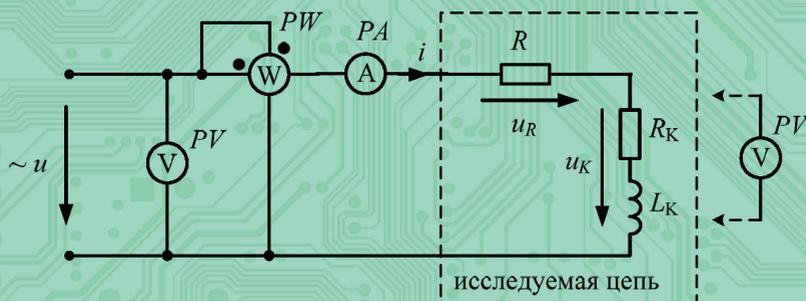
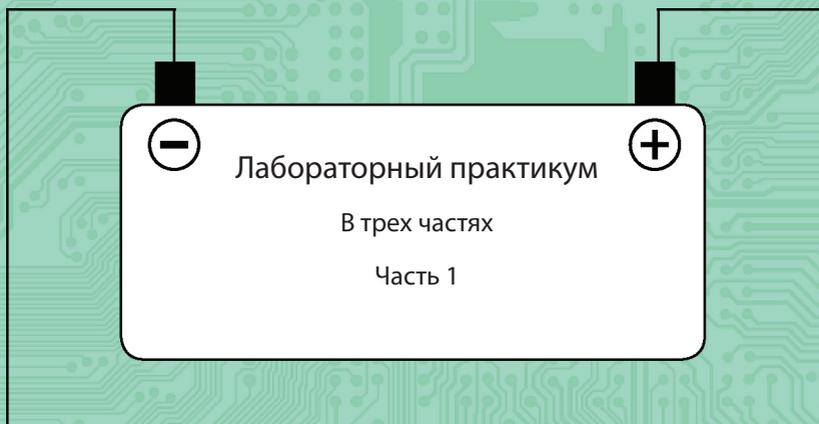


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт химии и энергетики

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2020

ISBN 978-5-8259-1548-7

УДК 621.3.01
ББК 31.211

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Самарского государственного
технического университета *В.Н. Козловский*;
д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного
университета *В.В. Вахнина*.

Авторы:

С.В. Шлыков, Н.В. Шаврина (ч. 1, 2); Д.А. Нагаев (ч. 3).

Теоретические основы электротехники : лабораторный практикум.
В 3 частях / С.В. Шлыков, Н.В. Шаврина, Д.А. Нагаев. – Тольятти :
Изд-во ТГУ, 2020. – ISBN 978-5-8259-1551-7.

Ч. 1 / С.В. Шлыков, Н.В. Шаврина. – 1 оптический диск. –
ISBN 978-5-8259-1548-7.

В практикуме представлены методические указания к выполнению лабораторных работ по учебному курсу «Теоретические основы электротехники 1». Практикум содержит программу выполнения лабораторных работ, пакет заданий индивидуальной расчетной части, требования к оформлению отчета, а также описание блоков учебного комплекта лабораторного оборудования «Электрические и магнитные цепи».

Предназначен для студентов очной формы обучения по направлениям подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

Редактор *О.И. Елисеева*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 20.11.2020.

Объем издания 8,9 Мб.

Комплектация издания:
компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-39-19.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
Правила внутреннего распорядка и техники безопасности при выполнении лабораторных работ	6
Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ	8
Лабораторная работа 1. Исследование разветвленных цепей постоянного тока	10
Лабораторная работа 2. Исследование линейных цепей синусоидального тока	20
Лабораторная работа 3. Исследование электрических цепей синусоидального тока с индуктивно связанными катушками	34
Лабораторная работа 4. Исследование режимов работы трехфазных цепей	43
Библиографический список	59
Приложение 1	60
Приложение 2	62

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» относится к базовой части профессионального цикла дисциплин и базируется на таких дисциплинах, как «Высшая математика» и «Физика».

Цель дисциплины состоит в изучении электромагнитных явлений в цепях, представленных идеализированными элементами схем замещения, при различных воздействиях и режимах.

В ходе изучения учебного курса «Теоретические основы электротехники 1» перед студентами ставятся следующие задачи:

- 1) ознакомиться с терминологией и символикой теории линейных электрических цепей;
- 2) научиться способам записи уравнений состояния элементов и участков цепей, основным методам расчета, анализа и синтеза линейных электрических цепей с использованием схем замещения;
- 3) получить практические навыки в работе с электронными и электрическими устройствами и оборудованием;
- 4) развить творческие способности, активизировать свою познавательную деятельность;
- 5) узнать методы проведения эксперимента и обработки результатов измерений при выполнении физического эксперимента.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны:

- убедиться в правильности теоретических положений, рассмотренных на лекционных занятиях, повторить и закрепить теоретический материал этих занятий;
- получить практический опыт чтения и сборки электрических схем, а также работы с электрооборудованием;
- научиться снимать показания электроизмерительных приборов, обрабатывать полученные данные и на их основе делать выводы о характере исследуемых процессов;
- на основе составления отчетов по лабораторным работам получить навыки оформления электротехнической документации;
- получить практические навыки по управлению электрическим оборудованием и технике безопасности при работе с ним.

При работе в лаборатории во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования студент должен строго выполнять следующие правила.

ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Приступая к работе в лаборатории, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. После ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписать в соответствующем журнале.

3. Во время работы на лабораторных стендах не должно быть никаких лишних предметов, не используемых в схемах проводов и приборов.

4. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому.

5. Приступая к работе в лаборатории, студенческая группа делится на бригады по 3 человека, которые затем распределяются по лабораторным стендам.

6. Монтаж схем необходимо вести при отключенном питании лабораторного стенда в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме.

7. При сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались петлями. Приборы и электрооборудование расставляются так, чтобы было удобно ими пользоваться.

8. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю или учебному мастеру.

9. Включение электрической цепи под напряжение (после проверки) производится только с разрешения и в присутствии преподавателя или учебного мастера.

10. Перед включением напряжения следует предупредить об этом всех участников работы. Необходимо убедиться, что никому из них не угрожает опасность попасть под напряжение.

11. Переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания.

12. Запрещается прикасаться пальцами, карандашами и другими предметами к оголенным токоведущим частям электрической цепи, находящимся под напряжением.

13. Во время работы на лабораторных стендах запрещается отходить от приборов и оборудования, находящихся под напряжением.

14. Запрещается без разрешения преподавателя или учебного мастера переносить приборы с одного места на другое и трогать оборудование, не используемое в данной работе.

15. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, могущий быть причиной поражения электрическим током.

16. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

17. При обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю или учебному мастеру.

18. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания. При потере сознания и остановке дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Подготовка к лабораторным работам

Каждая лабораторная работа выполняется в течение четырех академических часов. Лабораторные занятия проводятся фронтальным методом, т. е. студенты учебной группы выполняют одновременно одну и ту же работу.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- 1) предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;
- 2) ознакомиться с описанием лабораторной работы, установить, в чем состоит основная цель и задача работы;
- 3) выполнить индивидуальную расчетную часть и изучить теоретический материал, относящийся к данной лабораторной работе;
- 4) подготовить бланк отчета по лабораторной работе, который должен содержать описание цели работы, программу работы, электрическую схему исследуемой цепи, индивидуальную расчетную часть, необходимые таблицы и расчетные формулы.

Неподготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются!

Задание для подготовки лабораторной работы и оформление отчета выполняются самостоятельно во внеаудиторное время. Образец оформления протокола имеется на стенде в лаборатории.

Выполнение лабораторных работ

К выполнению лабораторной работы студенты допускаются после проверки преподавателем наличия бланка отчета, выполнения индивидуальной расчетной части, знаний теоретического материала и порядка выполнения лабораторной работы.

Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые сначала последовательно, а затем параллельно. По окончании сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя или учебного мастера.

Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро. Результаты опыта предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только с разрешения преподавателя при отключенном напряжении питания. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

Оформление отчета по лабораторным работам

Отчет по лабораторной работе оформляется индивидуально каждым студентом, выполнившим необходимые эксперименты, независимо от того, выполнялся эксперимент индивидуально или в составе группы. Отчет по лабораторной работе должен содержать описание цели работы, программу работы, электрическую схему исследуемой цепи, индивидуальную расчетную часть, результаты эксперимента (таблицы данных, графики экспериментальных зависимостей, результаты обработки эксперимента и т. д.), выводы по работе. Все графические материалы (рисунки, чертежи, графики, схемы и т. д.) должны быть выполнены в соответствии с ЕСКД. При оформлении отчета по лабораторной работе следует руководствоваться требованиями ГОСТ 7.32-2017 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Лабораторная работа 1

Исследование разветвленных цепей постоянного тока

Цель работы — изучение расчетных и экспериментальных методов анализа разветвленных линейных цепей постоянного тока.

Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Экспериментально проверить справедливость расчета законов Кирхгофа.
3. Экспериментально проверить расчетную потенциальную диаграмму.
4. Экспериментально определить параметры эквивалентного генератора относительно заданной ветви.
5. Экспериментально проверить справедливость метода наложения.

Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуется разветвленная линейная электрическая цепь постоянного тока с источниками ЭДС (рис. 1.1). Величина каждого источника ЭДС определяется номером варианта (табл. 1.1).

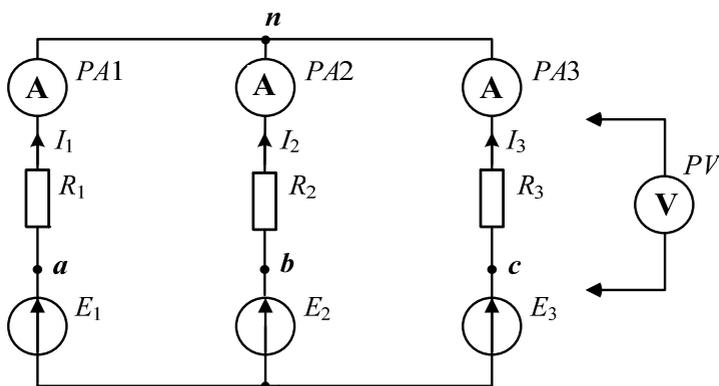


Рис. 1.1. Электрическая схема исследуемой цепи

Приемники электрической энергии R_1 , R_2 , R_3 представляют собой мини-блоки с резисторами определенных сопротивлений,

заданных вариантом. Последовательно в каждую ветвь включаются специальные коммутационные мини-блоки – амперметры. С помощью двухжильного измерительного проводника со штекером к этим мини-блокам подключается мультиметр в режиме измерения тока. Схема исследуемой цепи собирается с помощью соединительных проводников на наборной панели лабораторного стенда.

Для установки заданных значений E_1 , E_2 и E_3 используется генератор постоянных напряжений, предназначенный для получения стабилизированных напряжений +15 В, –15 В и регулируемого напряжения от 0 до 13 В. Для измерения напряжений на приемниках R_1 , R_2 , R_3 используется вольтметр из блока мультиметров.

Пояснения к выполнению индивидуальной расчетной части

Первый закон Кирхгофа. *Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:*

$$\pm \sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

Ток, подходящий к узлу, берется со знаком «+», отходящий от узла – со знаком «-».

Второй закон Кирхгофа. *Алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:*

$$\pm \sum_{k=1}^n E_k = \pm \sum_{k=1}^m U_k = \pm \sum_{k=1}^m I_k \cdot R_k.$$

Если направление ЭДС и напряжений на отдельных участках контура совпадает с выбранным направлением контура, то слагаемые в уравнении берутся со знаком «+», в противоположном случае – со знаком «-».

Для составления уравнений по законам Кирхгофа необходимо выбрать произвольно направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками, и выбрать положительные направления обхода контуров.

Количество уравнений определяется количеством неизвестных токов.

Число уравнений по первому закону Кирхгофа на единицу меньше числа узлов:

$$k_1 = y - 1,$$

где y – число узлов в электрической цепи.

По второму закону Кирхгофа составляется недостающее число уравнений, равное числу независимых контуров или ветвей без источников тока ($v - v_{\text{ист}}$) за вычетом числа уравнений, составленных по первому закону:

$$k_{\text{II}} = N = v - v_{\text{ист}} - (y - 1) = v - v_{\text{ист}} - k_1,$$

где N – количество независимых контуров; v – количество ветвей в расчётной электрической цепи; $v_{\text{ист}}$ – количество ветвей в источниках тока.

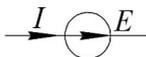
При составлении уравнений по второму закону независимые контуры выбираются так, чтобы в каждый из них входила новая ветвь, исключая ветви с источниками тока.

Для проверки правильности расчетов в электрической цепи составляют уравнение энергетического баланса: *алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии,*

$$\pm \sum_{k=1}^n E_k \cdot I_k \pm \sum_{k=1}^n U_{ab} \cdot J_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 \cdot R_k.$$

Определимся со знаками отдельных слагаемых в уравнении баланса мощностей.

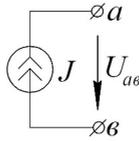
Мощность источника ЭДС положительна, если ток в ветви с источником совпадает по направлению с ЭДС; такой источник является *генератором*.



Мощность источника ЭДС отрицательна, если ток в ветви с источником направлен противоположно ЭДС. В этом случае источник потребляет энергию, то есть является потребителем.



При определении мощности источника тока напряжение U_{ab} берется как разность потенциалов между узлом, к которому подходит ток источника J , и узлом, от которого он отходит.



Потенциальной диаграммой называют графическую зависимость потенциалов узловых точек электрической цепи от сопротивлений в любом замкнутом контуре $\varphi = f(R)$. Откуда начинать строить потенциальную диаграмму, безразлично и также безразлично, в каком направлении делать обход контура. Потенциальная диаграмма строится в следующем порядке:

- выбирают начало отсчёта потенциалов узловых точек;
- по оси абсцисс откладывают сопротивления вдоль выбранного контура;
- по оси ординат откладывают потенциалы узловых точек, начиная с точки, потенциал которой принимают равным нулю.

Для заданной электрической цепи (рис. 1.2) построим потенциальную диаграмму для контура $a-b-c-d-a$.

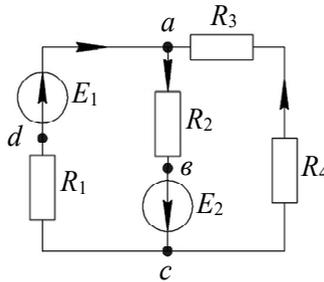


Рис. 1.2. Электрическая цепь

Подсчитаем суммарное сопротивление контура $a-b-c-d-a$ и выберем масштабы по оси абсцисс и ординат. Суммарное сопротивление контура определим как $R_1 + R_2$.

