

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
учреждений высшего образования по специальности  
1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства  
(по направлениям)»*

В двух частях

Часть 1

Теория цепей постоянного тока.  
Цепи однофазного синусоидального тока

Минск  
БГАТУ  
2021

УДК 621.31(07)

ББК 31.2я7

Т33

Составители:

кандидат технических наук, доцент *А. В. Крутов*,  
кандидат физико-математических наук, доцент *Н. Г. Крылова*,  
старший преподаватель *Т. Ф. Гузанова*,  
старший преподаватель *М. А. Бойко*,  
старший преподаватель *В. В. Мацкело*

Рецензенты:

кафедра «Электротехника и электроника»  
Белорусского национального технического университета  
(кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой *Ю. В. Бладыко*);  
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора  
Республиканского научно-производственного унитарного предприятия  
«Институт энергетики НАН Беларуси» *Н. Е. Шевчик*

**Т33** **Теоретические** основы электротехники. Лабораторный практикум :  
учебно-методическое пособие. В 2 ч. Ч. 1. Теория цепей постоянного  
тока. Цепи однофазного синусоидального тока / сост.: А. В. Крутов  
[и др.]. – Минск : БГАТУ, 2021. – 116 с.  
ISBN 978-985-25-0115-6.

Содержит материал для проведения лабораторных работ по разделам теории цепей постоянного тока, однофазным цепям синусоидального тока. Представлены методические указания по исследованию соответствующих электрических цепей, обработке получаемых результатов экспериментальных данных.

Для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)» и направлению специальности 1-53 01 01-09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)».

УДК 621.31(07)

ББК 31.2я7

ISBN 978-985-25-0115-6 (ч. 1)

ISBN 978-985-25-0114-9

© БГАТУ, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	6
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	8
Модуль 2. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	
Лабораторная работа № 1. Экспериментальная проверка законов Кирхгофа .....	10
Лабораторная работа № 2. Цепь постоянного тока.....	16
Лабораторная работа № 3. Линия электропередачи постоянного тока.....	26
Лабораторная работа № 4. Исследование свойств электрических цепей .....	30
Лабораторная работа № 5. Исследование вольт-амперных характеристик нелинейных элементов .....	37
Лабораторная работа № 6. Исследование нелинейных цепей постоянного тока.....	45
Модуль 3. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	
Лабораторная работа № 7. Исследование цепи переменного напряжения с последовательным соединением приемников.....	51
Лабораторная работа № 8. Исследование электрической цепи с параллельным и смешанным соединением элементов .....	60
Лабораторная работа № 9. Измерение мощности и определение параметров приемника в цепи переменного тока...	69
Лабораторная работа № 10. Линия электропередачи переменного тока .....	75
Лабораторная работа № 11. Исследование линейной цепи периодического несинусоидального тока, напряжения.....	80

Лабораторная работа № 12. Исследование режимов работы четырёхполюсника .....	88
Лабораторная работа № 13. Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока.....	93
Лабораторная работа № 14. Резонанс токов и компенсация угла сдвига фаз.....	99
Лабораторная работа № 15. Исследование электрических цепей с индуктивно-связанными катушками. Определение взаимной индуктивности индуктивно-связанных катушек .....	105
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	113

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данные методические указания к лабораторным работам составлены в соответствии с программой курса «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и включают в себя работы по разделам «Нелинейные электрические цепи» и «Электромагнитное поле». В описании каждой работы содержится ее цель, общие сведения, методика исследования, рекомендации по подготовке к выполнению задания и оформлению отчета, контрольные вопросы. Общие сведения из теории, которые даются в начале каждой работы, не ставят целью заменить учебные пособия по курсу ТОЭ. Они изложены кратко и применительно к содержанию лабораторной работы. Для полного изучения материала студент обязан обратиться к учебникам и учебным пособиям, список которых приведен в конце издания.

## ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные занятия преследуют цель более глубокого усвоения теоретических вопросов путем экспериментальной проверки основных положений курса. Кроме того, эти занятия способствуют выработке навыков проведения исследования и анализа электрических цепей и электромагнитного поля.

Перед выполнением лабораторных работ, в начале семестра каждый студент должен изучить правила безопасности, относящиеся к данной лаборатории.

К каждому очередному лабораторному занятию необходимо изучить описание лабораторной работы и соответствующий теоретический материал по конспекту лекций и учебным пособиям. Электрические схемы и таблицы для записи наблюдений должны быть подготовлены заранее.

Перед началом выполнения каждой работы проводится проверка готовности студентов к этой работе. В случае неподготовленности студент к работе не допускается.

Прежде чем собирать электрическую цепь, следует ознакомиться с находящимся на рабочем месте оборудованием, выяснить его назначение, параметры каждого элемента цепи, а для приборов – пределы измерений, род тока и цену деления шкалы. При наличии на рабочем месте автотрансформаторов типа ЛАТР и реостатов следует установить в начальное положение их движки, чтобы после включения электрической цепи напряжение и ток в ней были минимальными. После этого необходимо собрать электрическую цепь.

Сборку сложной электрической цепи рекомендуется начинать с последовательно соединенных элементов и приборов, а затем подключать параллельные ветви, как самой электрической цепи, так и приборов.

Каждая собранная электрическая цепь, а также произведенные в ней изменения должны быть проверены преподавателем или лаборантом и только с их разрешения цепь может быть включена под напряжение. Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила безопасности и соблюдать дисциплину. Лица, нарушающие правила безопасности, отстраняются от выполнения работы.

Проводя те или иные испытания, необходимо стремиться получить достоверные результаты. Следует помнить, что небрежность в снятии показаний приборов и записях обычно приводит к неправильным выводам о свойствах испытуемой цепи. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть проведены повторно.

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности и периодически ими меняться. При этом все должны активно вникать в смысл проводимых испытаний, уметь собирать электрические схемы, определять цену деления прибора.

После окончания каждого опыта необходимо ознакомить с результатами замеров преподавателя и только с его разрешения разбирать электрическую цепь.

По завершении лабораторных занятий необходимо оборудование и приборы аккуратно составить на рабочем месте, а провода убрать в ящик стола. Только после этого приступить к оформлению отчета.

Отчет по проведенной работе оформляется каждым студентом. Отчет должен содержать: название работы, ее цель; электрические схемы цепей, исследованных в данной работе; таблицы, графики или иные результаты всех опытов, проведенных в работе; расчетные формулы и результаты вычислений; анализ результатов и выводы.

Отчеты оформляются на специальных бланках или в обычной тетради аккуратно, с использованием чертежных инструментов и с соблюдением стандартных обозначений для элементов электрических схем.

Все графики должны быть выполнены в соответствующем масштабе и с обозначением величин. На графиках обязательно должны быть нанесены точки, по которым строились кривые.

Отчет по проведенной работе должен быть защищен студентом в конце занятия или перед началом следующей работы. В противном случае студент, не отчитавшийся за две работы, не допускается к выполнению следующей. Пропущенные лабораторные занятия по уважительным или неуважительным причинам должны быть отработаны в период, согласованный с преподавателем, с разрешения деканата.

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Исследование электрических цепей, установок и приборов неизбежно связано с применением небезопасных для здоровья и жизни напряжений. Поражение током может привести к тяжелым последствиям. Необходимо, чтобы лица, работающие в этих опасных условиях, постоянно и точно выполняли соответствующие правила безопасности.

В лаборатории ТОЭ опасными являются фазные и линейные напряжения 127, 220, 380 В. Опасными могут быть напряжения выше 36 В, а также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с индуктивностями, неразрядившиеся конденсаторы. Кроме того, при неправильных действиях с электрическим оборудованием, неверно собранных электрических схемах возможны короткие замыкания и перегрузки в цепях, что приводит к выходу из строя приборов, элементов цепи, повреждению изоляции, расплавлению токопроводящих частей оборудования, его перегреву. Брызги расплавленного металла опасны ожогом открытых участков тела, а возникшая электрическая дуга поражает органы зрения.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности.

1. Не допускается загромождать рабочие места личными вещами. Во время лабораторных занятий мобильные телефоны должны быть отключены.

2. Прежде чем собирать цепь, необходимо убедиться, что сетевой выключатель отключен, и сигнальная лампа на стенде не горит.

3. При сборке электрической цепи соединения проводниками следует выполнять так, чтобы они не ложились на шкалы приборов, имели наименьшее число пересечений между собой и были надежно присоединены к зажимам. Под один зажим допускается присоединять не более трех клемм. Все неиспользованные проводники должны быть убраны в ящик стола.

4. Включение цепи под напряжение разрешается только после проверки преподавателем или лаборантом.

5. Во время работы с электрической цепью нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать



к нему посторонних. Каждый человек, включающий цепь под напряжение, должен предупредить о своем действии остальных членов бригады.

6. При обнаружении каких-либо неисправностей (повышенный шум, искрение, перегрев обмоток или проводов, отсутствие свечения сигнальной лампы) или при попадании кого-нибудь под напряжение нужно немедленно отключить напряжение и пригласить преподавателя.

7. Во время работы не касаться незащищенных частей электрических цепей, находящихся под напряжением.

8. Все изменения в цепи проводятся при отключенном напряжении. После этого цепь должен проверить преподаватель или лаборант. При выходе студентов на перерыв электрическая цепь должна быть отключена от источника питания.

9. После окончания работы необходимо показать преподавателю результаты замеров и только после этого разобрать цепь, привести в порядок рабочее место (сложить провода, составить приборы, стулья).

10. За порчу лабораторного оборудования, вызванную небрежным обращением с ним или невыполнением требований данного руководства, студенты несут материальную или дисциплинарную ответственность.

