивность, провести 3-4 опыта при $f < f_0$ или $L < L_0$ и 3-4 опыта при $f > f_0$ или $L > L_0$. Результаты измерений внести в табл. 6.2.

6.4.8. Произвести расчет φ , используя формулу (6.9). Результаты расчётов внести в табл. 6.2.

6.4.9. В зависимости от типа используемого лабораторного стенда, используя данные табл. 6.1, построить на одном графике амплитудно-частотные

характеристики $U_C(f)$, $U_L(f)$, $I_{\text{посл}}(f)$ и $\varphi(f)$ или зависимости $U_C(L)$, $U_L(L)$, $I_{\text{посл}}(L)$ и $\varphi(L)$.

6.4.10. В зависимости от типа используемого лабораторного стенда, используя данные табл. 6.2, построить на одном графике амплитудно-частотные характеристики $I_C(f)$, $I_K(f)$, $I_{\text{пар}}(f)$ и $\varphi(f)$ или зависимости $I_C(L)$, $I_K(L)$, $I_{\text{пар}}(L)$ и $\varphi(L)$.

6.4.11. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для схем параллельного и последовательного соединения элементов LC при работе цепей в режимах резонанса, до резонанса, после резонанса.

6.5. Содержание отчёта

В отчёте по работе должна быть отражена цель работы, приведены схемы измерений, таблицы опытных и расчётных данных, пример расчёта, векторные диаграмму, графики выводы по работе.

Литература

1. *Сулейманов Р. Я.* Конспект лекций по теоретическим основам электротехники в двух частях. – Екатеринбург: УрГУПС, 2007.
2. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. – М.: Гардарики, 2002.
3. *Копылов И. П.* Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2000.

Учебное издание

Рашит Яхъевич Сулейманов
Алексей Александрович Косяков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторный практикум

Часть 1

Для студентов специальностей
190401 – «Электроснабжение железных дорог»,
190303 – «Электрический транспорт железных дорог»,
210700 – «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
220401 – «Мехатроника»

3-е издание, исправленное

Редактор *С. В. Пилюгина*
Подписано в печать 24.06.09. Формат 60 × 84 /16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,8
Тираж 250 экз. Заказ № 277

Издательство УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