Узловую точку a помещаем в начало координат и принимаем потенциал $\varphi_a = 0$ В. Токораспределение в схеме при заземлении одной точки не изменится, так как никаких новых ветвей при этом не образуется. Определяем потенциалы узловых точек b , c , d и их координаты:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 0 \text{ В, точка } a (x = 0; y = 0); \\ \varphi_b &= \varphi_a - I_2 \cdot R_2, \text{ точка } b (x = R_2; y = \varphi_b); \\ \varphi_c &= \varphi_b + E_2, \text{ точка } c (x = R_2; y = \varphi_c); \\ \varphi_d &= \varphi_c - I_1 \cdot R_1, \text{ точка } d (x = R_2 + R_1; y = \varphi_d); \\ \varphi_a &= \varphi_d + E_1 = 0, \text{ точка } a (x = R_2 + R_1; y = 0). \end{aligned}$$

Строим потенциальную диаграмму на основании полученных координат узловых точек контура $a-b-c-d-a$ (рис. 1.3).

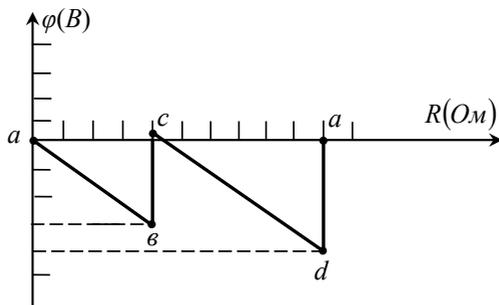


Рис. 1.3. Потенциальная диаграмма расчетной электрической цепи.
Цена деления: по оси R – 1 Ом, по оси φ – 20 В

Метод эквивалентного генератора используются для определения тока в заданной ветви. В этом случае пассивную часть заданной ветви рассматривают как нагрузку эквивалентного генератора, которым является вся оставшаяся расчетная цепь (рис. 1.4).

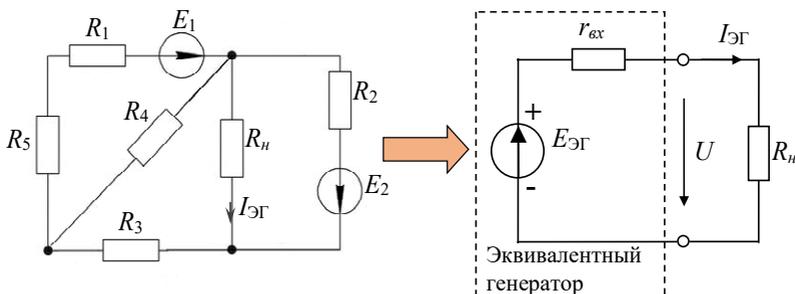


Рис. 1.4. Расчетные электрические цепи по методу эквивалентного генератора

Сначала определяют параметры схемы замещения эквивалентного генератора $E_{ЭГ} = U_{ХХ}$ и $r_{вх} = R_{вн}$, а затем находят неизвестный ток по выражению

$$I_H = \frac{E_{ЭГ}}{r_{вх} + R_H}.$$

Сущность метода наложения состоит в поэтапном вычислении частичных токов, каждый из которых образован подключением только одного источника энергии. При этом остальные источники энергии исключаются из электрической цепи: источники ЭДС заменяются перемычками, а источники тока — участками с разрывами. Токи в ветвях находятся путем алгебраической суммы частичных токов, каждый из которых берется со своим знаком в зависимости от того, совпадает его направление с направлением искомого тока или нет.

Применим метод наложения к электрической цепи, изображенной на рис. 1.5, а.

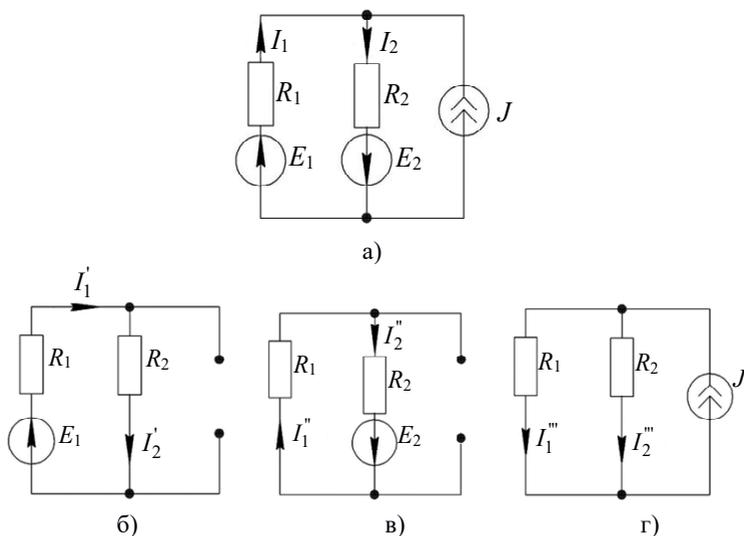


Рис. 1.5. Расчетная электрическая цепь по методу наложения

Сначала рассмотрим цепь при действии только ЭДС источника E_1 (рис. 1.5, б) и рассчитаем частичные токи в ветвях электрической цепи, обусловленные этим источником. Для этого применим закон Ома, тогда величины токов ветвей

$$I'_1 = I'_2 = \frac{E_1}{R_1 + R_2}.$$

Во второй расчетной электрической цепи (рис. 1.5, в) также действует только один источник ЭДС — E_2 . Определим частичные токи в ветвях электрической цепи по закону Ома:

$$I''_1 = I''_2 = \frac{E_2}{R_1 + R_2}.$$

В третьей расчетной электрической цепи (рис. 1.5, г) остается один источник тока J . Значения частичных токов ветвей также находим по закону Ома:

$$I'''_1 = I'''_2 = \frac{U_J}{R_1} = \frac{U_J}{R_2} = \frac{J \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}{R_1} = \frac{J \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Результирующие токи в ветвях расчетной электрической цепи (рис. 1.5, а) найдем как алгебраическую сумму соответствующих частичных токов в трех расчётных цепях:

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_1 + I''_1 - I'''_1, \\ I_2 &= I'_2 + I''_2 + I'''_2. \end{aligned}$$

Порядок выполнения индивидуальной расчетной части

Исходные данные определяются в соответствии с номером варианта в табл. 1.1. Значения источника ЭДС соответствуют номеру группы в потоке.

Таблица 1.1

Исходные данные индивидуальной расчетной части

№ варианта	E_1^* , В	E_2^* , В	E_3^* , В	E_1^* , В	E_2^* , В	E_3^* , В	R_1 , Ом	R_1 , Ом	R_1 , Ом
1	-15	-12	0	+15	0	+12	220	100	330
2	+15	0	+12	+15	+12	0	330	100	220
3	+15	+12	0	+15	0	+12	330	220	100
4	0	+15	+12	0	-15	-12	100	220	330
5	-15	+12	0	+15	-12	0	220	470	330
6	+15	0	-12	-15	0	+12	220	330	470
7	0	-15	+12	0	+15	-12	330	220	470
8	+12	0	-15	-12	0	+15	470	330	220

1. Составьте систему уравнений для расчета токов ветвей по законам Кирхгофа. Рассчитайте токи ветвей I_1 , I_2 , I_3 и занесите в табл. 1.2.

2. Запишите выражения и рассчитайте потенциалы точек контура a , b , c , n , приняв:

- $\varphi_a = 0$ для первого студента бригады;
- $\varphi_b = 0$ для второго студента бригады;
- $\varphi_c = 0$ для третьего студента бригады.

По полученным значениям потенциалов постройте потенциальную диаграмму расчетной электрической цепи для контура, содержащего две ЭДС. Занесите значения потенциалов точек в табл. 1.2.

3. Рассчитайте параметры эквивалентного генератора E_0 , R_0 и $I_{к.з}$ относительно:

- первой ветви – выполняется первым студентом бригады;
- второй ветви – выполняется вторым студентом бригады;
- третьей ветви – выполняется третьим студентом бригады.

Значения эквивалентного генератора занесите в табл. 1.2.

4. По методу наложения изобразите две расчетные электрической цепи при действии только одной ЭДС. В каждой электрической цепи рассчитайте частичные токи I_1' , I_2' , I_3' и I_1'' , I_2'' , I_3'' запишите результаты в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Расчетные и экспериментальные данные

Задание	Пункт 1			Пункт 2			
	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	φ_a , В	φ_b , В	φ_c , В	φ_n , В
Расчет							
Эксперимент							

Продолжение таблицы 1.2

Расчетные и экспериментальные данные

Задание	Пункт 3			Пункт 4					
	E_0 , В	R_0 , Ом	$I_{к.з.}$, мА	I'_1 , мА	I'_2 , мА	I'_3 , мА	I''_1 , мА	I''_2 , мА	I''_3 , мА
Расчет									
Эксперимент									

Порядок выполнения экспериментальной части

Экспериментальная часть работы выполняется полностью каждым студентом бригады.

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.

2. Выберите номиналы мини-блоков с резисторами R_1 , R_2 , R_3 и соберите исследуемую цепь на макетной панели с помощью проводников. В каждую ветвь последовательно включите мини-блок «амперметр» (рис. 1.1).

3. Включите питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Установите регуляторами напряжения необходимые величины ЭДС источников E_1 , E_2 и E_3 согласно варианту.

4. Переключите мультиметр в режим измерения постоянного тока с диапазоном 200 мА. Измерьте токи в ветвях I_1 , I_2 и I_3 . Полученные значения занесите в табл. 1.2.

Сравните экспериментальные данные с расчетными значениями и убедитесь в правильности законов Кирхгофа.

5. Переключите мультиметр в режим измерения постоянного напряжения с диапазоном 20 В. Измерьте потенциалы всех

точек относительно заданной в расчетной индивидуальной части точки с нулевым потенциалом. Полученные значения занесите в табл. 1.2 и сравните с расчетными данными.

6. Измерьте величины напряжения холостого хода $U_{x,x} = E_0$ и ток короткого замыкания $I_{к.з}$ относительно первой, второй и третьей ветвей электрической цепи. Положение переключателя мультиметра должно соответствовать измеряемым величинам и их диапазонам.

Рассчитайте внутреннее сопротивление R_0 эквивалентного генератора по полученным данным $U_{x,x}$ и $I_{к.з}$.

7. Измерьте частичные токи ветвей I_1' , I_1'' и I_1''' при действии одного источника ЭДС и запишите результаты в табл. 1.2. Измерьте частичные токи ветвей I_1'' , I_1''' и I_1'''' при действии другого источника ЭДС и запишите их в табл. 1.2.

8. Объединив результаты, рассчитайте по методу наложения токи I_1 , I_2 и I_3 . Сравните с токами, рассчитанными до выполнения экспериментальной части (табл. 1.2, п. 1). Убедитесь в правильности принципа наложения линейных электрических цепей.

9. Изобразите последовательную схему замещения активного двухполюсника, нагрузкой которого является резистор заданной ветви. Определите ток ветви, зная параметры эквивалентного генератора, найденные экспериментальным путем (п. 6). Сравните значение тока ветви в п. 4.

10. Сделайте выводы по результатам экспериментов.

Контрольные вопросы

1. Каковы правила составления уравнений по законам Кирхгофа?
2. Что относится к параметрам эквивалентного генератора?
3. Как найти параметры эквивалентного генератора расчетным и опытным путем?
4. Что называют потенциальной диаграммой электрической цепи и каково её назначение?
5. Как определяют потенциалы точек электрической цепи расчетным и опытным путем?
6. В чем состоит сущность метода наложения?

Лабораторная работа 2

Исследование линейных цепей синусоидального тока

Цель работы — изучение расчетных и экспериментальных методов определения параметров элементов цепи и исследование резонансных режимов.

Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Исследовать цепь при последовательном соединении катушки индуктивности и резистора.
3. Исследовать цепь при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора.
4. Исследовать цепь при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.
5. Снять частотные характеристики напряжений.

Описание лабораторной установки

В работе исследуются неразветвленная и разветвленная цепи синусоидального тока. Блок генератора напряжений формирует синусоидальное, прямоугольное или импульсное напряжение. Синусоидальное напряжение на выходе генератора задается переключателем «ФОРМА». Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в диапазоне 0...9 В. Диапазон регулирования частоты генератора специальной формы — от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. Резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности являются реальными радиоэлементами и установлены в наборе соответствующих мини-блоков. Для измерения величин I , U и P исследуемой цепи используют блоки мультиметров и ваттметра. **При измерении мощности следите за сигнализацией ошибок в выборе пределов измерения I , I , U , U .**

Пояснения к выполнению индивидуальной расчетной части

В электрической цепи синусоидального тока приемниками электрической энергии выступают сопротивление, индуктивность и ёмкость. Индуктивность имеет индуктивное сопротивление $x_L = \omega L = 2\pi fL$ (Ом), а у емкости – емкостное сопротивление $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ (Ом). Эти два сопротивления зависят от частоты протекающего синусоидального тока.

Расчет полного сопротивления в электрической цепи синусоидального тока осуществляется по тем же правилам, что и в цепях постоянного тока. Сопротивления могут быть подключены последовательно, параллельно или смешанно. Единственное отличие от цепей постоянного тока в том, что необходимо находить комплексное сопротивление цепи, которое имеет вещественную и мнимую части. Следует помнить, что мнимая часть может иметь различные знаки: знак «+» ставится перед записью индуктивного сопротивления и знак «-» – перед емкостным. В частности,

- комплексное сопротивление индуктивности $\underline{Z}_L = jx_L = x_L e^{j90^\circ}$,
- комплексное сопротивление емкости $\underline{Z}_C = -jx_C = x_C e^{-j90^\circ}$.

Для расчета цепей синусоидального тока используют символический метод, когда синусоидальные функции заменяют комплексными числами и изображающими их векторами.

На рис. 2.5 показана цепь переменного тока, состоящая из резистора R и реальной катушки индуктивности (R_k, L_k), соединенных последовательно. Начальную фазу ψ_n входного напряжения будем считать равной нулю. Тогда комплексное значение входного напряжения запишется как $\underline{U} = Ue^{j0}$.

Так, по закону Ома комплексный ток в цепи (рис. 2.5)

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{Ue^{j0}}{ze^{j\varphi}} = Ie^{-j\varphi}.$$

Комплексное сопротивление всей цепи

$$\underline{Z} = R + R_k + jx_L = ze^{j\varphi}, \quad z = \sqrt{(R + R_k)^2 + x_L^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{x_L}{R + R_k}.$$

Напряжение опережает ток на угол φ . Напряжения на резисторе и катушке в комплексной форме:

$$\underline{U}_R = R\underline{I} = RIe^{-j\varphi} = U_R e^{-j\varphi},$$

$$\underline{U}_k = Z_k \underline{I} = z_k e^{j\varphi_k} I e^{-j\varphi} = U_k e^{j(\varphi_k - \varphi)},$$

где $\underline{Z}_k = R_k + jx_L = z_k e^{j\varphi_k}$ — комплексное сопротивление катушки, при этом

$$z_k = \sqrt{R_k^2 + x_L^2}, \quad \varphi_k = \arctg \frac{x_L}{R_k}.$$

Активная мощность цепи определяется выражением:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 \sum R,$$

где $\sum R = R + R_k$ — активное сопротивление всей цепи; φ — угол сдвига фаз между током и напряжением цепи.