## Модуль 2. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Лабораторная работа № 1

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА

#### 1. Цель работы

Целью работы является опытная проверка законов Кирхгофа, изучение метода расчета сложных электрических цепей, основанного на законах Кирхгофа, и построение потенциальной диаграммы электрической цепи.

#### 2. Общие сведения

Сложная электрическая цепь имеет ветви и узлы.

Ветвью электрической цепи называют участок, вдоль которого протекает один и тот же ток. Узлом цепи называют точку соединения не менее трех ветвей. На рис. 1.2 представлена схема электрической цепи с двумя узлами и тремя ветвями.

Контуром в электрической цепи называют замкнутый путь, проходящий в общем случае по нескольким ветвям, при этом каждый узел в рассматриваемом контуре встречается не более одного раза. В качестве примера на рис. 1.2 можно указать контур *abcdefa*.

Все электрические цепи подчиняются первому и второму законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи и формулируется следующим образом: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Подтекающие к узлу токи считаются положительными, а оттекающие – отрицательными.

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи и имеет следующую формулировку: в любом замкнутом контуре

алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum E = \sum RI.$$

При составлении уравнения по второму закону Кирхгофа выбирают контур и направление его обхода. Если направление ЭДС совпадает с обходом контура, то эту ЭДС записывают со знаком плюс, если не совпадает, то – со знаком минус. Если направление напряжения совпадает с обходом контура, то напряжение записывают со знаком плюс, если не совпадает, то – со знаком минус.

Направление напряжения на участке с сопротивлением совпадает с направлением тока на этом участке.

Расчет сложных электрических цепей осуществляется путем решения системы уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Как правило, подлежат определению токи в ветвях при известных ЭДС и сопротивлениях элементов цепи. Число независимых уравнений в этом случае должно равняться числу токов или числу ветвей схемы.

При составлении уравнений по законам Кирхгофа рекомендуется придерживаться такой последовательности: сначала обозначить на схеме произвольные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи, затем составить уравнения на основании первого закона Кирхгофа для узлов. Число этих уравнений должно быть на единицу меньше числа узлов. Недостающее число уравнений составляется на основании второго закона Кирхгофа. Для этого выбираются контуры и задаются направлением их обхода. Для того чтобы уравнения по второму закону Кирхгофа, а, следовательно, и сами контуры были независимыми, достаточно (но не всегда необходимо), чтобы каждый последующий контур отличался от предыдущего хотя бы одной новой ветвью.

Потенциальной диаграммой называют график распределения потенциала вдоль какого-либо участка электрической цепи или замкнутого контура. На графике по оси абсцисс откладываются в масштабе сопротивления в том порядке, в каком они встречаются при обходе контура. По оси ординат откладывают потенциалы точек электрической схемы. Потенциал точки, с которой начинается обход контура, принимается равным нулю.

Потенциальная диаграмма позволяет определить напряжение между любыми точками цепи.

Потенциалы точек могут быть определены относительно определенной точки цепи замером с помощью вольтметра или расчетом, если известны ЭДС, сопротивления, величина и направление токов электрической цепи.

При расчете потенциала какой-либо точки необходимо учитывать, что на участке цепи без ЭДС ток течет от более высокого потенциала к более низкому. Следовательно, если мы перемещаемся по направлению тока, то происходит понижение потенциала на величину падения напряжения на данном участке цепи.

При переходе через источник ЭДС от отрицательного зажима к положительному потенциал повышается на величину ЭДС источника. При переходе через источник в обратном направлении – потенциал падает на величину ЭДС источника.

### 3. Описание лабораторной установки

Для исследования цепей постоянного тока на лабораторном стенде имеются набор резисторов и два источника постоянной ЭДС:  $E_1$  и  $E_2$ . Внешний вид панели стенда показан на рис. 1.1.

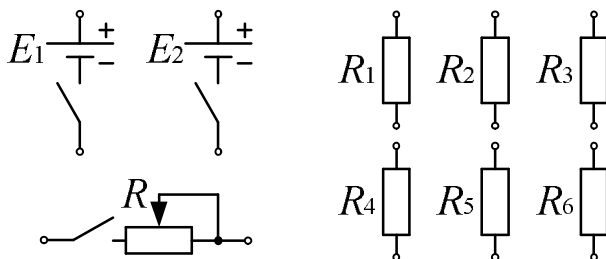


Рис. 1.1. Элементы цепи постоянного тока

Для измерения токов предусмотрены миллиамперметры с пределами измерения 100–150 мА, для измерения напряжений – вольтметр на 15 В (электронный, цифровой, М 253, М 330).

Объектом исследования в данной лабораторной работе является сложная электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками ЭДС в разных ветвях (рис. 1.2).

Буквами *a, b, c, d, e, f* на схеме обозначены точки, потенциалы которых необходимо измерить.

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.2. Амперметры подключить левой (отрицательной) клеммой к узлу «с».

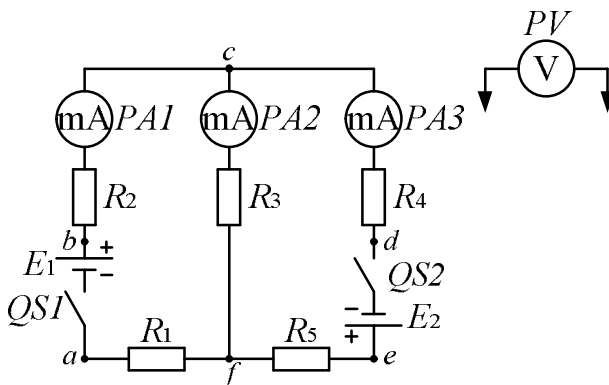


Рис. 1.2. Схема сложной цепи постоянного тока

4.2. Записать в табл. 1.1 значения сопротивлений резисторов.

Таблица 1.1

Сопротивления резисторов

$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом

4.3. Убедиться в справедливости первого закона Кирхгофа: Включить источники ЭДС, измерить ЭДС и токи. При этом токи амперметров, имеющих отклонение стрелки вправо, записать со знаком плюс, влево – со знаком минус.

Токи со знаком плюс подходят к узлу «с», со знаком минус отходят от узла «с». Данные измерений занести в табл. 1.2. На схеме электрической цепи указать направления токов в ветвях.

Таблица 1.2

Проверка первого закона Кирхгофа для узла «с» и расчетные значения токов

Измерено						Вычислено		
$E_1$ , В	$E_2$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$\sum I$ , мА	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА

4.4. Убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа:  
 $\sum U = \sum E$ .

Обходя контур, согласно табл. 1.3, по часовой стрелке записать значения ЭДС и напряжений на резисторах, входящих в этот контур, с учетом знака (плюс или минус). Знаки перед ЭДС расставить согласно направлениям этих ЭДС, указанным в схеме рис. 1.1. Знаки перед напряжениями на резисторах расставить согласно направлениям токов в этих резисторах (см. пункт 4.3).

Таблица 1.3

Проверка второго закона Кирхгофа для контуров электрической цепи

Контур	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$U_{R1}$ , В	$U_{R2}$ , В	$U_{R3}$ , В	$U_{R4}$ , В	$U_{R5}$ , В	$\sum E$ , В	$\sum U$ , В
<i>abcdefa</i>					—				
<i>abcfa</i>		—				—	—		
<i>fcdef</i>	—		—	—					

4.5. Измерить и записать в табл. 1.4 потенциалы точек относительно точки, заданной преподавателем. Потенциал этой точки следует принять равным нулю и к ней подключить отрицательный зажим вольтметра. При отклонении стрелки вольтметра вправо потенциал точки записывается со знаком плюс, влево – со знаком минус (вольтметр М 330).

Таблица 1.4

Потенциалы точек электрической цепи

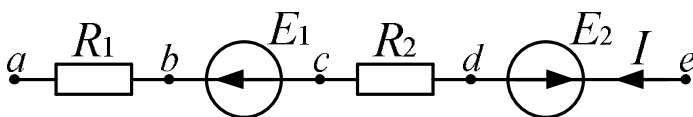
Потенциалы	$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_e$	$\varphi_f$
Измерено, В						

4.6. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для расчета токов в ветвях электрической цепи по схеме рис. 1.2. Пользуясь заданными значениями сопротивлений и измеренными значениями ЭДС (см. табл. 1.1, 1.2) рассчитать токи, занести их в табл. 1.2 и сравнить с измеренными. Отчет должен содержать расчеты по данному пункту.

4.7. Построить потенциальную диаграмму для контура  $abcdefa$ .

### 5. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение ветви, узла, контура в электрической схеме.
2. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа. Запишите их аналитическое выражение. Сформулируйте правила знаков при составлении уравнений по законам Кирхгофа.
3. Каков порядок расчета токов в сложной цепи на основании законов Кирхгофа?
4. Объясните построение потенциальной диаграммы.
5. Определите потенциалы точек приведенной ниже цепи, приняв  $\varphi_a = 0$ .



## Лабораторная работа № 2

### ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Целью работы является экспериментальная проверка эквивалентных преобразований схем электрических цепей, а также установление связей между напряжениями и токами при изменении сопротивления одного из элементов цепи.

#### 2. Общие сведения

По закону Ома электрический ток через приемник с сопротивлением  $R$  равен напряжению  $U$  на этом приемнике, деленному на сопротивление  $R$  этого приемника:

$$I = \frac{U}{R}.$$

При расчетах электрических цепей с одним источником электрической энергии, как правило, известны напряжение источника, т. е. напряжение на входе цепи, и сопротивления приемников, которые могут быть соединены между собой различными способами. В этом случае целесообразно упростить схему цепи, заменив группу приемников или все приемники одним эквивалентным приемником. Преобразования называют эквивалентными, если токи и напряжения ветвей в тех частях схемы, которые не затронуты преобразованиями, остаются неизменными.

Последовательным соединением приемников называют такое их соединение, при котором через все приемники проходит один и тот же ток (рис. 2.1).

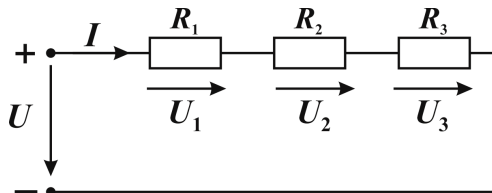


Рис. 2.1. Последовательное соединение приемников



При последовательном соединении приемников напряжение  $U$ , приложенное к цепи, согласно второму закону Кирхгофа, равно сумме напряжений на зажимах отдельных приемников:  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Так как во всех последовательно соединенных приемниках течет один и тот же ток, то по закону Ома можно записать

$$U_1 = R_1 I, U_2 = R_2 I, U_3 = R_3 I,$$

откуда

$$U = R_1 I + R_2 I + R_3 I = R_{\text{экв}} I,$$

где  $R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3$ , то есть эквивалентное сопротивление цепи при последовательном соединении приемников равно сумме сопротивлений отдельных приемников.

Полученное эквивалентное сопротивление цепи  $R_{\text{экв}}$  позволяет заменить цепь с несколькими последовательно соединенными приемниками эквивалентной цепью с одним приемником, имеющим сопротивление  $R_{\text{экв}}$  (рис. 2.2).

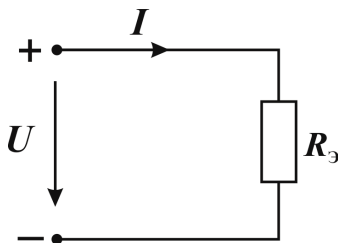


Рис. 2.2. Схема эквивалентной электрической цепи

Только после такого преобразования можно использовать закон Ома для расчета тока, поскольку напряжение  $U$  на эквивалентном приемнике (на входе цепи) известно:

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}}.$$

**Параллельным соединением приемников** называют такое их соединение, при котором все приемники подключены к одним и тем же двум узлам и находятся под одним и тем же напряжением (рис. 2.3).

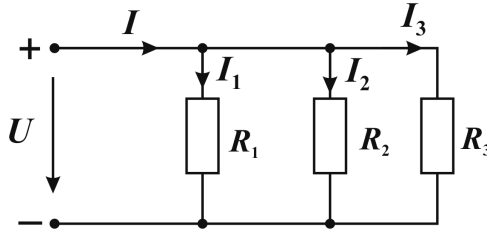


Рис. 2.3. Параллельное соединение приемников

Применяя первый закон Кирхгофа, можем записать

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Так как при параллельном соединении приемники находятся под одним и тем же напряжением, токи в них найдем из выражений:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3},$$

поэтому

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R_{\text{экв}}},$$

откуда  $\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$  или  $g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3$ , где  $g$  – проводимость.

Таким образом, эквивалентная проводимость цепи при параллельном соединении приемников равна сумме проводимостей отдельных приемников.

Определив эквивалентную проводимость при параллельном соединении приемников, можно найти эквивалентное сопротивление как

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{g_{\text{экв}}}.$$

В частном случае для двух параллельно соединенных приемников

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Найденное эквивалентное сопротивление цепи  $R_{\text{экв}}$  позволяет заменить цепь с параллельным соединением приемников эквивалентной цепью с одним приемником (см рис. 2.2). Схема первоначальной цепи значительно упрощается, что широко используется при расчете разветвленных цепей.

Схема простейшей цепи со смешанным соединением приемников представлена на рис. 2.4.

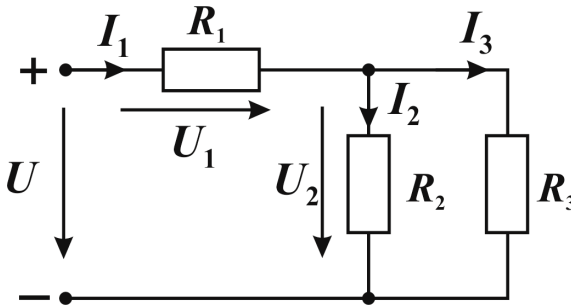


Рис. 2.4. Смешанное соединение приемников

Для такой цепи справедливы соотношения  $U = U_1 + U_2$  и  $I_1 = I_2 + I_3$ .

Эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением приемников находится путем последовательных преобразований схемы цепи. Для цепи (см. рис. 2.4) сначала заменяют параллельно соединенные приемники  $R_2$  и  $R_3$  одним эквивалентным  $R_{23}$ , затем в получившейся схеме цепи с последовательным соединением приемников  $R_1$  и  $R_{23}$  (рис. 2.5, а) находят эквивалентное сопротивление всей цепи

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

В результате разветвленная цепь со смешанным соединением приемников может быть заменена эквивалентной цепью с одним приемником с сопротивлением  $R_{\text{экв}}$  (рис. 2.5, б). Это позволит использовать закон Ома для расчета тока  $I_1$ , поскольку напряжение  $U$  на эквивалентном приемнике (на входе цепи) известно.

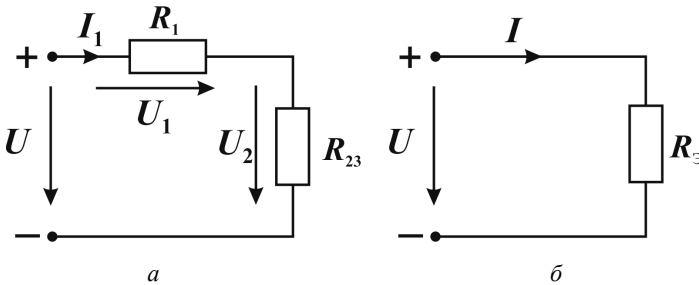


Рис. 2.5. Схемы последовательных преобразований цепи, изображенной на рис. 2.4:  
 а – преобразование параллельно соединенных приемников  $R_2$  и  $R_3$ ;  
 б – преобразование последовательно соединенных приемников  $R_1$  и  $R_{23}$

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования являются электрические цепи с одним источником ЭДС  $E_1$  с последовательным, параллельным и смешанным соединением приемников.

В качестве приемников используются резисторы  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_6$ .

Для измерения токов на стенде предусмотрены миллиамперметры с пределами измерения 100–150 мА, для измерения напряжений – вольтметр, А на 15 В (электронный, цифровой, М 253, М 330).

### 4. Программа и методика выполнения работы

#### 4.1. Последовательное соединение двух приемников:

а) собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2.6), измерить ток в цепи и напряжения на обоих приемниках и на входе цепи для шести различных значений переменного сопротивления  $R$ . Первый замер при  $R = \infty$  (участок цепи с сопротивлением  $R$  разомкнут);

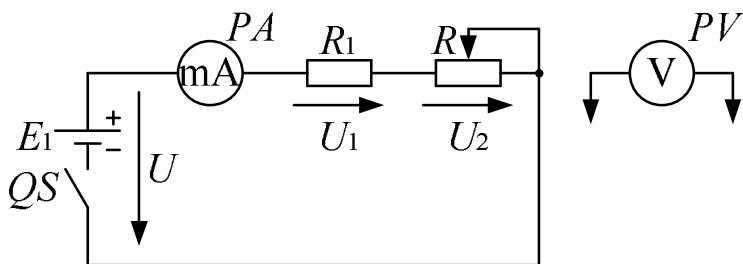


Рис. 2.6. Электрическая цепь с последовательным соединением приемников

Таблица 2.1

Напряжения и ток при последовательном соединении приемников

Измерено				Вычислено			
$U$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I$ , мА	$R_1$ , Ом	$R$ , Ом	$R_{\text{экв}}$ , Ом	$R_{\text{экв}} = U / I$ , Ом

б) по данным опыта убедиться в справедливости соотношения

$$U = U_1 + U_2;$$

в) построить в одних осях координат графики зависимостей:

$$U = f(I), U_1 = f(I), U_2 = f(I).$$

4.2. Параллельное соединение приемников:

а) собрать электрическую цепь по схеме рис. 2.7.

Измерить токи и напряжения для шести различных значений переменного сопротивления  $R$ . Первый замер при  $R = \infty$  (участок цепи с сопротивлением  $R$  разомкнут);

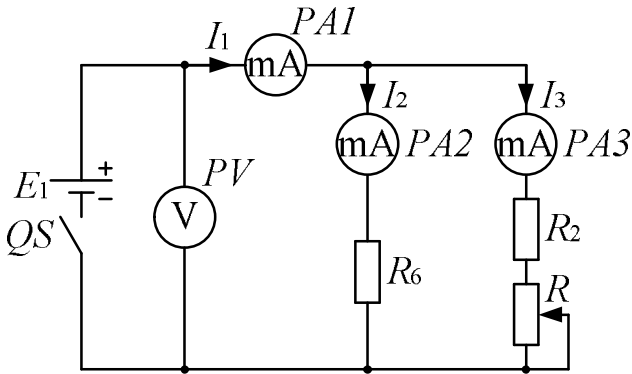


Рис. 2.7. Электрическая цепь с параллельным соединением приемников

Таблица 2.2

Напряжение и токи при параллельном соединении приемников

Измерено			Вычислено				
$U$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$R_6$ , Ом	$R_2+R$ , Ом	$R_{\text{ЭКВ}}$ , Ом	$R_{\text{ЭКВ}} = U / I_1$ , Ом

б) по данным опыта проверить соблюдение первого закона Кирхгофа

$$I_1 = I_2 + I_3;$$

в) построить в одних осях координат графики зависимостей

$$I_1 = f(I_3) \text{ и } I_2 = f(I_3).$$

4.3. Смешанное соединение приемников.