Построим векторную диаграмму напряжений и тока для схемы RL -цепи (рис. 2.5). Векторные диаграммы напряжений и тока строят на комплексной плоскости в соответствии с уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа и с учетом фазовых сдвигов напряжений и тока во времени $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_k$.

Построение векторной диаграммы начинаем с изображения в выбранном масштабе вектора (комплекса) тока \underline{I} . Располагаем его под углом $(-\varphi)$ от оси вещественных чисел $(+1)$.

Вектор комплексного напряжения на резистивном элементе \underline{U}_R (изображается в своем масштабе) располагается в том же направлении, что и ток, так как ток и напряжение резистивного элемента совпадают по фазе. Вектор комплексного напряжения на катушке \underline{U}_k рисуем под углом φ_k по отношению к вектору тока. Длина этого вектора равна произведению $z_k I$.

Построение ведется в соответствии с уравнением $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_k$. К концу вектора \underline{U}_R прибавляем вектор \underline{U}_k и, соединив его конец с началом координат, получим вектор напряжения на входе цепи \underline{U}_R (рис. 2.1). Вектор напряжения \underline{U} располагается вдоль оси вещественных чисел, так как в исходных данных начальная фаза входного напряжения была принята равной нулю.

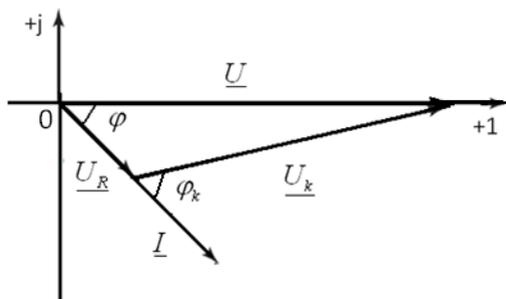


Рис. 2.1. Векторная диаграмма напряжений и токов

Находим комплексное сопротивление для схемы последовательно соединённых емкости C и реальной катушки индуктивности (R_k, L_k) (рис. 2.6):

$$\underline{Z} = R_k + j \cdot (x_L - x_C) = R_k \pm j \cdot x = z \cdot e^{j\varphi}.$$

Считаем конденсатор «идеальным», т. е. пренебрегаем его активным сопротивлением, поэтому напряжение на конденсаторе отстает от тока на угол, равный 90° .

Комплексное напряжение на емкости найдем по формуле

$$\underline{U}_C = -jX_C \cdot \underline{I}.$$

При параллельном соединении приемников комплексный ток в ветвях можно найти по закону Ома (рис. 2.7):

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}}{-jx_C}, \quad \underline{I}_k = \frac{\underline{U}}{R_k + jx_L},$$

где \underline{U} – входное напряжение на зажимах цепи.

Величину тока \underline{I} всей цепи найдем по первому закону Кирхгофа, как алгебраическую сумму комплексных значений токов всех ветвей:

$$\underline{I} = \underline{I}_C + \underline{I}_k.$$

Вектор этого тока равен геометрической сумме токов в отдельных ветвях.

Построим векторную диаграмму токов и напряжения параллельной цепи в соответствии с уравнением первого закона Кирхгофа и с учетом фазовых сдвигов токов \underline{I}_C , \underline{I}_k и напряжения \underline{U} во времени (рис. 2.7).

Вектор напряжения \underline{U} располагаем вдоль оси вещественных чисел (в соответствии с принятым значением начальной фазы

$\psi_n = 0$). Вектор тока \underline{I}_C в ветви с емкостным элементом опережает напряжение на 90° и располагается вдоль оси мнимых чисел. Вектор тока \underline{I}_k в ветви с катушкой отстает от вектора напряжения на угол φ_k . Сложение векторов тока \underline{I}_C и \underline{I}_k по правилу параллелограмма в соответствии с первым законом Кирхгофа даст нам вектор тока \underline{I} (рис. 2.2).

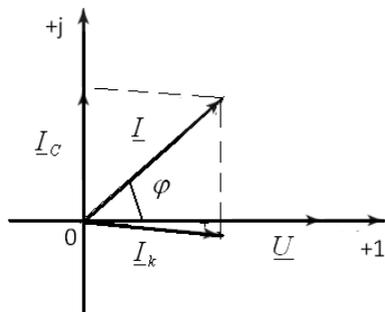


Рис. 2.2. Векторная диаграмма напряжений и токов

Резонанс напряжений может возникнуть при последовательном соединении емкостного и индуктивного сопротивлений. Условием резонанса напряжений является обращение в нуль общего реактивного сопротивления рассматриваемой цепи.

$$\begin{cases} I_m(\underline{Z}) = 0, \\ \underline{Z} = R + j(x_L - x_C), \end{cases} \Rightarrow I_m(\underline{Z}) = (x_L - x_C) = 0, \Rightarrow x_L = x_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Частота f_0 , при которой в последовательном колебательном контуре наступает резонанс, называется *резонансной*:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}},$$

где ω_0 — резонансная угловая частота, найденная из условия резонанса ($x_C = x_L$).

Резонанс напряжений наступает, когда сопротивление цепи будет чисто активным. Напряжение на емкости и на индуктивности одинаковы: $\underline{U}_C = \underline{U}_L$. При этом условии мгновенные значения тока и напряжения совпадают по фазе и угол сдвига фаз между ними равен нулю:

$$\left\| \begin{aligned} \underline{I} &= \frac{\underline{U}}{R + j(x_L - x_C)} = \frac{\underline{U}}{R}, \\ I &= I_{\max}, \\ \varphi &= 0, \cos \varphi = 1, \\ Q &= 0, S = P. \end{aligned} \right.$$

В цепи, изображенной на рис. 2.6, заданная катушка индуктивности содержит соединённые последовательно элементы R_k и L_k . Поэтому при резонансе напряжений $\underline{U}_C \neq \underline{U}_k$, что отражено на векторной диаграмме (рис. 2.3).

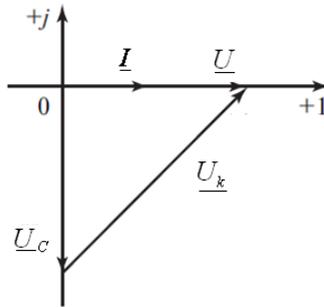


Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов и напряжений при резонансе

Резонанс токов возможен в цепи, содержащей параллельно соединенные индуктивности и емкости (рис. 2.7).

Условием резонанса токов является обращение в нуль общей реактивной проводимости рассматриваемой цепи:

$$\left\| \begin{aligned} I_m(\underline{Y}) &= 0, \\ \underline{Y} &= g + j(b_L - b_C), \end{aligned} \Rightarrow I_m(\underline{Y}) = (b_L - b_C) = 0, \Rightarrow b_L = b_C. \right.$$

Запишем реактивную проводимость катушки и проводимость для «идеального» конденсатора ($R_C = 0$).

$$\left\| \begin{aligned} b_k &= \frac{x_L}{R_k^2 + x_L^2} = \frac{\omega L_k}{R_k^2 + (\omega L_k)^2}, \\ b_C &= \omega C. \end{aligned} \right.$$

Таким образом, условие резонанса может быть записано в виде

$$\frac{\omega L_k}{R_k^2 + (\omega L_k)^2} = \omega C.$$

Из этого выражения можно получить частоту автоколебаний при резонансе токов в цепи с параллельным подключением (рис. 2.7):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R_k^2 C}{L}}.$$

Резонанс токов наступает тогда, когда проводимость цепи будет чисто активной. При этом условия мгновенные значения тока и напряжения совпадают по фазе и угол сдвига фаз между ними равен нулю:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{I} = \underline{U} \cdot [g + j(b_L - b_C)] = \underline{U} \cdot g, \\ I = I_{\min}, \\ \varphi = 0, \cos \varphi = 1, \\ Q = 0, S = P. \end{array} \right.$$

Векторная диаграмма электрической цепи с параллельным подключением (рис. 2.7) при резонансе токов будет выглядеть иначе (рис. 2.4).

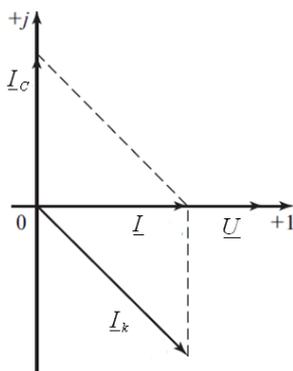


Рис. 2.4. Векторная диаграмма токов и напряжений при резонансе

Величину, показывающую, во сколько раз реактивное сопротивление в цепи больше активного сопротивления, называют добротностью колебательного контура:

$$q = \frac{x_L}{R} = \frac{x_C}{R} = \frac{U_L}{U_R} = \frac{U_C}{U_{ex}}.$$

Видно, что при добротности контура больше единицы, напряжение на индуктивности или емкости может во много раз превысить входное напряжение, приложенное к электрической цепи.

Порядок выполнения индивидуальной расчетной части

Исходные данные определяются номером варианта (табл. 2.1). Параметры катушки индуктивности соответствуют номеру группы в потоке.

Таблица 2.1

Исходные данные индивидуальной расчетной части

№ варианта	R , Ом	C_0 , мкФ	f , Гц	Параметры катушек индуктивности			
				R_k^* , Ом	L_k^* , мГн	R_k^{**} , Ом	L_k^{**} , мГн
1	110	1,69	800	128	66	188	100
2	122	1,47	700	128	66	188	100
3	133	1,22	600	128	66	188	100
4	147	1	500	128	66	188	100
5	110	0,69	400	128	66	188	100
6	122	0,47	300	128	66	188	100
7	133	0,32	200	128	66	188	100
8	147	0,22	100	128	66	188	100

1. Используя данные $U = 8$ В, f , R , R_k и L_k , рассчитайте в электрической цепи (рис. 2.5) величины I , U_R , U_k , P , φ . Результаты расчета занесите в табл. 2.2 и постройте соответствующую векторную диаграмму напряжений. Данный пункт выполняется каждым студентом бригады.

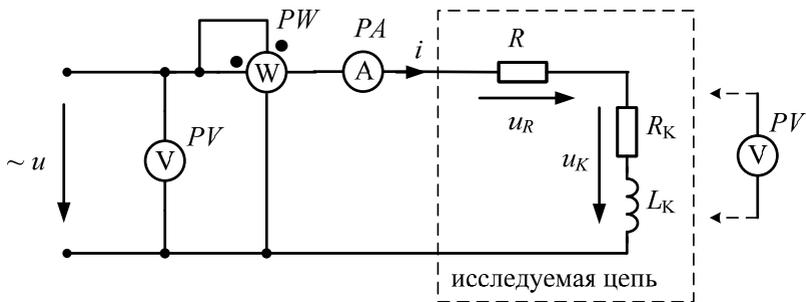


Рис. 2.5. Электрическая схема исследуемой RL -цепи

Таблица 2.2

Расчетные и экспериментальные данные последовательной RL -цепи

Электрическая величина	I , мА	U_R , В	U_{L_k} , В	P , мВт	φ , градус
Расчет					
Эксперимент					

2. Рассчитайте величину резонансной частоты f_0 , зная параметры последовательной RLC -цепи (рис. 2.6). Данный пункт выполняет каждый студент бригады. Используя данные $U = 8$ В, R_k , L_k и C_0 рассчитайте электрические величины I , U_c , U_k , P и φ :

- при $f = f_0$ – выполняется первым студентом бригады;
- при $f = f_1$ – выполняется вторым студентом бригады;
- при $f = f_2$ – выполняется третьим студентом бригады.

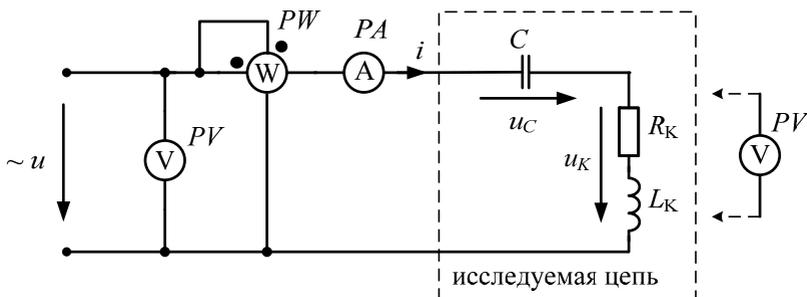


Рис. 2.6. Электрическая схема исследуемой RLC -цепи с последовательным подключением

Результаты расчета занесите в табл. 2.3 и постройте соответствующие векторные диаграммы напряжений.

Таблица 2.3

Расчетные и экспериментальные данные последовательной RLC -цепи

Электрическая величина		I , мА	U_C , В	$U_{R'}$, В	P , мВт	Φ , градус
f_0	Расчет					
	Эксперимент					
$f_1 = 2f_0$	Расчет					
	Эксперимент					
$f_2 = \frac{f_0}{2}$	Расчет					
	Эксперимент					

3. Рассчитайте величину резонансной частоты f_0 , зная параметры параллельной RLC -цепи (рис. 2.7). Данный пункт выполняет каждый студент. Используя данные $U = 8$ В, R_k , L_k и C_0 , рассчитайте величины I_C , I_k , I , P и Φ :

- при $f = f_0$ – выполняется первым студентом бригады;
- при $f = f_1$ – выполняется вторым студентом бригады;
- при $f = f_2$ – выполняется третьим студентом бригады.

Результаты расчета занесите в табл. 2.4 и постройте соответствующие векторные диаграммы токов.

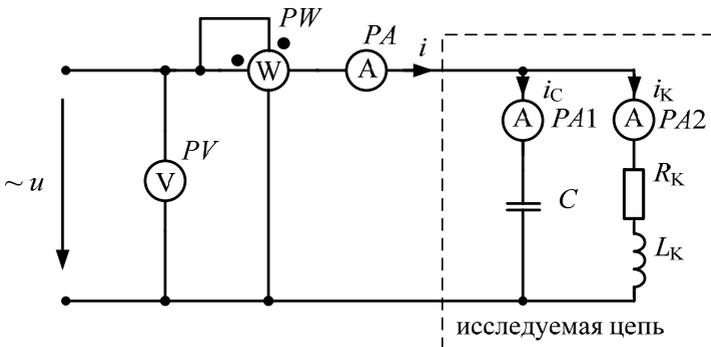


Рис. 2.7. Электрическая схема исследуемой RLC -цепи с параллельным подключением

Таблица 2.4

Расчетные и экспериментальные данные параллельной RLC -цепи

Электрическая величина		I_C , мА	I_k , мА	I , мА	P , мВт	Φ , градус
f_0	Расчет					
	Эксперимент					
$f_1 = 2f_0$	Расчет					
	Эксперимент					
$f_2 = \frac{f_0}{2}$	Расчет					
	Эксперимент					

Порядок выполнения экспериментальной части

Экспериментальная часть работы выполняется полностью каждым студентом бригады.