а) собрать схему (рис. 2.8), измерить токи и напряжения для трех различных значений сопротивления  $R$ ;

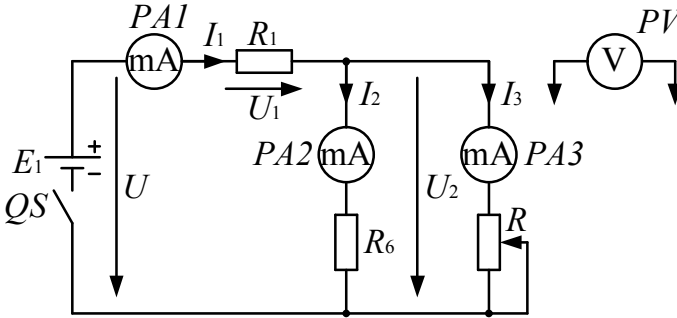


Рис. 2.8. Электрическая цепь со смешанным соединением приемников

Таблица 2.3

Напряжения и токи при смешанном соединении приемников

Измерено					Вычислено					
$U$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$R_1$ , Ом	$R_6$ , Ом	$R$ , Ом	$R_{\text{экв}}$ , Ом	$R_{\text{экв}} = U / I$ , Ом

б) проверить справедливость соотношений

$$U = U_1 + U_2, \quad I_1 = I_2 + I_3;$$

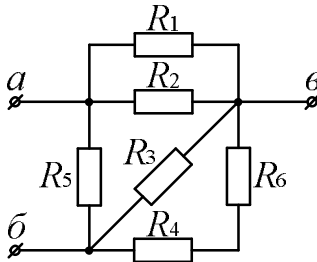
в) записать формулы, по которым рассчитаны сопротивления  $R_1$ ,  $R_6$ ,  $R$ .

4.4. Руководствуясь законами Ома и Кирхгофа, объяснить, как изменятся токи и падения напряжений в цепи при уменьшении или увеличении одного из сопротивлений при последовательном, параллельном и смешанном соединении приемников.

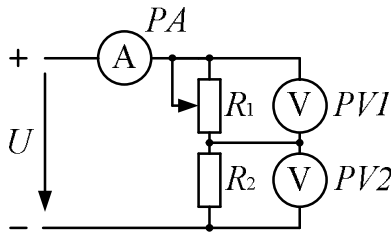
## 5. Контрольные вопросы и задания

1. Какое соединение приемников называют последовательным и какое – параллельным?
2. Как определяется эквивалентное сопротивление при последовательном, параллельном и смешанном соединении сопротивлений?
3. Определить эквивалентное сопротивление цепи относительно: 1) зажимов а–б; 2) зажимов б–в.

Дано:  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = R_5 = R_6 = 5 \text{ Ом}$ .



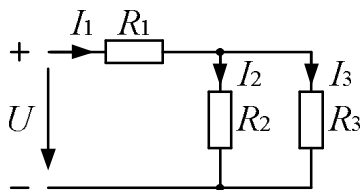
4. Как изменятся показания приборов при перемещении движка реостата  $R_1$  вниз, если  $U = \text{const}$ ?



5. Определить токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , если известно:

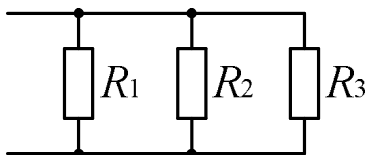
$U = 100 \text{ В}$ ;  $R_1 = 8 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 30 \text{ Ом}$ .





6. Найти эквивалентное сопротивление цепи, если

$$R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 20 \text{ Ом}; R_3 = 20 \text{ Ом}.$$



7. Сформулируйте закон Ома и законы Кирхгофа.

8. Нарисуйте схемы эквивалентных преобразований участков цепи при определении эквивалентного сопротивления всей цепи.

## Лабораторная работа № 3

### ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Целью работы является исследование линии электропередачи постоянного тока с переменной нагрузкой.

#### 2. Общие сведения

В настоящее время имеются линии электропередачи постоянного тока на дальние расстояния. Кроме того, передача энергии постоянным током встречается на электрифицированных железных дорогах, в трамвайной сети и на промышленных предприятиях, где имеются двигатели постоянного тока.

Передача энергии от источника электрической энергии к приемнику может осуществляться по различным схемам. В простейшем случае она производится по двум проводам, при этом источник, провода и приемник энергии образуют замкнутую неразветвленную цепь.

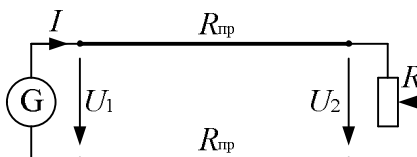


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема линии электропередачи:  
 $G$  – генератор,  $R$  – приемник,  $R_{лп}$  – провода линии электропередачи

В соответствии со вторым законом Кирхгофа напряжение  $U_1$  в начале линии выше напряжения  $U_2$  в конце ее на величину падения напряжения в проводах:

$$U_1 = U_2 + R_{лп}I,$$

где  $R_{лп} = 2R_{лп}$  – сопротивление проводов линии.

$$\text{Сопротивление приемника: } R = \frac{U_2}{I}.$$

Мощность источника:  $P_1 = U_1 I$ .

Мощность приемника:  $P_2 = U_2 I$ .

Коэффициент полезного действия линии электропередачи:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

В реальных линиях электропередачи при передаче больших мощностей (например, нескольких десятых мегаватт) КПД составляет 0,94...0,97. В таких линиях электропередачи  $R \gg R_{\text{л}}$ .

В частном случае при холостом ходе, когда  $R = \infty$  и  $I = 0$ , КПД равен 1. Это видно из выражения:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_{\text{л}}}{P_1} = \frac{U_1 I - I^2 R_{\text{л}}}{U_1 I} = 1 - \frac{I R_{\text{л}}}{U_1}.$$

Анализ выражения мощности приемника показывает, что при  $R = R_{\text{л}}$  мощность приемника максимальна при заданном напряжении генератора  $U_1$ . Однако в этом случае  $\eta = 0,5$ .

Если мощность  $P_1$  значительна, то работать с таким низким КПД как 0,5, совершенно недопустимо. Но если мощность мала, как, например, в устройствах автоматики и радиотехники, то с низким КПД можно не считаться, поскольку в этом режиме приемник имеет максимальную мощность.

В режиме короткого замыкания, когда сопротивление потребителя  $R = 0$ , ток в цепи ограничивается только сопротивлением проводов  $R_{\text{л}}$  линии передачи,  $I = \frac{U}{R_{\text{л}}}$  и достигает максимального значения.

Но напряжение на потребителе в этом случае  $U_2 = 0$ , поэтому  $\eta = 0$ .

Чем длиннее линия электропередачи, тем больше сопротивление проводов  $R_{\text{л}}$ . Для обеспечения высокого КПД длинной линии электропередачи необходимо повышать ее напряжение. Действительно, чем выше напряжение  $U_1$ , тем меньше ток, необходимый для создания требуемой мощности  $P_1 = U_1 I$ . Чем меньше ток, тем меньше мощность потерь в линии  $\Delta P_{\text{л}} = I^2 R_{\text{л}}$ .

### 3. Описание лабораторной установки

Для создания модели двухпроводной линии передачи постоянного тока предлагается использовать в качестве источника энергии ЭДС  $E_1$ , в качестве приемника – переменный резистор  $R$ . Сопротивления проводов линии передачи могут быть представлены резисторами  $R_4$  и  $R_5$ . Все элементы расположены на панели стенда (рис. 3.1).

Для измерения тока нагрузки на стенде имеется миллиамперметр на 100 или 150 мА, для измерения напряжений – вольтметр на 15 В (М 330).

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Руководствуясь разделами 2 и 3 данной работы, составить самостоятельную схему электрической цепи линии электропередачи. В схеме предусмотреть амперметр для измерения тока нагрузки и вольтметр со свободными концами для измерения напряжений на разных участках электрической цепи. Схему цепи представить для проверки преподавателю и включить в отчет. Подготовить таблицу для записи показаний приборов.

4.2. Собрать электрическую цепь. Изменяя сопротивление переменного резистора  $R$  от бесконечности до нуля, что соответствует изменению режима работы линии электропередачи от холостого хода до короткого замыкания, измерить ток  $I$ , напряжения на источнике  $U_1$  и на приемнике  $U_2$  и падение напряжения на проводах  $\Delta U_4$  и  $\Delta U_5$  (всего не менее девяти замеров). Данные измерений свести в таблицу.

4.3. По данным замеров рассчитать сопротивление проводов линии электропередачи  $R_{л}$ .

4.4. Построить на одном рисунке графики зависимостей  $U_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\eta = f(I)$ .

### 5. Контрольные вопросы и задания

1. Чему равно падение напряжения в линии?
2. Как определить потерю мощности в проводах?
3. Чему равен КПД линии электропередачи?

4. При каких условиях возможна передача максимальной мощности потребителю?
5. Почему для передачи электроэнергии на дальние расстояния используют повышенное напряжение?
6. Что означают режимы холостого хода и короткого замыкания линии передачи?
7. Почему и как изменится напряжение  $U_2$ , если при неизменном подводимом напряжении  $U_1$  увеличить количество параллельно включенных потребителей?
8. Поясните ход кривых зависимостей  $P_1 = f(I)$ ,  $P_2 = f(I)$ ,  $U_2 = f(I)$ ,  $\eta = f(I)$ .

## Лабораторная работа № 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

### 1. Цель работы

Целью работы является экспериментальная проверка справедливости принципа наложения и принципа эквивалентного генератора.

### 2. Общие сведения

Наряду со знанием основных методов расчета электрических цепей таких, как метод уравнений Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых потенциалов, полезно знание отдельных свойств электрических цепей, позволяющих в некоторых случаях упростить как расчет электрической цепи, так и экспериментальное ее исследование. Эти свойства часто именуются теоремами или принципами. К ним относятся принцип наложения, принцип компенсации, принцип взаимности, принцип эквивалентного генератора и др.

Справедливость этих принципов вытекает из анализа уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

#### *Принцип наложения*

Ток в любой ветви сложной электрической цепи равен алгебраической сумме токов, вызываемых каждой ЭДС в отдельности. Принцип наложения используется в методе расчета, получившем название метода наложения. При расчете цепей по методу наложения поступают следующим образом: поочередно рассчитывают токи от каждой ЭДС, считая все остальные ЭДС источников равными нулю, но сохраняя в схеме их внутренние сопротивления. Ток в любой ветви определяется путем алгебраического суммирования частичных токов.

#### *Принцип эквивалентного генератора*

Ток в ветви  $ab$  с сопротивлением  $R$  не изменится, если всю остальную цепь, содержащую источники ЭДС, заменить эквивалентным генератором с ЭДС, равной напряжению на зажимах  $a$  и  $b$  при разомкнутой ветви  $ab$  (при холостом ходе)  $U_{abx}$ , и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению  $R_{вх}$  цепи относительно

зажимов  $a$  и  $b$  при разомкнутой ветви  $ab$  и замкнутых накоротко источниках ЭДС.

Ток  $I$  в ветви  $ab$  в схеме цепи с эквивалентным генератором (рис. 4.1) находится из выражения

$$I = \frac{U_{abx}}{R_{вх} + R}.$$

Напряжение  $U_{abx}$  и входное сопротивление  $R_{вх}$  определяются экспериментальным или расчетным путем.

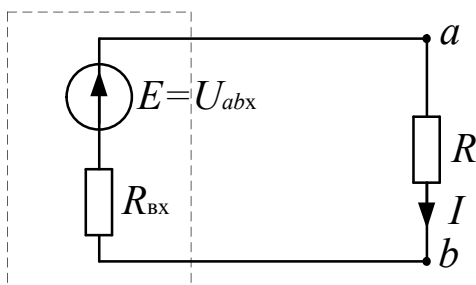


Рис. 4.1. Схема цепи с эквивалентным генератором

На принципе эквивалентного генератора основан метод расчета, получивший название метода эквивалентного генератора. Этот метод используется, когда требуется определить ток в одной ветви сложной цепи. При определении  $U_{abx}$  и  $R_{вх}$  расчетным путем ветвь  $ab$  с сопротивлением  $R$  размыкают и рассчитывают токи в изменившейся цепи. Затем выбирают контур, в который входило бы напряжение  $U_{abx}$  на месте разрыва ветви  $ab$ , и составляют уравнение по второму закону Кирхгофа. Из этого уравнения и определяют  $U_{abx}$ . Входное сопротивление цепи  $R_{вх}$  относительно зажимов  $a$  и  $b$  при разомкнутой ветви  $ab$  и замкнутых накоротко источниках ЭДС определяется, как правило, путем последовательных преобразований схемы цепи, то есть аналогично нахождению  $R_{эКВ}$ . При определении  $U_{abx}$  и  $R_{вх}$  опытным путем выполняют два опыта.

1) Опыт холостого хода. Ветвь  $ab$  размыкают и измеряют напряжение  $U_{abx}$  на зажимах  $a$  и  $b$ .

2) Опыт короткого замыкания. Сопротивление ветви  $ab$  замыкают накоротко и измеряют в этой ветви ток короткого замыкания  $I_k$ . Как видно из схемы рис. 6.1, ток  $I_k$  определяется выражением

$$I_k = \frac{U_{abx}}{R_{bx}}.$$

Откуда следует, что  $R_{bx} = \frac{U_{abx}}{I_k}$ .

### **Принцип взаимности**

Если ЭДС  $E_{ab} = E_1$ , действуя в ветви  $ab$  сколь угодно сложной цепи при отсутствии в цепи прочих ЭДС, вызывает в другой ветви  $cd$  этой цепи ток  $I_{cd} = I_1$ , то такая же ЭДС  $E_{cd} = E_1$ , действуя в ветви  $cd$  при отсутствии прочих ЭДС, вызовет в ветви  $ab$  такой же ток  $I_{ab} = I_1$ .

Принцип взаимности в сочетании с принципом наложения дает возможность существенно снизить трудоемкость расчета сложной цепи, в которой действуют одновременно несколько ЭДС, особенно в случае, когда требуется определить ток в одной ветви этой цепи.

Пусть, например, цепь имеет три ветви, в каждой из которых имеется ЭДС  $E_1, E_2, E_3$ . Исходя из принципа наложения, ток в первой ветви будет равен  $I_1 = I_1^{(1)} + I_1^{(2)} + I_1^{(3)}$ . Здесь верхний индекс в скобках показывает, под действием какой ЭДС возникает ток.

Если в цепи оставить только одну ЭДС  $E_1$ , а  $E_2$  и  $E_3$  принять равными нулю, но сохранить их внутренние сопротивления, то токи в ветвях  $I_1^{(1)}; I_2^{(1)}; I_3^{(1)}$  найдутся достаточно просто, так как в цепи действует только одна ЭДС  $E_1$ . Если эту ЭДС  $E_1$  перенести из первой ветви во вторую, то в первой ветви, согласно принципу взаимности, будет ток равный  $I_2^{(1)}$ , но в действительности во второй ветви действует ЭДС на  $E_1$ , а  $E_2$ , которая в  $\frac{E_2}{E_1}$  раз больше



ЭДС  $E_1$ , следовательно, и составляющая тока первой ветви от ЭДС  $E_2$  в  $\frac{E_2}{E_1}$  раз больше, то есть  $I_1^{(2)} = I_2^{(1)} \frac{E_2}{E_1}$ . Аналогично составляющая тока первой ветви от ЭДС  $E_3$  будет равна  $I_1^{(3)} = I_3^{(1)} \frac{E_3}{E_1}$ . Истинный ток первой ветви будет равен алгебраической сумме составляющих:

$$I_1 = I_2^{(1)} + I_1^{(2)} + I_1^{(3)} = I_1^{(1)} + I_2^{(1)} \frac{E_2}{E_1} + I_3^{(1)} \frac{E_3}{E_1}.$$

В последнем выражении составляющие тока записываются со знаком плюс, если направление ЭДС ветви совпадает с направлением тока в этой ветви при действии в цепи только ЭДС  $E_1$ . В противном случае ставят знак минус.

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования является сложная электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками ЭДС в различных ветвях (рис. 4.2). Для измерения токов необходимо использовать амперметры на 100–150 мА, для измерений напряжений – вольтметр М253 или М 330 на 15 В.

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Записать в табл. 4.1 значения сопротивлений резисторов.

Таблица 4.1

Сопротивления резисторов

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом

4.2. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 4.2). Амперметры левой (отрицательной) клеммой присоединить к узлу с.

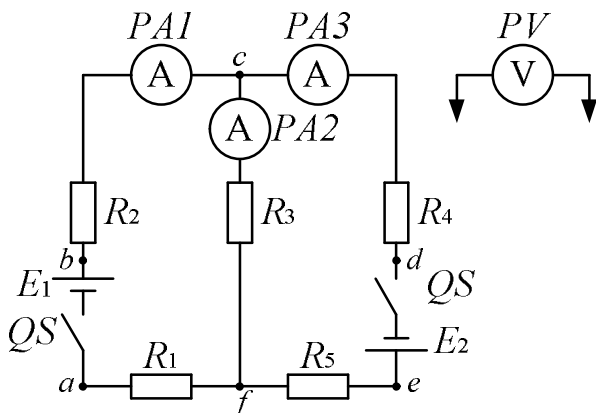


Рис. 4.2. Схема сложной цепи постоянного тока

4.3. Включить источники ЭДС, измерить вольтметром величину каждой ЭДС и записать показания амперметров с учетом знаков. При отклонении стрелки амперметра вправо ток записывается со знаком «плюс», влево – со знаком «минус».

Таблица 4.2

Значения ЭДС и токов цепи

Измерено				
$E_1$ , В	$E_2$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА

4.4. Проверка принципа наложения:

а) исключить из цепи источник ЭДС  $E_2$ , для чего перенести конец проводника с зажима  $e$  на зажим  $d$ . Включить источник ЭДС  $E_1$  и измерить токи с учетом знаков. Данные измерений занести в табл. 4.3;

б) восстановить исходную цепь с двумя источниками ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . Исключить из цепи источник ЭДС  $E_1$ , для чего перенести конец проводника с зажима  $b$  на зажим  $a$ . Включить источник ЭДС  $E_2$  и измерить токи с учетом знаков. Данные измерений занести в табл. 4.3;

в) убедиться в справедливости принципа наложения;

Таблица 4.3

Значения токов при исследовании принципа наложения

Порядок действий	Частичные токи, мА					
	Измерено			Вычислено		
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
Включена $E_1$						
Включена $E_2$						
Алгебраическая сумма частичных токов						
Записать значения токов из табл. 4.2						

г) рассчитать токи в ветвях по методу наложения и сравнить их с результатами измерений (табл. 4.3). Схемы цепей при действии каждой из ЭДС в отдельности и полный расчет токов привести в отчете.