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.

2. Выберите номиналы мини-блоков с резистором и катушкой индуктивности согласно номеру варианта. Соберите исследуемую электрическую цепь, состоящую из последовательного соединения катушки индуктивности, резистора и мини-блока «амперметр», на макетной панели с помощью проводников (рис. 2.5). Переведите переключатель мультиметра в режим измерения переменного тока (диапазон 200 мА).

3. Подключите исследуемую цепь через промежуточный блок «ваттметр» к блоку генераторов напряжений (рис. 2.5). Последним присоедините вольтметр параллельно входным зажимам исследуемой цепи.

4. Включите питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Установите переключателем сигналов генератора форму напряжения в положение «~», значение частоты f установите по варианту, регулятор напряжения – по показанию вольтметра $U = 8$ В.

5. Измерьте электрические величины I , P , U_R , U_k и рассчитайте по ним R , R_k , L_k , Φ . При измерении мощности следите за сигнализацией ошибок в выборе пределов измерения $I >$, $I <$, $U >$, $U <$. Занесите полученные результаты в табл. 2.2, сравните с исходными и расчетными данными.

6. Включите в качестве исследуемой цепи последовательное соединение катушки индуктивности, конденсатора и мини-блока «амперметр» (рис. 2.6). Установите напряжение $U = 8$ В. Измерьте величины P , I , U_C , U_k при $f = f_0$, $f = f_1$, $f = f_2$. Используя результаты измерений, рассчитайте соответствующие фазовые сдвиги φ между U и I . Занесите полученные результаты в табл. 2.3 и сравните с расчетными.

7. Соберите в качестве исследуемой цепи схему из параллельного соединения катушки и конденсатора (рис. 2.7). Для измерения токов включите последовательно в каждую ветвь мини-блока «амперметр». Установите напряжение $U = 8$ В. Измерьте величины P , I , U_C , U_k при $f = f_0$, $f = f_1$, $f = f_2$. Используя результаты измерений, рассчитайте соответствующие фазовые сдвиги φ между U и I . Занесите полученные результаты в табл. 2.4 и сравните с расчетными.

8. По результатам экспериментов методом засечек постройте все векторные диаграммы (рис. 2.8–2.10).

9. Подключите цепь (рис. 2.6) к генератору синусоидального напряжения, включите параллельно катушке индуктивности и конденсатору мультиметры в режиме измерения переменного напряжения в диапазоне 20 В. Изменяя частоту от 0,2 до 2 кГц, снимите частотные характеристики $U_k(f)$ и $U_C(f)$. Величина U поддерживается постоянной. Значение C задается преподавателем. Постройте полученные зависимости $U_k(f)$ и $U_C(f)$, определите резонансную добротность цепи.

10. Сделайте выводы по результатам экспериментов.

Построение векторной диаграммы методом засечек

Рассмотрим пример построения векторной диаграммы напряжений методом засечек для последовательной RL -цепи. Её строят с помощью циркуля и линейки в соответствии с уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа: $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_k$.

Расположим произвольно вектор тока \underline{I} (в масштабе тока) и отложим в этом же направлении (в масштабе напряжения) вектор \underline{U}_R на активном сопротивлении R (рис. 2.8). Из конца вектора напряжения \underline{U}_R в сторону опережения тока \underline{I} сделаем засечку радиусом, равным в масштабе напряжению \underline{U}_k . Из начала вектора напряя-

жения \underline{U}_R сделаем засечку радиусом, равным в масштабе напряжению \underline{U} . Точка пересечения двух засечек определяет положение двух векторов напряжений \underline{U} и \underline{U}_K , а образованный угол между вектором приложенного напряжения \underline{U} и вектором тока \underline{I} является углом фазового сдвига φ .

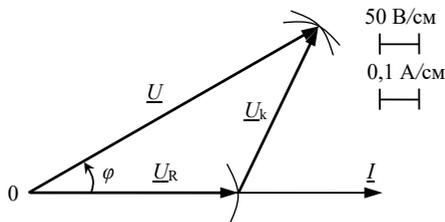


Рис. 2.8. Векторная диаграмма напряжений последовательной RL -цепи

Построим векторную диаграмму напряжений методом засечек для последовательной RLC -цепи. Построение ведем в соответствии с уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа: $\underline{U} = \underline{U}_C + \underline{U}_K$.

Расположим произвольно вектор тока \underline{I} (в масштабе тока). Под отрицательным углом $\frac{\pi}{2}$ к этому вектору \underline{I} отложим (в масштабе напряжения) вектор \underline{U}_C (рис. 2.9). Из конца вектора напряжения \underline{U}_C в сторону опережения тока \underline{I} сделаем засечку радиусом, равным в масштабе напряжению \underline{U}_K . Из начала вектора напряжения \underline{U}_C сделаем засечку радиусом, равным в масштабе напряжению \underline{U} . Точка пересечения двух засечек определяет положение двух векторов напряжений \underline{U} и \underline{U}_K , а образованный угол между вектором приложенного напряжения \underline{U} и вектором тока \underline{I} является углом фазового сдвига φ .

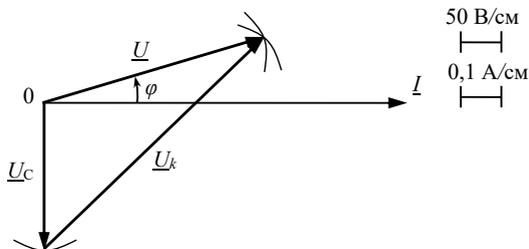


Рис. 2.9. Векторная диаграмма напряжений последовательной RLC -цепи

Векторную диаграмму токов для параллельной RLC -цепи строят с помощью циркуля и линейки в соответствии с уравнением, составленным по первому закону Кирхгофа: $\underline{I} = \underline{I}_C + \underline{I}_K$.

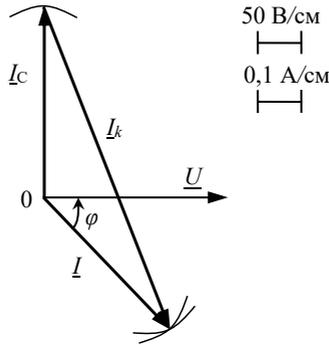


Рис. 2.10. Векторная диаграмма токов параллельной RLC -цепи

Расположим произвольно вектор напряжения \underline{U} (в масштабе напряжения). Под положительным углом $\frac{\pi}{2}$ к этому вектору \underline{U} отложим (в масштабе тока) вектор \underline{I}_C (рис. 2.10). Из конца вектора тока \underline{I}_C в сторону отставания напряжения \underline{U} сделаем засечку радиусом, равным в масштабе току \underline{I}_K . Из начала вектора тока \underline{I}_C сделаем засечку радиусом, равным в масштабе току \underline{I} . Точка пересечения двух засечек определяет положение двух векторов токов \underline{I} и \underline{I}_K , а образованный угол между вектором приложенного напряжения \underline{U} и вектором тока \underline{I} является углом фазового сдвига φ .

Контрольные вопросы

1. Какие элементы электрической цепи относятся к реактивным?
2. Как зависят от частоты индуктивное и емкостное сопротивление?
3. Как найти полное сопротивление электрической цепи?
4. В каких единицах измеряются активная, реактивная и полная мощности электрической цепи синусоидального тока?
5. Что называют режимом резонанса? При каких условиях может возникнуть резонанс в электрической цепи?
6. Какие виды резонанса существуют? Как вывести электрическую цепь в режим резонанса?

Лабораторная работа 3

Исследование электрических цепей синусоидального тока с индуктивно связанными катушками

Цель работы — изучение расчётных и экспериментальных методов анализа электрических цепей переменного тока с взаимной индуктивностью.

Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Исследовать последовательное соединение двух индуктивно связанных катушек при согласном и встречном включении.
3. Исследовать параллельное соединение двух индуктивно связанных катушек при согласном и встречном включении.
4. Исследовать трансформатор с линейными характеристиками (воздушный трансформатор).
5. Экспериментально найти значение взаимной индуктивности M .

Описание лабораторной установки

В работе исследуется цепь синусоидального тока, содержащая две катушки с взаимной индуктивностью. Катушки намотаны на общем каркасе.

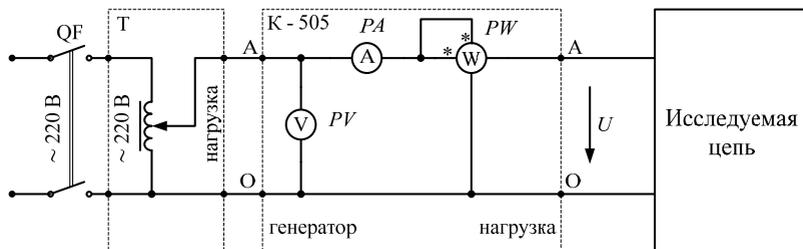


Рис. 3.1. Электрическая схема исследуемой цепи

Источником синусоидальной ЭДС служит сеть частотой 50 Гц. Напряжение сети снимается с зажимов автоматического выключателя QF и регулируется с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) T . Для измерения действующих значений тока I и напряжения U , активной мощности P используется комплект

измерительных приборов К-505, к выходным зажимам которого подключается исследуемая цепь (рис. 3.1).

Пояснения к выполнению индивидуальной расчетной части

Рассмотрим задачу с индуктивно связанными элементами, соединенными последовательно. Возможны два случая включения: согласное и встречное. Для изображенной электрической цепи (рис. 3.2) необходимо найти напряжения на первой U_1 и второй U_2 катушке индуктивности.

Рассмотрим *согласное включение* индуктивно связанных катушек.

Найдем комплексное сопротивление цепи при согласном включении

$$\underline{Z} = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M).$$

Знак «плюс» перед коэффициентом взаимной индукции обусловлен согласным включением индуктивных катушек. Угловая частота цепи

$$\omega = 2\pi f.$$

Входное напряжение цепи определим по закону Ома:

$$\underline{U} = \underline{Z}\underline{I}.$$

Определим значение напряжения на каждой индуктивно связанной катушке:

$$\underline{U}_1 = [R_1 + j\omega(L_1 + M)]\underline{I},$$

$$\underline{U}_2 = [R_2 + j\omega(L_2 + M)]\underline{I}.$$

Рассмотрим *встречное включение* индуктивно связанных катушек.

Найдем комплексное сопротивление цепи при встречном включении:

$$\underline{Z} = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M).$$

Знак «минус» перед коэффициентом взаимной индукции указывает на встречное включение индуктивных катушек.

Определим значения комплексных напряжений на каждой индуктивно связанной катушке:

$$\underline{U}_1 = [R_1 + j\omega(L_1 - M)]\underline{I},$$

$$\underline{U}_2 = [R_2 + j\omega(L_2 - M)]\underline{I}.$$

Векторная диаграмма строится в соответствии с уравнением, составленным для последовательной цепи (рис. 3.2) по второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = R_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} \pm j\omega M \underline{I} + R_2 \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} \pm j\omega M \underline{I}.$$

Знак «плюс» — для согласного включения катушек, знак «минус» — для встречного включения. Начальная фаза тока принимается равной нулю.

Рассмотрим цепи с параллельным соединением двух индуктивно связанных катушек (рис. 3.3).

При согласном включении индуктивно связанных катушек токи ветвей втекают в одноименные зажимы этих катушек. Составим систему уравнений по второму закону Кирхгофа в комплексном виде для цепи с параллельным соединением двух индуктивно связанных катушек, включенных согласно:

$$\begin{cases} (R_1 + j\omega L_1) \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 = \underline{U}, \\ (R_2 + j\omega L_2) \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 = \underline{U}, \\ \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2. \end{cases}$$

Запишем эту систему уравнений в матричной форме и разрешим её относительно неизвестных комплексных токов:

$$\begin{pmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \underline{Z}_1 & \underline{Z}_M \\ 0 & \underline{Z}_M & \underline{Z}_2 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \underline{U} \\ \underline{U} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Знак «плюс» перед комплексным сопротивлением \underline{Z}_M обусловлен согласным включением катушек. Комплексные сопротивления определяются по формулам

$$\begin{aligned} \underline{Z}_M &= j\omega M, \\ \underline{Z}_1 &= R_1 + j\omega L_1, \\ \underline{Z}_2 &= R_2 + j\omega L_2. \end{aligned}$$

При встречном включении индуктивно связанных катушек токи ветвей втекают в разноименные зажимы этих катушек. Составим систему уравнений по второму закону Кирхгофа в комплексном виде для цепи с параллельным соединением двух индуктивно связанных катушек, включенных встречно:

$$\begin{cases} (R_1 + j\omega L_1)\underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 = \underline{U}, \\ (R_2 + j\omega L_2)\underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 = \underline{U}, \\ \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2. \end{cases}$$

Представим эту систему уравнений в матричной форме и разрешим её относительно неизвестных комплексных токов:

$$\begin{pmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \underline{Z}_1 & -\underline{Z}_M \\ 0 & -\underline{Z}_M & \underline{Z}_2 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U} \\ \underline{U} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Знак «минус» перед комплексным сопротивлением \underline{Z}_M обусловлен встречным включением катушек.

Векторная диаграмма строится в соответствии с системами уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для согласного и встречного включения индуктивно связанных катушек соответственно.

Воздушный трансформатор — элемент схемы замещения, относящийся к линейным из-за отсутствия ферромагнитного сердечника.

Составим систему уравнений по второму закону Кирхгофа в комплексном виде для воздушного трансформатора согласно схеме замещения воздушного трансформатора (рис. 3.4):

$$\begin{cases} (R_1 + j\omega L_1)\underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 = \underline{U}, \\ [(R_2 + R_H) + j\omega L_2]\underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 = 0. \end{cases}$$

Представим систему уравнений в матричной форме и разрешим её относительно неизвестных комплексных токов:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_1 & \underline{Z}_M \\ \underline{Z}_M & (\underline{Z}_2 + R_H) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Векторная диаграмма для воздушного трансформатора строится в соответствии с системой уравнений, составленной по второму закону Кирхгофа в комплексном виде.

Величину сопротивления взаимной индуктивности x_M и взаимной индуктивности M можно найти, вычитая из индуктивного сопротивления при согласном включении сопротивление при встречном включении индуктивно связанных катушек:

$$x_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M); \quad x_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M).$$

Разность $x_{\text{согл}} - x_{\text{встр}} = 4\omega M$, следовательно,

$$M = \frac{x_{\text{согл}} - x_{\text{встр}}}{4\omega}.$$

Также величину сопротивления взаимной индуктивности x_M и взаимной индуктивности M можно найти, если измерить ток I_1 и напряжение U_2 , включив воздушный трансформатор в режиме холостого хода. Получим

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}.$$

Порядок выполнения индивидуальной расчетной части

Исходные данные, определяются номером варианта в соответствующей строке табл. 3.1. Значение электрических величин соответствует номеру группы в потоке.