4.5. Проверка принципа эквивалентного генератора:

а) восстановить цепь по схеме (см. рис. 4.2). Разомкнуть ветвь с резистором  $R_3$ . Измерить напряжение  $U_{cfxx}$ ;

б) восстановить исходную цепь, замкнуть накоротко резистор  $R_3$  в ветви  $cf$ . Измерить амперметром РА2 ток  $I_k$ ;

в) по результатам измерений определить:

$$R_{вх} = \frac{U_{cfxx}}{I_k};$$

г) вычислить ток в ветви  $cf$  через  $U_{cfxx}$  и  $R_{вх}$  при заданном  $R_3$  и сравнить его с результатом измерения тока  $I_2$  (табл. 4.2).

4.6. Определение параметров эквивалентного генератора расчетным путем:

а) начертить схему с разомкнутой ветвью  $cf$ ;

б) по известным ЭДС и сопротивлениям рассчитать напряжение  $U_{cfxx}$  и сравнить его с замеренной величиной;

в) определить входное сопротивление схемы  $R_{вх}$  относительно зажимов  $cf$  при замкнутых источниках ЭДС. Сравнить эту величину с  $R_{вх}$  из пункта 4.5, в;

г) рассчитать ток  $I_2$ , сравнить его величину с замеренной. Схемы цепей и расчеты привести в отчете. Результаты расчетов внести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Значения параметров цепи при исследовании принципа эквивалентного генератора

Измерено		Вычислено		
$U_{cfxx}$ , В	$I_k$ , А	$R_{вх}$ , Ом по (4.1), п. 4.5, в	$U_{cfxx}$ , В (по п. 4.6, б)	$R_{вх}$ , Ом (по п. 4.6, в)

### 5. Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите известные свойства электрических цепей.
2. Изложите сущность отдельных свойств цепи (принципов).
3. В каких случаях предпочтительнее при расчетах сложных цепей применять принцип (метод) эквивалентного генератора?
4. В каких случаях предпочтительнее при расчетах сложных цепей применять принципы (методы) взаимности и наложения?

## Лабораторная работа № 5

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

### 1. Цель работы

Целью работы является построение вольт-амперных характеристик нелинейных элементов – диода, стабилитрона и диностора по опытным данным, знакомство с возможностями их практического использования в электротехнических устройствах.

### 2. Общие сведения

Зависимость напряжения на зажимах элемента с сопротивлением от тока в нем  $u = f(i)$ , а также обратную зависимость  $i = \varphi(u)$  называют характеристиками элемента. Такие характеристики принято называть вольт-амперными характеристиками (ВАХ). Электрическое сопротивление нелинейного элемента зависит от значений или от направлений токов и напряжений на нем, и поэтому вольт-амперная характеристика нелинейного элемента имеет вид кривой.

Электрическое сопротивление линейного элемента является постоянной величиной, поэтому связь между током и напряжением на нем выражается линейным уравнением, и вольт-амперная характеристика линейного элемента есть прямая линия.

Цепи, содержащие даже один нелинейный элемент, называют нелинейными. Нелинейные цепи обладают рядом примечательных свойств, которые отсутствуют у линейных цепей. Эти свойства позволяют создать основанные на них автоматические системы управления и регулирования, устройства для преобразования электромагнитной энергии, устройства для электрических измерений и передачи информации, вычислительные машины и т. д.

Использование несимметричных нелинейных элементов, обладающих при одном направлении тока малым сопротивлением и при другом направлении тока – большим сопротивлением, дает возможность осуществить преобразование переменного тока в постоянный.

При подключении цепи с любым нелинейным элементом к синусоидальному напряжению ток будет изменяться по периодическому, но несинусоидальному закону.

### 3. Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе исследуются полупроводниковые элементы: диод, стабилитрон, динистор. Вольт-амперные характеристики этих элементов представлены на рис. 5.1.

Полупроводниковый диод обладает малым сопротивлением в проводящем направлении и большим сопротивлением при обратной полярности приложенного напряжения. Его вольт-амперная характеристика несимметрична и в том и в другом направлениях нелинейная (рис. 5.1, *a*).

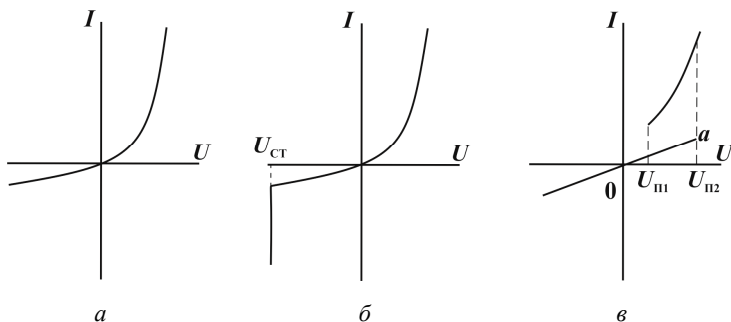


Рис. 5.1. Вольт-амперные характеристики диода (*a*), стабилитрона (*б*), динистора (*в*)

Стабилитрон – полупроводниковый диод с уменьшенной шириной  $p-n$ -перехода. В прямом направлении его вольт-амперная характеристика (рис. 5.1, *б*) подобна характеристике диода. В обратном направлении при напряжении источника, равном напряжению стабилизации  $U_{ст}$ , наступает пробой перехода. После пробоя ток возрастает, но напряжение на стабилитроне остается практически постоянным. На этом свойстве стабилитрона основано построение схем стабилизаторов напряжения на постоянном токе.

Динистор – полупроводниковый прибор с релейным характером изменения сопротивления в прямом направлении (рис. 5.1, *в*). При одной полярности приложенного напряжения и монотонном возрастании этого напряжения от нуля вольт-амперная характеристика динистора до напряжения пробоя  $U_{п1}$  подобна характеристике полупроводникового диода в непроводящем направлении. При напряжении  $U_{п1}$  наступает пробой переходов динистора,

сопротивление его резко уменьшается, и вольт-амперная характеристика подобна характеристике диода в проводящем направлении. С уменьшением напряжения этой же полярности сопротивление динистора при пороговом напряжении  $U_{п2}$  вновь резко возрастает, и его вольт-амперная характеристика возвращается на участок  $0-a$  (рис. 5.1, в). При другой полярности приложенного напряжения вольт-амперная характеристика динистора аналогична вольт-амперной характеристике полупроводникового диода в непроводящем направлении.

Нелинейные свойства рассмотренных полупроводниковых приборов эффективно используются в различных устройствах автоматики, электротехники и радиотехники.

На рис. 5.2, а приведена схема однополупериодного выпрямителя переменного тока. При отрицательном напряжении сопротивление диода очень велико по сравнению с сопротивлением приемника. Соответственно и падение напряжения на диоде будет большим, примерно равным напряжению на входе цепи, а напряжение на приемнике – ничтожно малым. При положительном напряжении сопротивление диода очень мало по отношению к сопротивлению приемника, поэтому напряжение на приемнике будет примерно равным напряжению на входе цепи.

С помощью стабилитрона можно ограничить амплитуду выпрямленного диодом напряжения, при этом стабилитрон включается параллельно приемнику согласно схеме, изображенной на рис. 5.2, б.

При возрастании в проводящий полупериод напряжения на приемнике  $u_2 = u_1 - Ri$  до значения  $U_{ст}$ , равного напряжению стабилизации стабилитрона, сопротивление стабилитрона уменьшается, последующее увеличение напряжения  $u_1$  приводит к резкому возрастанию величины тока через стабилитрон, вследствие чего возрастает общий ток  $i$ . Соответственно возрастает падение напряжения на ограничительном сопротивлении  $R$ . При этом напряжение на приемнике и равное ему напряжение на стабилитроне остается неизменным, равным  $U_{ст}$ .

Если использовать в качестве выпрямителя не диод, а динистор (рис. 5.2, в), то выпрямленное напряжение будет представлено участком полуволны, начинающейся с напряжения, равного напряжению пробоя динистора  $U_{п1}$ . При этом напряжении сопро-

тивление динистора скачком уменьшается, и динистор превращается в обычный диод.

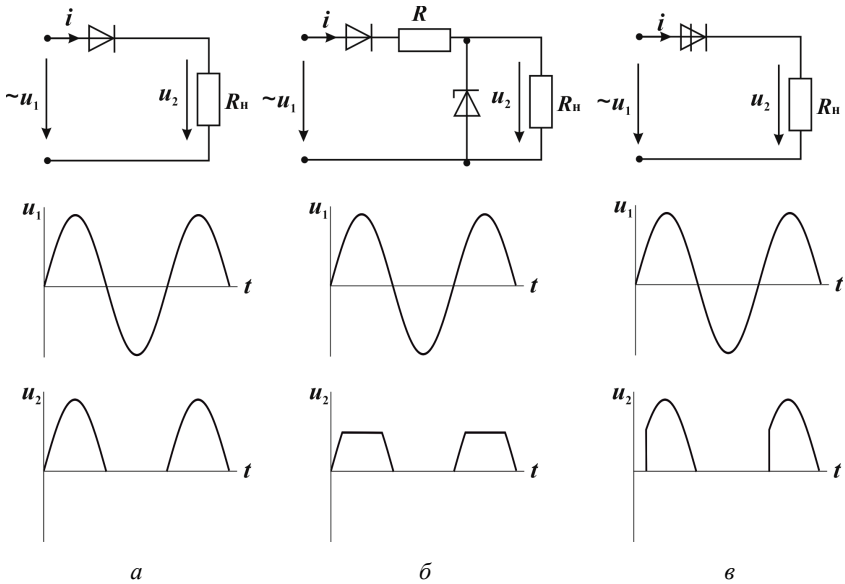


Рис. 5.2. Принципиальные схемы включения диода (а), стабилизатора (б), динистора (в) в цепь с источником синусоидального напряжения и осциллограммы напряжений на источнике (верхние) и на приемнике (нижние)

Наблюдение кривых напряжения на входе цепи и на приемнике для всех трех схем производится с помощью осциллографа.