Таблица 3.1

Исходные данные индивидуальной расчетной части

Номер варианта	Электрические величины						Параметры катушек						Номер катушки
	I , А	U , В	R_H^* , Ом	I^* , А	U^* , В	R_H^{**} , Ом	R_{K1} , Ом	L_{K1} , Гн	R_{K2} , Ом	L_{K2} , Гн	M , Гн		
1	0,4	40	30	0,45	45	40	24,8	0,168	50,3	0,634	0,22	11/2	
2	0,5	30	40	0,55	35	35	18,6	0,096	43,4	0,495	0,15	12/2	
3	0,6	30	50	0,65	30	45	20,8	0,357	6,2	0,049	0,07	13/1	
4	0,7	20	60	0,65	25	55	14,7	0,263	5	0,044	0,06	14/1	
5	0,55	55	45	0,6	50	50	50,5	0,56	25	0,148	0,2	16/2	
6	0,35	65	65	0,4	60	60	24	0,159	51,2	0,667	0,22	18/1	
7	0,5	35	55	0,55	30	40	20,8	0,357	6,2	0,049	0,07	13/1	
8	0,45	45	40	0,5	50	60	50,5	0,56	25	0,148	0,2	16/2	

1. Данный пункт выполняется первым студентом бригады.

Используя данные R_{K1} , L_{K1} , R_{K2} , L_{K2} , M , I , рассчитайте для цепи (рис. 3.2) электрические величины U_1 , U_2 , U , P , φ при согласном и встречном включении.

Постройте соответствующие векторные диаграммы. Результаты занесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Расчетные и экспериментальные данные последовательной электрической цепи

Электрическая величина		$U, В$	$U_{K1}, В$	$U_{K2}, В$	$P, Вт$	$\phi, \text{град}$
Согласное включение	Расчет					
	Эксперимент					
Встречное включение	Расчет					
	Эксперимент					

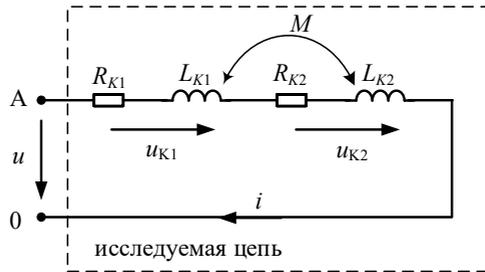


Рис. 3.2. Последовательная электрическая цепь с индуктивно связанными катушками

2. Данный пункт выполняется вторым студентом бригады.

Используя данные $R_{K1}, L_{K1}, R_{K2}, L_{K2}, M, U$, рассчитайте для цепи (рис. 3.3) электрические величины I_1, I_2, I, P, ϕ при согласном и встречном включении.

Постройте соответствующие векторные диаграммы. Результаты занесите в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Расчетные и экспериментальные данные параллельной электрической цепи

Электрическая величина		$I, А$	$I_1, А$	$I_2, А$	$P, Вт$	$\phi, \text{град}$
Согласное включение	Расчет					
	Эксперимент					
Встречное включение	Расчет					
	Эксперимент					

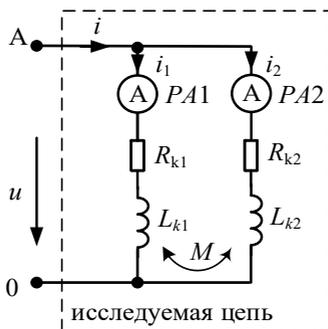


Рис. 3.3. Параллельная электрическая цепь с индуктивно связанными катушками

3. Данный пункт выполняется третьим студентом бригады.

Используя данные R_{K1} , L_{K1} , R_{K2} , L_{K2} , M , U , R_H , рассчитайте для цепи (рис. 3.4) электрические величины I_1 , I_2 , U_H , P , φ .

Постройте соответствующую векторную диаграмму. Результаты занесите в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Расчетные и экспериментальные данные воздушного трансформатора

Электрическая величина	I_1 , А	I_2 , А	U_H , В	P , Вт	φ , град
Эксперимент					
Расчет					

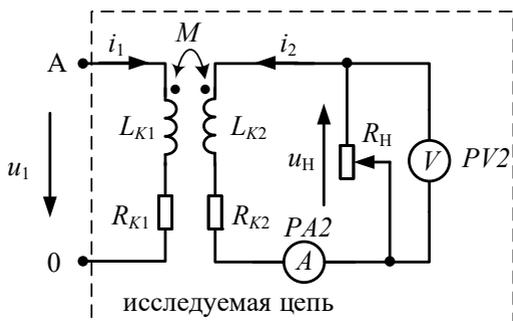


Рис. 3.4. Электрическая цепь с воздушным трансформатором

Порядок выполнения экспериментальной части

Экспериментальная часть работы выполняется полностью каждым студентом бригады.

1. Ознакомьтесь с оборудованием и измерительными приборами, необходимыми для проведения эксперимента.

2. Соберите схему (рис. 3.1), включите в качестве исследуемой цепи последовательное соединение двух индуктивно связанных катушек (рис. 3.2). Собранный схему покажите преподавателю или лаборанту. Движок лабораторного автотрансформатора T установите в нулевое положение. По амперметру PA комплекта К-505 с помощью автотрансформатора T установите заданную величину тока I .

При согласном и встречном включении катушек измерьте электрические величины U_{K1} , U_{K2} , U , P и занесите полученные результаты в табл. 3.2. Рассчитайте значение φ и сравните с расчетными.

3. Включите в качестве исследуемой цепи параллельное соединение двух индуктивно связанных катушек (рис. 3.3). Для измерения токов I_1 и I_2 включите последовательно с катушками амперметры. Собранный схему покажите преподавателю или лаборанту. Движок лабораторного автотрансформатора T установите в нулевое положение. По вольтметру PV комплекта К-505 с помощью автотрансформатора T установите заданное значение напряжения U .

При согласном и встречном включении катушек измерьте электрические величины I_1 , I_2 , I , P и занесите полученные результаты в табл. 3.3. Рассчитайте значение φ и сравните с расчетными.

4. Включите в качестве исследуемой цепи воздушный трансформатор (рис. 3.4), а в качестве нагрузки – проволочный реостат R_H . Собранный схему покажите преподавателю или лаборанту. Движок лабораторного автотрансформатора T установите в нулевое положение. По вольтметру PV комплекта К-505 с помощью автотрансформатора T установите заданное значение напряжения U и с помощью реостата I_2 – расчетный ток.

Измерьте электрические величины I_1 , U_2 , P и занесите полученные результаты в табл. 3.4. Рассчитайте значения φ , R_H и сравните с расчетными.

5. Включите в качестве исследуемой цепи воздушный трансформатор (рис. 3.5) в режиме холостого хода. Измерьте с помощью циф-

рового вольтметра ЭДС, наведенную во второй катушке, $E_2 = U_{\text{х.х.}}$, и ток первой катушки I_1 . По результатам измерений рассчитайте взаимную индуктивность катушек и сравните с заданной.

6. Сделайте выводы по результатам экспериментов.

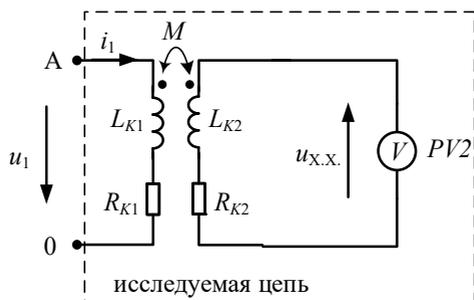


Рис. 3.5. Воздушный трансформатор в режиме холостого хода

Контрольные вопросы

1. Что называют явлением самоиндукции и взаимной индукции?
2. Что называют взаимной индуктивностью?
3. Как определяется сопротивление взаимной индукции?
4. Какое включение индуктивно связанных катушек называют согласным, а какое – встречным?
5. Чему равно реактивное сопротивление двух индуктивно связанных катушек при согласном и встречном включениях?
6. Какие методы расчета можно применять при наличии взаимной индуктивности?

Лабораторная работа 4

Исследование режимов работы трехфазных цепей

Цель работы — изучение экспериментальных и расчётных методов определения электрических величин, характеризующих различные режимы работ трехфазных цепей.

Программа работы

1. Выполнить индивидуальную расчетную часть.
2. Исследовать трехфазный приемник, соединенный по схеме «звезда».
3. Исследовать трехфазный приемник, соединенный по схеме «треугольник».

Описание лабораторной установки

В работе исследуется трехфазный приемник, содержащий активные и реактивные сопротивления. Источником питания является симметричный трехфазный источник ЭДС с фазным напряжением $U_{\phi} = 8 \text{ В}$, частотой $f = 50 \text{ Гц}$ и выведенной нейтральной точкой. В каждый линейный и нейтральный провод включены мини-блоки «амперметр». Общая схема исследуемой цепи приведена на рис. 4.1.

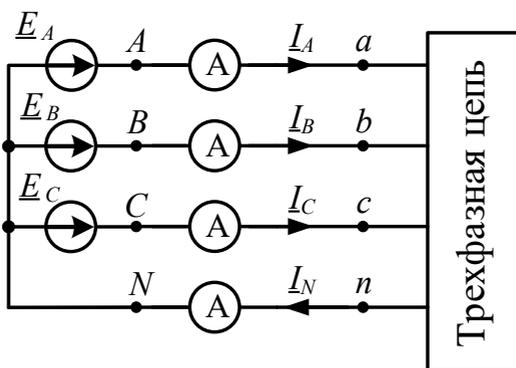


Рис. 4.1. Электрическая схема исследуемой цепи

Пояснения к выполнению индивидуальной расчетной части

Трехфазной цепью называется совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол 120° . Отдельные электрические цепи, входящие в состав трехфазной цепи, называются фазами этой цепи. В качестве трехфазных источников напряжения используют трехфазные синхронные генераторы.

Мгновенные значения ЭДС трехфазных обмоток симметричного генератора можно найти по системе

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t + 0^\circ) \text{ В,} \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ В,} \\ e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \text{ В.} \end{cases}$$

Данная система ЭДС в комплексной форме для действующих значений записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} = E_\Phi; \\ \underline{E}_B &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{-j120^\circ} = E_\Phi e^{-j120^\circ}; \\ \underline{E}_C &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j120^\circ} = E_\Phi e^{j120^\circ}. \end{aligned}$$

Можно построить векторную диаграмму ЭДС трехфазного симметричного источника (рис. 4.2).

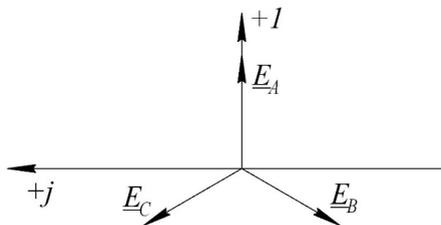


Рис. 4.2. Векторная диаграмма ЭДС симметричного источника

В трехфазной цепи обмотки генератора и фазы приемников соединяются «звездой» или «треугольником».

Система трехфазных напряжений источника всегда симметрична в отличие от трехфазного приемника, который, в общем случае является несимметричным.

У симметричных приемников комплексные сопротивления фаз равны между собой: $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$.

Трехфазная цепь при соединении приемников «звездой» выполняется с нейтральным проводом (четырёхпроводная цепь) и без него (трехпроводная цепь).

Провода, соединяющие выводы генератора с выводами приемника, называются линейными, токи, протекающие по ним — *линейными токами* (I_L). Положительные направления линейных токов — от генератора к нагрузке.

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и нагрузки, называется *нейтральным*, или *нулевым, проводом*. Ток I_N , протекающий по нему, — *ток нейтрали*. Его положительное направление — от нагрузки к генератору.

Напряжения между двумя линейными проводами называются линейными напряжениями (U_L). Линейные напряжения определяются как разность соответствующих фазных напряжений трехфазного источника:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_L e^{j30^\circ}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_L e^{-j90^\circ}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_L e^{j150^\circ}.\end{aligned}$$

Симметричный режим характеризуется следующими соотношениями:

$$I_L = I_\Phi; U_L = \sqrt{3}U_\Phi; I_N = 0.$$

Если режим работы приемника несимметричен, то есть комплексные сопротивления фаз нагрузки неодинаковы, то в нулевом проводе будет протекать ток, определяемый по формуле $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ и равный геометрической сумме фазных токов.

При отсутствии нейтрального провода всегда $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

Для четырехпроводной трехфазной цепи с симметричным источником и симметричным приемником (рис. 4.3) векторная диаграмма напряжений и токов представлена на рис. 4.4.

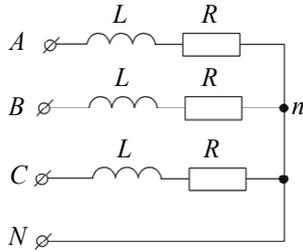


Рис. 4.3. Симметричный трехфазный приемник по схеме «звезда» в четырехпроводной цепи

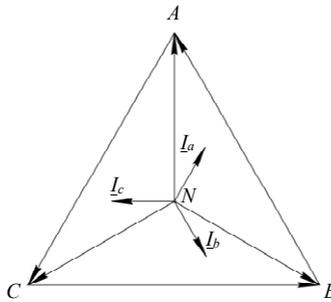


Рис. 4.4. Векторная диаграмма четырехпроводной трехфазной цепи с симметричной нагрузкой

Для четырехпроводной цепи с симметричным трехфазным источником и несимметричным приемником (рис. 4.5) векторная диаграмма напряжений и токов представлена на рис. 4.6.

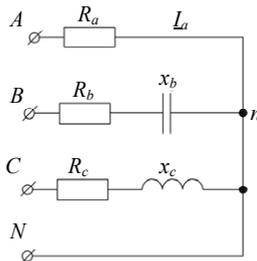


Рис. 4.5. Несимметричный трехфазный приемник по схеме «звезда»

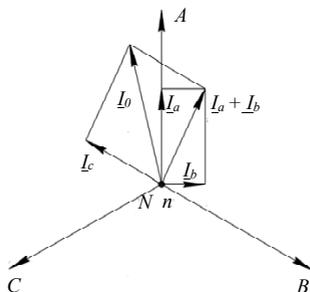


Рис. 4.6. Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке

Если трехфазный приемник соединен в схему «звезда» без нулевого провода, то при несимметричном режиме возникает напряжение смещения нейтралей приемника \underline{U}_{nN} , а геометрическая сумма фазных токов остается равной нулю. Напряжение смещения нейтралей может быть определено методом двух узлов по формуле

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ — комплексные проводимости фаз нагрузки.

Фазные напряжения на приемнике определяются по второму закону Кирхгофа для трех контуров:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}.$$

Фазные и линейные напряжения трехфазного источника всегда остаются неизменными при любых режимах работы приемника, и векторная диаграмма строится по известному фазному или линейному напряжению источника (рис. 4.7).

Для построения векторной диаграммы необходимо выбрать масштабы напряжений m_U и токов m_I . При построении векторных диаграмм фазные и линейные напряжения и токи строятся относительно комплексных осей либо по расчетным значениям \underline{U}_{nN} , \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c , либо методом засечек при известных фазных напряжениях источника и приемника. Ток в нейтральном проводе — это результат геометрического сложения векторов, и его расположение и длина должны соответствовать расчетному значению \underline{I}_N .

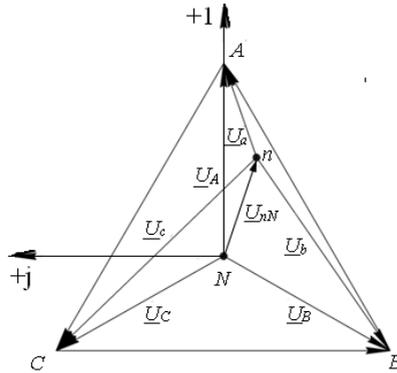


Рис. 4.7. Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке

Аварийным случаем несимметрии нагрузки является обрыв проводов или короткое замыкание одной из фаз трехфазной цепи.

При обрыве одной из фаз трехпроводной цепи (рис. 4.10), например фазы a , две другие фазы оказываются включенными последовательно на линейное напряжение U_{BC} . Ток в оборванном проводе будет равен нулю: $I_A = 0$.

В оставшихся подключённых к трехфазному источнику фазам приемника токи будут одинаковыми, а напряжение на них будет зависеть от сопротивлений нагрузок:

$$I_B = -I_C = \frac{U_{BC}}{Z_b + Z_c}.$$

При коротком замыкании, например, фазы c приемника напряжение фазы c приемника равно нулю, а напряжение на фазах a и b увеличивается до линейного.

Фазные токи I_a и I_b приемника найдем по закону Ома:

$$I_a = \frac{-U_{CA}}{Z_a}, \quad I_b = \frac{U_{BC}}{Z_b}.$$

Фазный ток I_c определим по первому закону Кирхгофа:

$$I_a + I_b + I_c = 0,$$

$$I_c = -(I_a + I_b).$$

Рассмотрим схему соединения фаз приемника в «треугольник» (рис. 4.11). Следует учитывать, что трехфазный источник ЭДС с фазным напряжением E_ϕ соединен в «звезду».

Фазные токи приемника найдем по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Линейные токи направлены от источника к приемнику и определяются через фазные токи в соответствии с первым законом Кирхгофа по следующим выражениям:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Если трехфазный приемник является симметричным, то линейный и фазные токи связаны соотношением $I_L = \sqrt{3}I_\Phi$.

Для построения векторной диаграммы токов удобнее фазные напряжения приемника изобразить в виде звезды, сохраняя при этом углы смещения фаз векторов напряжений (рис. 4.8). Векторы фазных токов приемника откладываются от точки начала координат с соответствующими сдвигами по фазе относительно фазных напряжений. Тогда линейные токи определяются, согласно первому закону Кирхгофа, векторами $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$.

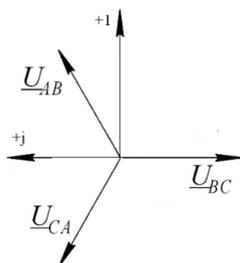


Рис. 4.8. Векторная диаграмма токов при соединении фаз «треугольником»

При обрыве линейного провода B , трехфазная цепь, соединенная в схему «треугольник», преобразуется в однофазную цепь с двумя параллельными ветвями, включенными на одно линейное напряжение \underline{U}_{CA} .

По фазам приемника с сопротивлениями \underline{Z}_{ab} и \underline{Z}_{bc} протекают токи, определяемые по формуле

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{bc} = \frac{-\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc}}.$$

Ток в фазе ca остаётся неизменным:

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Величины комплексных линейных токов \underline{I}_A и \underline{I}_C определяются так:

$$\underline{I}_C = -\underline{I}_A = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Они равны по модулю, но противоположны по направлению.

Активной мощностью трехфазной системы называется сумма активных мощностей всех фаз приемника:

$$P = P_A + P_B + P_C + P_0.$$

Для каждой из фаз справедливо выражение

$$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = I_\Phi^2 R_\Phi,$$

где φ — угол сдвига фаз между фазными напряжением и током.

В симметричной трехфазной системе при любой схеме соединений генератора и приемника для каждой фазы мощности источника энергии и приемника одинаковы. Активная мощность системы в этом случае $P = 3P_\Phi$.

Порядок выполнения индивидуальной расчетной части

Исходные данные определяются по табл. 4.1 и 4.2 в соответствии с номером варианта.

Таблица 4.1

Параметры элементов исследуемой цепи

№	R_a^* , Ом	R_b^* , Ом	R_c^* , Ом	R_a^{**} , Ом	R_b^{**} , Ом	R_c^{**} , Ом
1	100	220	330	470	220	330
2	220	100	330	330	470	100
3	470	330	100	100	330	220
4	330	470	220	330	100	220
5	330	220	470	220	330	470
6	100	470	330	470	100	330
7	220	100	470	220	470	100
8	470	220	100	100	470	220
$L_k = 0,979$ Гн; $R_k = 88$ Ом; $C_\Phi = 4,4$ мкФ						

Схемы замещения фаз исследуемой цепи

№	Z_a, Z_{ab}	Z_b, Z_{bc}	Z_c, Z_{ca}
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

В качестве катушки индуктивности используется катушка с ферромагнитным сердечником и числом витков $W = 300$.

1. Данный пункт выполняется первым студентом бригады.

Используя данные $Z_a = R_a, Z_b = R_b, Z_c = R_c$ и $U_\phi = 8$ В, рассчитайте для цепи с нейтральным проводом (рис. 4.9) величины I_A, I_B, I_C, I_N , а для цепи без нейтрального провода (рис. 4.10) – величины $I_A, I_B, I_C, U_{nN}, U_a, U_b, U_c$.

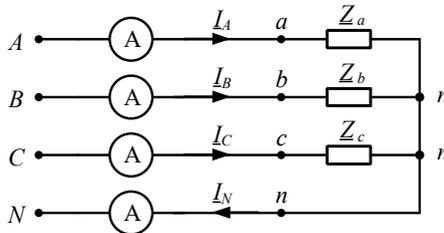


Рис. 4.9. Схема цепи при соединении приемников «звездой» с нейтральным проводом

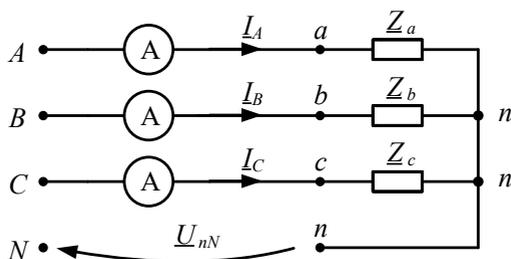


Рис. 4.10. Схема цепи при соединении приемников «звездой» без нейтрального провода

Рассчитайте для обоих случаев мощность источника $P_{\text{и}}$ и нагрузки $P_{\text{н}}$ и проверьте баланс мощностей. Результаты занесите в табл. 4.3 и постройте векторные диаграммы.

2. Данный пункт выполняется вторым студентом бригады.

Используя данные Z_a, Z_b, Z_c и $U_{\Phi} = 8 \text{ В}$, рассчитайте для цепи с нейтральным проводом (рис. 4.9) величины I_A, I_B, I_C, I_N , а для цепи без нейтрального провода (рис. 4.10) – величины $I_A, I_B, I_C, U_{nN}, U_a, U_b, U_c$.

Рассчитайте для обоих случаев мощность источника $P_{\text{и}}$ и нагрузки $P_{\text{н}}$ и проверьте баланс мощностей. Результаты занесите в табл. 4.3 и постройте векторные диаграммы.

3. Данный пункт выполняется третьим студентом бригады.

Используя данные Z_a, Z_b, Z_c и $U_{\Phi} = 8 \text{ В}$, рассчитайте для цепи без нейтрального провода (рис. 4.10) величины $I_A, I_B, I_C, U_{nN}, U_a, U_b, U_c$ при обрыве линии (режим холостого хода) A и при коротком замыкании фазы C приемника.

Рассчитайте для обоих случаев мощность источника $P_{\text{и}}$ и нагрузки $P_{\text{н}}$ и проверьте баланс мощностей. Результаты занесите в табл. 4.3 и постройте векторные диаграммы.

Таблица 4.3

Расчетные и экспериментальные данные при соединении фаз
приемников «звездой»

Характер нагрузки	Режим работы фаз	Величина	I_A	I_B	I_C	U_a	U_b	U_c	U_{nN}	I_N	P_n	P_n
			мА	мА	мА	В	В	В	В	мА	мВт	мВт
Активная	«Звезда» с нейтралью	Расчет										
		Эксперимент										
	«Звезда» без нейтрали	Расчет										
		Эксперимент										
Активно-реактивная	«Звезда» с нейтралью	Расчет										
		Эксперимент										
	«Звезда» без нейтрали	Расчет										
		Эксперимент										
	«Звезда» без нейтрали, х.х. фазы А	Расчет										
		Эксперимент										
	«Звезда» без нейтрали, к.з. фазы С	Расчет										
		Эксперимент										

4. Данный пункт выполняется вторым студентом бригады. Используя данные $Z_{ab} = R_a$, $Z_{bc} = R_b$, $Z_{ca} = R_c$ и $U_\Phi = 8$ В, рассчитайте для цепи (рис. 4.11) величины токов I_A , I_B , I_C , I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} .

Рассчитайте мощности источника P_n и нагрузки P_n и проверьте баланс мощностей. Результаты занесите в табл. 4.4 и постройте векторную диаграмму.

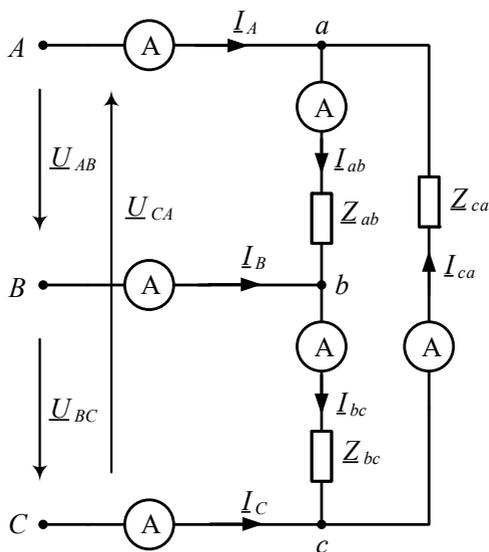


Рис. 4.11. Схема цепи при соединении «треугольником»

5. Данный пункт выполняется третьим студентом бригады.

Используя данные Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} и $U_{\phi} = 8$ В, рассчитайте для цепи при соединении «треугольником» (рис. 4.11) величины токов I_A , I_B , I_C , I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} .

Рассчитайте мощности источника $P_{\text{и}}$ и нагрузки $P_{\text{н}}$ и проверьте баланс мощностей. Результаты занесите в табл. 4.4 и постройте векторную диаграмму.

6. Данный пункт выполняется первым студентом бригады.

Используя данные Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} и $U_{\phi} = 8$ В, рассчитайте для цепи при соединении «треугольником» (рис. 4.11) величины токов I_A , I_B , I_C , I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} при обрыве линии B .

Рассчитайте мощности источника $P_{\text{и}}$ и нагрузки $P_{\text{н}}$ и проверьте баланс мощностей. Результаты занесите в табл. 4.4 и постройте векторную диаграмму.

Таблица 4.4

Расчетные и экспериментальные данные при соединении фаз приемников «треугольником»

Характер нагрузки	Режим работы фаз	Величина	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_{ab} , мА	I_{bc} , мА	I_{ca} , мА	$P_{и}$, мВт	$P_{н}$, мВт
Активная	«Треугольник»	Расчет								
		Эксперимент								
Активно-реактивная	«Треугольник»	Расчет								
		Эксперимент								
	«Треугольник», обрыв линии B	Расчет								
		Эксперимент								

Порядок выполнения экспериментальной части

1. Соберите схему (рис. 4.9). Установите $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = 1$ кОм. Убедитесь, что $I_A = I_B = I_C = 0$, $I_N = 0$, $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$. Отключите нейтраль (рис. 4.10). Убедитесь, что $U_{нN} = 0$.

2. Установите в схеме (рис. 4.9) $Z_a = R_a$, $Z_b = R_b$, $Z_c = R_c$ по табл. 4.1 исходных данных. Измерьте токи, напряжения в схеме с нейтральным проводом. Вычислите мощность в нагрузке $P_{н}$. Подключая ваттметр поочередно в фазы A , B и C , измерьте мощность источника $P_{и}$. Результаты измерений занесите в табл. 4.3 и сравните с расчетными.

При измерении мощности следите за сигнализацией ошибок в выборе пределов измерения I , K , U , $U<$. Для переключения ваттметра из одной цепи в другую (то же для амперметра) используйте специальный коммутационный мини-блок «амперметр» и пару проводников с коаксиальным разъемом!

Схемы подключения ваттметров при измерении мощности в трехфазной цепи с нейтральным проводом и без него приведены на рис. 4.12 и 4.13. Активная мощность в четырехпроводной трехфазной цепи измеряется с помощью трех ваттметров, а в трехпроводной — с помощью двух ваттметров.

Уберите из схемы нейтральный провод (перемычку между точками N и n) и снова измерьте токи, напряжения в цепи и вычислите мощность в нагрузке $P_{\text{н}}$. Подключая токовую цепь ваттметра сначала в фазу A , а цепь напряжения — на напряжение U_{ab} , затем токовую цепь в фазу C , а цепь напряжения — на напряжение U_{cb} , как показано на рис. 4.13, измерьте мощность источника $P_{\text{и}}$. Занесите полученные результаты в табл. 4.3 и сравните с расчетными.

3. Повторите измерения и вычисления, заменив резисторы в фазах на конденсатор и катушку индуктивности согласно варианту с нейтралью и без нейтрали. Занесите полученные результаты в табл. 4.3 и сравните с расчетными.

4. В схеме цепи (рис. 4.10) отключите приемник в фазе A . Измерьте токи, напряжения и мощности согласно табл. 4.3. Затем восстановите схему, замкните приемник в фазе C . Измерьте те же параметры. Занесите полученные результаты в табл. 4.3 и сравните их с расчетными.

5. Соберите цепь с симметричной нагрузкой $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = 1$ кОм согласно принципиальной схеме (рис. 4.11), измерьте мультиметрами токи. Убедитесь, что

$$I_A = I_B = I_C, I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}, I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{ab}.$$

6. Установите несимметричную нагрузку согласно таблице данных. Измерьте мультиметрами токи, напряжения в соответствии с табл. 4.4. Вычислите мощность в нагрузке $P_{\text{н}}$. Измерьте мощность источника $P_{\text{и}}$. Активная мощность в трехфазной цепи при соединении нагрузки в «треугольник» измеряется с помощью двух ваттметров, так как в этом случае мы имеем трехпроводную цепь.