#### 4. Программа и методика выполнения работы

##### *Исследование вольт-амперных характеристик нелинейных элементов*

4.1. Собрать цепь по схеме рис. 5.3. Снять вольт-амперную характеристику диода, изменяя ток от 0 до 100 мА в прямом направлении (10 измерений). Предел измерения вольтметра – 1,5 В. Поменять полярность напряжения на диоде и снять вольт-амперную характеристику диода в обратном направлении, изменяя напряжение от 0 до 15 В. Данные измерений занести в табл. 5.1.



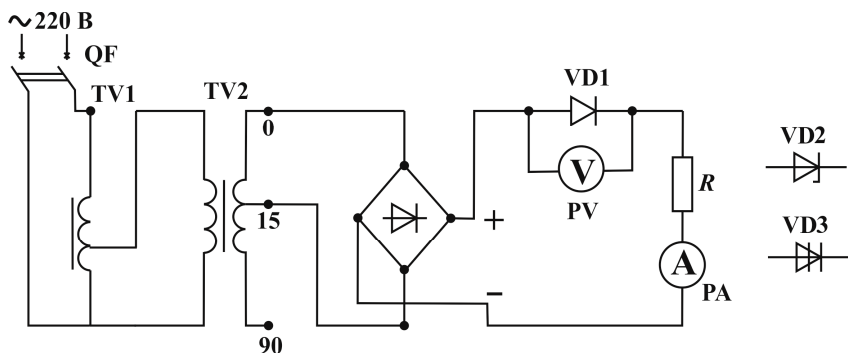


Рис. 5.3. Схема электрической цепи для снятия вольт-амперных характеристик:  
 VD1 – диод; VD2 – стабилитрон; VD3 – динострон;  
 PV – вольтметр, А 1,5; 15; 90 В; PA – амперметр 100 мА

4.2. В цепь рис. 5.3 вместо диода подключить стабилитрон VD2. Снять ВАХ стабилитрона, изменяя ток от 0 до 100 мА в прямом и обратном направлениях (10 измер.). Данные измерений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов

Наименование полупроводникового прибора	В прямом направлении			В обратном направлении		
	измерено		вычислено	измерено		вычислено
	$U$ , В	$I$ , мА	$R_{ст}$ , Ом	$U$ , В	$I$ , мА	$R_{ст}$ , Ом
Диод						

Наименование полупроводникового прибора	В прямом направлении			В обратном направлении		
	измерено		вычислено	измерено		вычислено
	$U$ , В	$I$ , мА	$R_{ст}$ , Ом	$U$ , В	$I$ , мА	$R_{ст}$ , Ом
Стабилитрон						
Динистор						

4.3. В цепь рис. 5.3 вместо диода подключить динистор VD3 и в трансформаторе TV2 вместо клемм 0; 15 использовать клеммы 0; 90. Снять ВАХ динистора, изменяя напряжение от 0 до 75 вольт в прямом и обратном направлениях.

При снятии характеристики в прямом направлении и постепенном увеличении напряжения будет наблюдаться скачок тока (пробой динистора) – переход на новую характеристику. При снижении напряжения также будет наблюдаться скачок тока, поэтому данные приборов необходимо записывать как при увеличении напряжения от 0 до 75 В, так и при дальнейшем снижении его от 75 до 0 В. Данные измерений занести в табл. 5.1. Характеристика при обратном направлении напряжения снимается обычным путем.

4.4. По данным пунктов 4.1, 4.2, 4.3 построить вольт-амперные характеристики и рассчитать статические сопротивления  $R_{ст}$  диода, стабилитрона и динистора.

### ***Исследование нелинейной цепи с источником синусоидального напряжения***

4.5. Собрать цепь по схеме рис. 5.4.

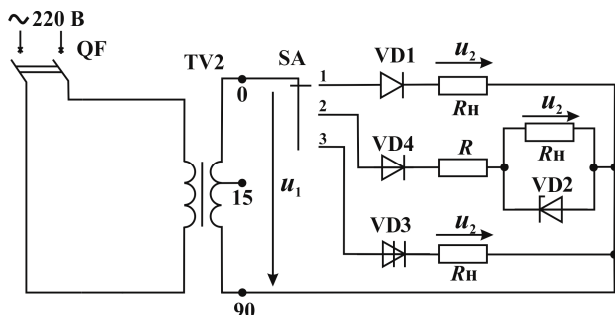


Рис. 5.4. Схема электрической цепи для исследования кривых напряжений в цепи с полупроводниковыми элементами

4.6. Включить осциллограф под напряжение и на вход осциллографа подключить сначала напряжение на входе цепи  $u_1$ , затем напряжение на приемнике  $u_2$  для цепи с диодом, при этом трехпозиционный переключатель SA должен быть в положении 1. Зарисовать с экрана осциллографа кривые напряжений  $u_1$  и  $u_2$ .

4.7. Аналогично пункту 5.2 зарисовать с экрана осциллографа кривые напряжений на входе цепи  $u_1$  и на приемнике  $u_2$  для цепей со стабилитроном и с динистором (трехпозиционный переключатель – в положениях 2 и 3).

4.8. По данным пунктов 5.2 и 5.3 привести схемы цепей с использованием полупроводниковых приборов (рис. 5.2, а, б, в) и кривые напряжений на входе цепи  $u_1$  и на приемнике  $u_2$ .

## **5. Методические указания к обработке результатов эксперимента**

5.1. Статическое сопротивление  $R_{ст}$  находится как частное от деления напряжения на ток.

5.2. Для построения ВАХ полупроводниковых приборов рекомендуемый масштаб по оси тока  $m_I = 10$  мА/см. По оси напряжений как для положительных, так и для отрицательных значений напряжения для диода и стабилитрона  $m_U = 1$  В/см, для динистора  $m_U = 10$  В/см.

## 6. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение нелинейной цепи.
2. Что такое вольт-амперная характеристика?
3. Как определяются статическое сопротивление и дифференциальное сопротивление?
4. Что такое нелинейный элемент?
5. Почему вольт-амперная характеристика нелинейного элемента имеет вид кривой?
6. Какую вольт-амперную характеристику имеют линейные элементы и почему?
7. Охарактеризуйте нелинейные полупроводниковые элементы: диод, стабилитрон, динистор. Опишите использование этих элементов в электротехнических устройствах.

## Лабораторная работа № 6

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное и графическое определение вольт-амперной характеристики нелинейной цепи.

### 2. Общие сведения

Расчет нелинейной цепи основывается на законах Кирхгофа. Графический расчет нелинейной цепи постоянного тока производится с помощью вольт-амперных характеристик (ВАХ) цепи. Вольт-амперная характеристика цепи, представляющая собой зависимость тока от напряжения на входе цепи, как правило, определяется графически.

#### 2.1. Расчет неразветвленной цепи.

Рассмотрим цепь (рис. 6.1), состоящую из двух последовательно соединенных нелинейных элементов, вольт-амперные характеристики которых  $I = f_1(U_1)$  и  $I = f_2(U_2)$  даны (рис. 6.2). Требуется по известному напряжению на входе цепи  $U$  определить значение тока  $I$  и напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

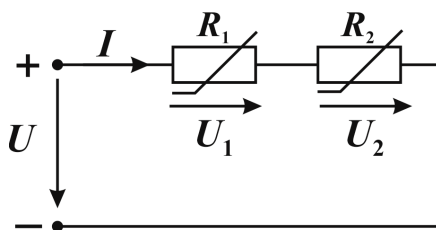


Рис. 6.1. Последовательное соединение нелинейных элементов

Для решения задачи строится вспомогательная (результующая) вольт-амперная характеристика всей цепи  $I = f(U)$ . Так как по нелинейным элементам идет один и тот же ток, а напряжение  $U = U_1 + U_2$ , согласно второму закону Кирхгофа, то результирующую характеристику  $I = f(U)$  строят путем суммирования абсцисс

вольт-амперных характеристик  $I = f_1(U_1)$  и  $I = f_2(U_2)$ . Построение результирующей характеристики  $I = f(U)$  позволяет заменить цепь с последовательным соединением нелинейных элементов цепью с одним эквивалентным нелинейным элементом.

С помощью характеристики  $I = f(U)$  (рис. 6.2) по заданному значению напряжения находят значение тока  $I$  и затем значения напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  по соответствующим характеристикам  $I = f_1(U_1)$  и  $I = f_2(U_2)$ .