7. Повторите измерения и вычисления, заменив резисторы фаз на конденсатор и катушку индуктивности согласно варианту.

8. Прodelайте измерения фазных и линейных токов, а также мощностей источника $P_{\text{и}}$ и нагрузки $P_{\text{н}}$ при обрыве линии B . Занесите полученные результаты в табл. 4.4 и сравните их с расчетными.

9. Сделайте выводы по результатам экспериментов.

Построение векторной диаграммы напряжений методом засечек

Векторная диаграмма напряжений для соединения приёмников «звездой» без нулевого провода строится методом засечек. Нейтраль генератора (точка N) помещается в центр комплексной плоскости. Из точки N в выбранном масштабе напряжений откладываются три вектора фазных напряжений трёхфазного генератора – $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$:

$$\begin{cases} \underline{U}_A = U_\Phi \cdot e^{j \cdot 0^\circ} \\ \underline{U}_B = U_\Phi \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} \\ \underline{U}_C = U_\Phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ} \end{cases}$$

Из концов построенных векторов делаются засечки радиусами, равными соответственно фазным напряжениям приёмника $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$. Точка пересечения трёх засечек с некоторой погрешностью даёт точку n , которая определяет положение вектора напряжения смещения нейтрали \underline{U}_{nN} и положения векторов $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$. Диаграмма токов строится относительно векторов фазных напряжений нагрузки в масштабе токов.

Схемы подключения ваттметров при измерении мощности в трехфазной цепи

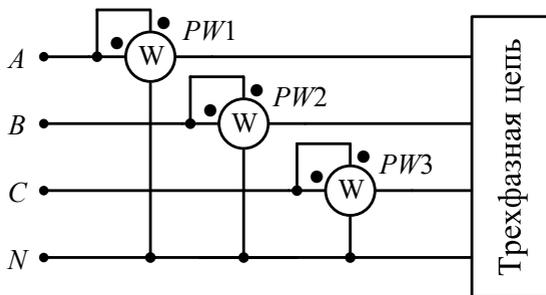


Рис. 4.12. Схема подключения ваттметров при измерении мощности в трехфазной цепи с нейтральным проводом

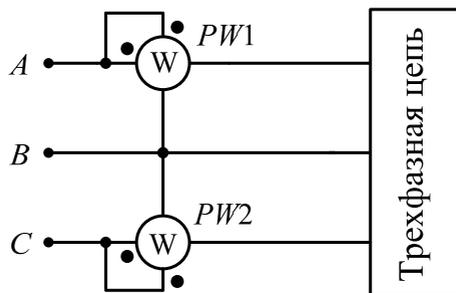


Рис. 4.13. Схема подключения ваттметров при измерении мощности в трехфазной цепи без нейтрального провода

Контрольные вопросы

1. Как получается система трехфазных ЭДС?
2. Какие существуют схемы соединений фаз в трехфазной системе?
3. Назовите основные соотношения между фазными и линейными величинами в схеме «звезда» и в схеме «треугольник»?
4. Каково назначение нулевого провода?
5. Как определить мощность, потребляемую трехфазным приемником?
6. Как изменятся фазные токи при отключении одного из линейных проводов, нулевого провода в симметричном приемнике?

Библиографический список

1. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», «Электроника и микроэлектроника» / С.М. Аполлонский, А.Л. Виноградов. — Москва : Кнорус, 2016. — 248 с. — ISBN 978-5-406-03879-6.
2. Введение в теоретическую электротехнику : курс подготовки бакалавров : учеб. пособие / Ю.А. Бычков [и др.]. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 288 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-2406-1.
3. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей : учебник / Г.И. Атабеков. — Изд. 4-е, стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 424 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-0699-9.
4. Белецкий, А.Ф. Теория линейных электрических цепей : учебник / А.Ф. Белецкий. — Изд. 3-е, стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 544 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-0905-1.
5. Рыбков, И.С. Электротехника : учеб. пособие / И.С. Рыбков. — Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2017. — 160 с. — (Высшее образование. Бакалавриат). — ISBN 978-5-369-00144-8.
6. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники : практикум : учеб. пособие / С.М. Аполлонский. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 320 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — ISBN 978-5-8114-2543-3.

Форма отчета по лабораторной работе

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

Отчет по лабораторной работе №

(название лабораторной работы)

Выполнил студент группы _____

Проверил преподаватель _____

Тольятти 20__

Цель работы —

Программа работы

- 1.
- 2.
- 3.
- ...

Описание лабораторной установки

Приводится электрическая схема исследуемой цепи (может быть одна или несколько), измеряемые величины, их метрологическое обеспечение, ссылки на нормативные источники и методические указания.

Индивидуальная расчетная часть

Индивидуальную расчетную часть выполняет каждый студент в соответствии с заданным вариантом. Она содержит исходные данные, схемы, системы уравнений, расчетные формулы, записанные в общем виде и с числовыми значениями; потенциальные и векторные диаграммы расчётной электрической цепи.

Расчетные и экспериментальные данные

Этот раздел содержит таблицы с результатами индивидуального расчета и данные, полученные в ходе эксперимента.

Результаты эксперимента

Данный раздел включает результаты обработки экспериментальных данных, сопровождаемые необходимыми расчетными формулами и таблицами; при необходимости строятся графики зависимостей, потенциальные и векторные диаграммы электрической цепи.

Выводы по работе

Выводы записываются по результатам экспериментов в соответствии с целью работы.

Описание блоков учебного комплекта

Комплект лабораторного оборудования «Электрические и магнитные цепи» предназначен для проведения лабораторного практикума по дисциплине «Теоретические основы электротехники». Позволяет исследовать линейные и нелинейные электрические и магнитные цепи при различных воздействиях в статических и динамических режимах.

Комплект лабораторного оборудования состоит из следующих блоков:

- однофазный источник питания;
- блок генераторов напряжений;
- наборная панель;
- набор мини-блоков;
- блок мультиметров;
- ваттметр;
- электронный осциллограф;
- соединительные провода и перемычки, питающие кабели.

Однофазный источник питания (218.9)

Назначение

Предназначен для питания однофазным переменным током промышленной частоты функциональных блоков учебного лабораторного комплекса. Основные параметры блока приведены в таблице.

Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Электропитание от однофазной сети переменного тока с нулевым и защитным проводниками:	
— напряжение, В	220 ± 22
— ток, А, не более	16
— частота, Гц	$50,0 \pm 0,5$
Выходные:	
— напряжение, В	220 ± 22
— ток, А, не более	16

Параметр блока	Значение параметра
Устройства защиты	Автоматический выключатель, устройство защитного отключения (УЗО) с током срабатывания 10 мА

Устройство и принцип действия

Конструктивно источник выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений источника. На панели размещены два однофазных автоматических выключателя, устройство защитного отключения, сигнальный светодиод и три штепсельные розетки с заземляющими контактами. На кожухе с тыльной стороны расположены приборные однофазные вилка и три розетки с заземляющими контактами.

Работа источника основана на передаче электрической энергии с его входа на выходы к потребителям с обеспечением защиты от сверхтоков и нарушения изоляции.

Внешний вид и порядок работы

Порядок работы:

- включите автоматический выключатель источника и устройство защитного отключения, если оно отключено;
- для снятия выходных напряжений (отключения) источника отключите его автоматический выключатель.

Внешний вид блока в отключенном состоянии представлен на рис. П.1, в состоянии «Включено» — на рис. П.2.

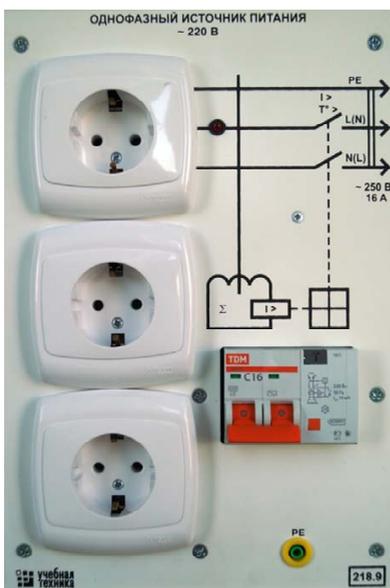


Рис. П.1. Состояние блока «Выключено»

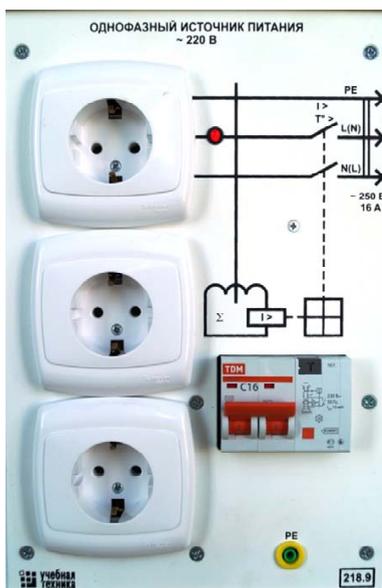


Рис. П.2. Состояние блока «Включено»

Блок генераторов напряжений (212.6)

Назначение

Предназначен для формирования однофазных регулируемых сигналов различной формы, трехфазного синусоидального напряжения и постоянных напряжений для питания исследуемых схем. Основные параметры блока приведены в таблице.

Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Выходное напряжение нерегулируемых источников питания, В:	
– положительной полярности	$+15,0 \pm 0,3$
– отрицательной полярности	$-15,0 \pm 0,3$
Ток от перегрузки по току, А	0,2
Выходное напряжение регулируемых источников питания, В	$-13...0...+13$
Ток от перегрузки по току, А	0,2

Параметр блока	Значение параметра
Виды сигналов на выходе однофазного генератора	Синусоидальный Прямоугольный двухполярный Прямоугольный униполярный Пилообразный двухполярный
Диапазон изменения амплитуды выходного напряжения однофазного генератора, В	0...12
Диапазон изменения частоты синусоидального и пилообразного сигналов	0,2 Гц...200 кГц
Диапазон изменения частоты прямоугольных сигналов	0,2 Гц...100 кГц
Генератор трехфазного напряжения: — количество выходов — частота выходного напряжения, Гц — амплитуда выходного напряжения, В	3 50 ± 1 12,0 ± 0,5

Внешний вид и порядок работы

Конструктивно источник выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена мнемосхема и названия основных органов управления и защиты (рис. П.3):

1 — выключатель подачи питания на блок — «Сеть»;
 2 — предохранитель в цепи питания блока;
 3 — генератор напряжений специальной формы;
 4 — кнопка «Форма», изменяющая форму напряжения на выходе генератора. Горящий светодиод показывает выбранную форму выходного сигнала;

5 — светодиоды, показывающие форму сигнала на выходе генератора. Горящее/мигающее состояние светодиода показывает, как будет изменяться выходная частота при повороте ручки энкодера-потенциометра;

6 — ручка энкодера-потенциометра, позволяющая изменять выходную частоту генератора. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра;

7 — индикатор частоты генератора;

8 – светодиоды, показывающие размерность установленной частоты генератора;

9 – ручка потенциометра регулировки выходного напряжения генератора;

10 – светодиод, показывающий перегрузку выхода генератора по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);

11 – выход генератора напряжений специальной формы;

12 – генератор постоянных напряжений;

13 – выходное гнездо источника питания +15 В;

14 – светодиод, показывающий перегрузку источника +15 В по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);

15 – выходное гнездо источника питания –15 В;

16 – светодиод, показывающий перегрузку источника –15 В по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);

17 – выходное гнездо регулируемого источника питания –13...0...+13 В;

18 – светодиод, показывающий перегрузку регулируемого источника питания по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);

19 – ручка потенциометра регулировки выходного напряжения регулируемого источника питания;

20 – генератор трехфазного напряжения с действующим значением выходного напряжения 8 В;

21 – выходные гнезда генератора трехфазного напряжения (фазы *A*, *B*, *C* и 0);

22 – светодиоды в цепях фазных напряжений трехфазного генератора, показывающие перегрузку соответствующей фазы по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);

23 – разъем подключения сетевого напряжения и заземления блока (на задней крышке блока).

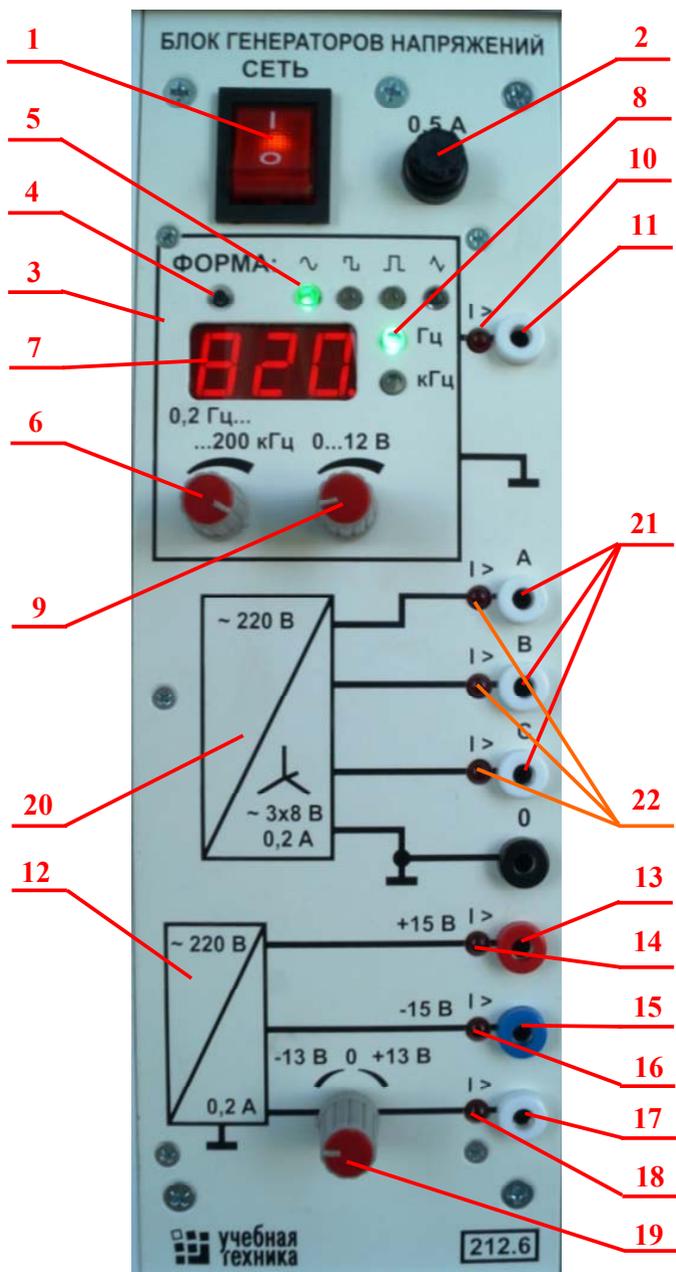


Рис. П.3. Внешний вид блоков генераторов

Порядок работы

1. Включите автоматический выключатель «Сеть». При наличии перегрузки или короткого замыкания в соответствующей цепи загорается светодиод перегрузки **1**>. Устраните причину перегрузки или короткого замыкания и дождитесь, пока соответствующий светодиод погаснет. Генератор напряжения снова находится в рабочем состоянии.
2. Регулировку выходной частоты генератора напряжений специальной формы производите энкодером-потенциометром **6**. При повороте ручки энкодера меняется выходная частота, и ее величина отображается на индикаторе **7** с размерностью, показываемой светодиодами **8**.
3. Переключение формы выходного напряжения производите путем нажатия на кнопку «Форма» **4**. При этом соответствующий светодиод **5** показывает форму выходного напряжения (мнемосхема формы выходного сигнала нанесена над светодиодом).
4. Регулировку амплитуды выходного напряжения генератора специальной формы производите ручкой потенциометра **8**.
5. Регулировку величины выходного напряжения регулируемого генератора постоянного напряжения производите ручкой потенциометра **19**.
6. По окончании проведения экспериментов следует выключить генератор напряжений (выключатель «Сеть»).

Наборная панель (305)

Назначение

Предназначена для установки и соединения между собой мини-блоков при построении исследуемых электрических и электронных цепей.

Внешний вид и порядок работы

Конструктивно панель выполнена в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений панели, и в соответствии с ней размещены соединительные гнезда (рис. П.4).

Электрический контакт мини-блоков и проводников осуществляется путем введения контактных штырей последних в гнезда панели.

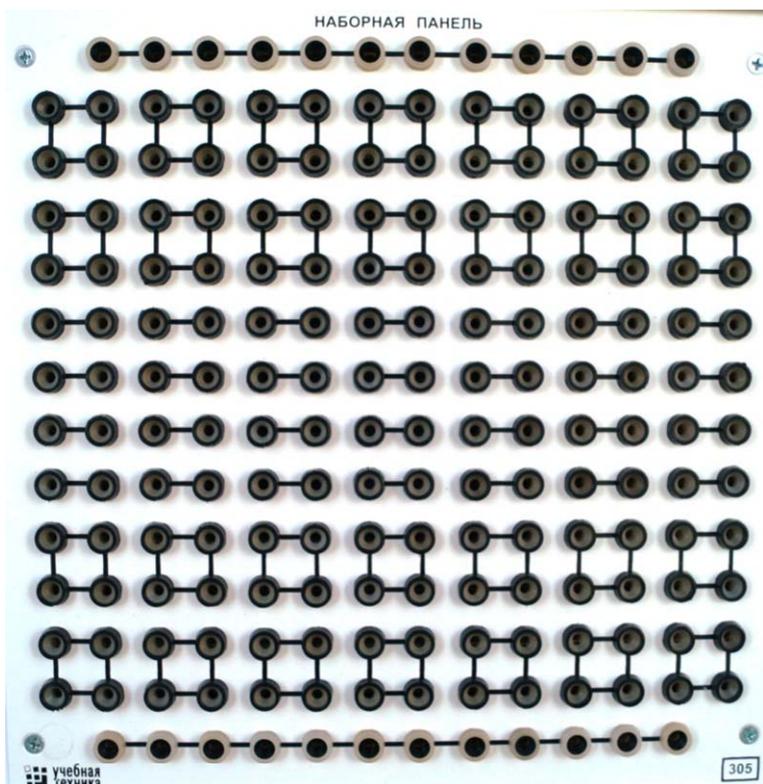


Рис. П.4. Внешний вид наборной панели

Набор мини-блоков (600.17)

Назначение

Предназначен для построения электрических и электронных цепей.

Устройство и принцип действия

Конструктивно набор выполнен в виде панели с установленными на ней мини-блоками. Мини-блоки представляют собой отдельные радиоэлементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т. п.), помещённые в прозрачные корпуса и имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые мини-блоки содержат несколько

элементов, соединённых между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Мини-блоки хранятся в специальном контейнере.

Внешний вид

Общий вид контейнера с мини-блоками представлен на рис. П.5.

Характеристики одноэлементных мини-блоков:

1 – резисторы МЛТ, мощность 2 Вт, погрешность сопротивления $\pm 5\%$, номиналы: 4,7 Ом, 10 Ом, 22 Ом, 33 Ом, 47 Ом, 100 Ом, 220 Ом, 330 Ом, 470 Ом, 1 кОм, 2,2 кОм, 47 кОм;

2 – конденсаторы типа К73-17, напряжением 63...100 В, номиналы: 0,22 мкФ, 0,47 мкФ, 1 мкФ, 4,4 мкФ, полярный 10 мкФ, полярный 100 мкФ;

3 – потенциометр типа СП4-2М, номинал 1 кОм;

4 – лампа сигнальная СМН-10-55;

5 – индуктивности, ток 50 мА, номиналы: 33 мГн, 100 мГн;

6 – мини-блоки «амперметр» (6 шт.) позволяют подключать амперметр в различные ветви исследуемой электрической цепи без разборки схемы. Их устанавливают в наборную панель в тех местах схемы, где требуется измерить токи. В крышку мини-блока встроено гнездо коаксиального разъёмного соединителя, а к амперметру подсоединяется кабель с соответствующим штырём;

7 – мини-блок «трансформатор» выполнен на разъёмном U-образном сердечнике из листовой электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На сердечнике установлены катушки на 900 и 300 витков, и имеются две сменные катушки на 300 и 100 витков. Катушки легко переставляются в ходе лабораторной работы. Ниже приведены номинальные параметры трансформаторов при частоте 50 Гц.

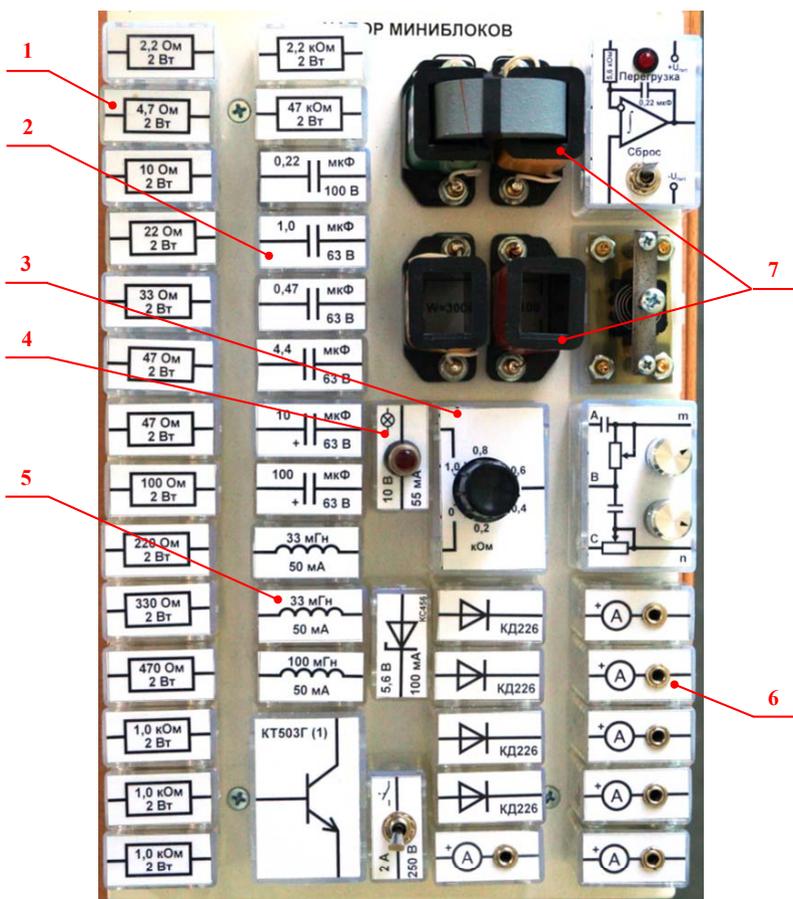


Рис. П.5. Внешний вид набора мини-блоков

Номинальные параметры трансформаторов

W	$U_H, В$	$I_H, мА$	$R, Ом$	$S_H, В \cdot А$
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

Блок мультиметров (509.2.1)

Назначение

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. В таблице приведены основные параметры блока.

Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Электропитание от однофазной сети переменного тока с нулевым и защитным проводниками: — напряжение, В — частота, Гц	220 ± 22 $50 \pm 0,5$
Потребляемая мощность, В · А, не более	20
Тип мультиметра	UNI-T

Устройство и принцип действия

Конструктивно блок мультиметров выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели закреплены мультиметры, сетевой выключатель и держатели с предохранителями. На верхней боковой грани кожуха расположена вилка для присоединения шнура питания.

Внешний вид и порядок работы

В блоке (рис. П.6) установлены два серийно выпускаемых мультиметра МУ60. Подробная техническая информация о них и правила применения приводятся в руководстве по эксплуатации. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

Для обеспечения надёжной и длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

- не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы;
- когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину;

- перед тем как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи;
- не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение;
- не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены;
- будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения, имеющихся в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.



Рис. П.6. Общий вид блока мультиметров

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: $-V$, $\sim V$, $-A$, $\sim A$ или Ω ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. П.7.

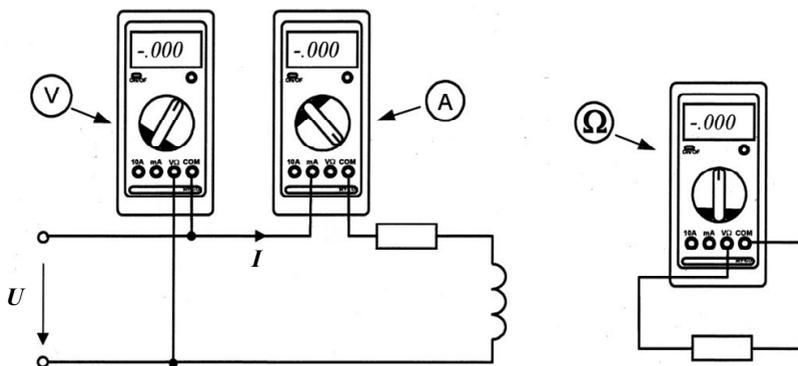


Рис. П.7. Подключение мультиметра в электрическую цепь

Порядок работы

1. Включите выключатель «Сеть».
2. Включите используемые в эксперименте мультиметры.
3. С помощью переключателей мультиметров устанавливайте пределы и виды измеряемых параметров.
4. Отсчет показаний производите с дисплеев мультиметров. Включите выключатель «Сеть».
5. Для выведения блока мультиметров из работы отключите выключатель «Сеть».

Блок «ваттметр» (511)

Назначение

Предназначен для измерения активной мощности в цепях постоянного и переменного тока.

Технические характеристики

Параметр блока	Значение параметра
Электропитание от однофазной сети переменного тока с нулевым и защитным проводниками: — напряжение, В — частота, Гц	220 ± 22 $50,0 \pm 0,5$
Потребляемая мощность, В · А, не более	20
Пределы измерения: — напряжение (постоянное/переменное), В — ток (постоянный/переменный), А — частота тока/напряжения, Гц	$0...5/50$ $0...0,04/0,4$ $0...20000$
Пределы измерения активной мощности, Вт	$0...20$
Погрешность измерения, %, не более	$\pm 2,5$

Устройство и принцип действия

Конструктивно ваттметр выполнен в виде коробки с лицевой панелью и кожухом. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений ваттметра и в соответствии с ней размещены гнезда для присоединения внешних устройств. На ней также размещены LED-индикатор, выключатель сетевого питания, держатель с предохранителем, переключатели пределов измерения напряжения и тока, светодиоды, сигнализирующие о выходе напряжения и тока за пределы измерения.

Работа ваттметра основана на перемножении мгновенных значений тока и напряжения и отображении среднего значения этого произведения на LED-дисплее прибора в цифровом виде.

Внешний вид и порядок работы

Внешний вид блока представлен на рис. П.8.

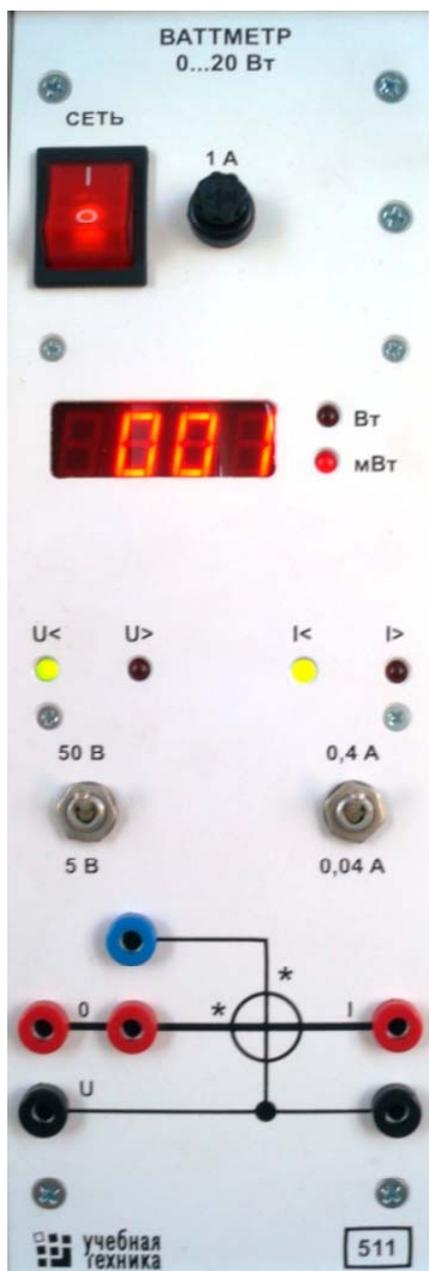


Рис. П.8. Внешний вид блока «ваттметр»

Порядок работы

1. Включите прибор в электрическую цепь согласно приведённой на лицевой панели схеме (рис. П.8). Для измерения активной мощности гнезда, помеченные символом «*», должны быть соединены перемычкой.
2. Включите выключатель «Сеть» и установите тумблерами необходимые пределы измерения по току и по напряжению.
3. Если выбран заниженный предел измерения, то включается сигнализация перегрузки $I >$ или $(и) U >$. Если, наоборот, предел превышен, то включается сигнализация $I <$ или $(и) U <$.
4. Отсчитайте показания на LED-индикаторе. Следует помнить, что справа от окошка цифровых индикаторов включаются автоматически светодиоды сигнализации размерности Вт или мВт.
5. Для выведения блока «ваттметр» из работы отключите выключатель «Сеть».