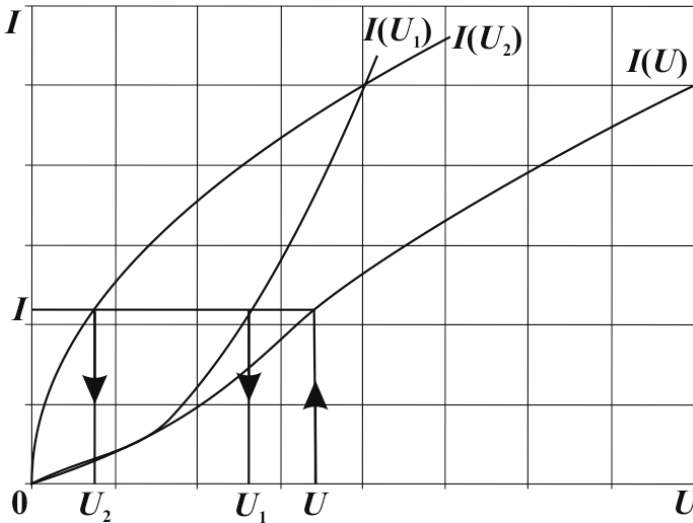


Рис. 6.2. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при последовательном соединении

## 2.2. Расчет разветвленной цепи.

Рассмотрим цепь, состоящую из двух параллельно соединенных нелинейных элементов (рис. 6.3), вольт-амперные характеристики которых  $I_1 = f_1(U)$  и  $I_2 = f_2(U)$  заданы (рис. 6.4). Построим вольт-амперную характеристику всей цепи  $I = f(U)$ . Так как напряжения на входе цепи и на каждом нелинейном элементе одинаковые, а общий ток согласно первому закону Кирхгофа  $I = I_1 + I_2$ , то результирующую вольт-амперную характеристику  $I = f(U)$  строят путем суммирования ординат вольт-амперных характеристик  $I_1 = f_1(U)$  и  $I_2 = f_2(U)$ .

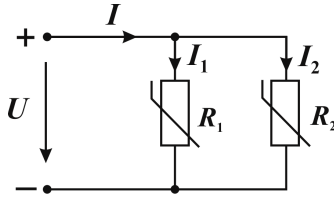


Рис. 6.3. Параллельное соединение нелинейных элементов

Построенная результирующая характеристика  $I = f(U)$  позволяет заменить цепь с параллельным соединением нелинейных элементов цепью с одним эквивалентным нелинейным элементом. Если напряжение задано, то токи  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  находят с помощью соответствующих вольт-амперных характеристик  $I = f(U)$ ,  $I_1 = f_1(U)$ ,  $I_2 = f_2(U)$ .

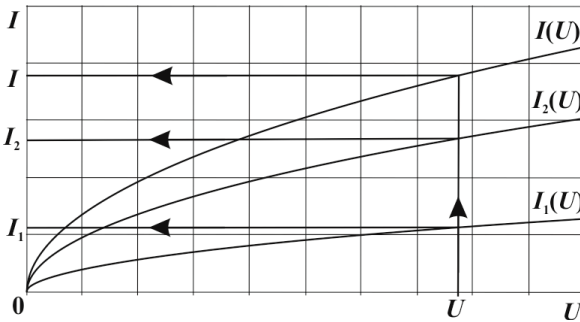


Рис. 6.4. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при параллельном соединении

Если требуется рассчитать сложную цепь, то, производя последовательно преобразования участков цепи с параллельным или последовательным соединением нелинейных элементов, строят результирующую вольт-амперную характеристику всей цепи и с помощью ее и промежуточных вольт-амперных характеристик находят все токи и напряжения.

### 3. Описание лабораторной установки

В данной работе используются три элемента цепи: 1, 2 – нелинейные резистивные элементы и 3 – резистор  $R$  с линейной ВАХ.

Схема электрической цепи для снятия вольт-амперных характеристик элементов, а также для снятия вольт-амперных характеристик цепей, составленных из этих элементов, представлена на рис. 6.5.

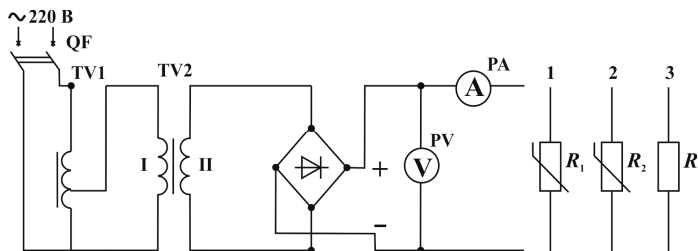


Рис. 6.5. Электрическая схема для исследования нелинейных цепей:  
PA – амперметр 100 мА; PV – вольтметр, А 30 В

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать цепь по схеме рис. 6.5.

4.2. Снять вольт-амперные характеристики первого и второго нелинейного элементов и линейного сопротивления  $R$ . Показания снимать через 10 мА от 0 до 100 мА. Данные измерений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Вольт-амперные характеристики элементов цепи

Нелинейный элемент № 1		Нелинейный элемент № 2		$R$	
$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$



4.3. Снять результирующую вольт-амперную характеристику цепи, содержащей нелинейные элементы 1 и 2, соединенные последовательно. Измерения производить с интервалом по току 10 мА. Данные измерений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Вольт-амперные характеристики нелинейных цепей

Последовательное соединение		Параллельное соединение		Смешанное соединение	
$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$

4.4. Снять результирующую ВАХ цепи, содержащей нелинейные элементы 1 и 2, соединенные параллельно. Измерения производить с интервалом по току 10 мА. Данные измерений занести в табл. 6.2.

4.5. Снять результирующую вольт-амперную характеристику цепи при смешанном соединении элементов 1, 2, 3, при этом нелинейные элементы 1 и 2 должны быть соединены параллельно. Измерения производить с интервалом по току 10 мА. Данные измерений занести в табл. 6.2.

4.6. Для цепи с последовательным соединением нелинейных элементов 1 и 2 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики этих элементов и результирующие вольт-амперные характеристики этой цепи, полученные опытным путем и графическим способом. Рядом нарисовать схему цепи с последовательным соединением нелинейных элементов.

4.7. Для цепи с параллельным соединением нелинейных элементов 1 и 2 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики

этих элементов и результирующие вольт-амперные характеристики этой цепи, полученные опытным путем и графическим способом. Рядом нарисовать схему цепи с параллельным соединением нелинейных элементов.

4.8. Для цепи со смешанным соединением элементов 1, 2, 3 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики элементов 1, 2, 3 и результирующие вольт-амперные характеристики этой цепи, полученные опытным путем и графическим способом. Рекомендуется графики выполнять разным цветом. Рядом нарисовать схему цепи, указав на ней токи и напряжения. Вольт-амперным характеристикам цепи дать соответствующие обозначения.

## **5. Контрольные вопросы**

1. Какая цепь называется нелинейной?
2. На основании каких законов выполняют графическое построение результирующих ВАХ нелинейных электрических цепей?
3. Как графическим способом строят результирующие вольт-амперные характеристики последовательно и параллельно соединенных нелинейных элементов?
4. Как строят вольт-амперную характеристику линейного резистора?
5. Как графически определить все токи при смешанном соединении нелинейных элементов, если напряжение на входе цепи известно?

# Модуль 3. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ

#### 1. Цель работы

Цель работы – экспериментальная проверка 2-го закона Кирхгофа в цепи переменного тока. Построение векторных диаграмм. Определение сопротивлений элементов по экспериментальным данным.

#### 2. Общие сведения

Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников в общем случае содержит резистивный ( $R$ ), индуктивный ( $L$ ) и емкостный ( $C$ ) элементы (рис. 7.1).

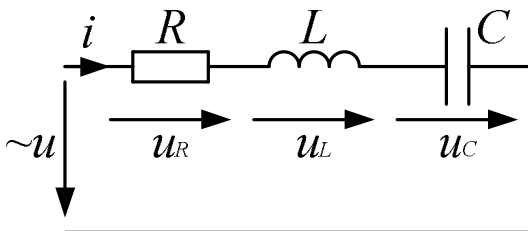


Рис. 7.1. Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников

Дифференциальное уравнение цепи с последовательным соединением элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , составленное по второму закону Кирхгофа, имеет вид

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt ,$$

где  $u_R$  – напряжение на резистивном элементе;  
 $u_L$  – напряжение на индуктивном элементе;  
 $u_C$  – напряжение на емкостном элементе.

Если ток в цепи синусоидальный  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на резистивном элементе  $u_R = RI_m \sin \omega t$  совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивном элементе  $u_L = \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ)$  опережает по фазе ток на  $90^\circ$ , напряжение на емкостном элементе

$u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$  отстает по фазе от тока на  $90^\circ$ . Таким образом, мгновенное значение напряжения на входе цепи равно

$$u = RI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Сумме синусоидальных напряжений соответствует сумма изображающих их векторов или сумма комплексных действующих напряжений.

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \quad \text{или} \quad \dot{U} = R\dot{I} + j\omega L\dot{I} - j\frac{1}{\omega C}\dot{I}.$$

Это соотношение представляет собой уравнение цепи (рис. 7.1), составленное по второму закону Кирхгофа в комплексной форме. В этом уравнении

$$\dot{U}_R = R\dot{I}; \quad \dot{U}_L = j\omega L\dot{I};$$

$$\dot{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I}.$$

Из этого уравнения легко получается закон Ома в комплексной форме. Выражение, стоящее в знаменателе, есть комплексное сопротивление  $\underline{Z}$  цепи с последовательным соединением элементов  $R, L, C$ .

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad \text{или} \quad \underline{Z} = R + j(X_L - X_C),$$

где  $R$  – активное сопротивление;

$X = X_L - X_C$  – реактивное сопротивление;

$X_L = \omega L$  – индуктивное сопротивление;

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

Комплексные величины в законе Ома могут быть записаны в показательной форме

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}, \quad \dot{U} = U e^{j\psi_u},$$

$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} e^{j\varphi},$$

где  $\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \arctg \frac{X}{R}$ ,

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

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

Два комплексных числа равны друг другу, если равны их модули и равны их аргументы

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

Полученное выражение  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$  устанавливает

связь между действующими током и напряжением.

Выражение в знаменателе называется полным сопротивлением  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ ;  $I = \frac{U}{Z}$ , откуда  $Z = \frac{U}{I}$ .

Если известны действующие напряжения  $U_R, U_L, U_C$ , то

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad \omega L = \frac{U_L}{I}; \quad \frac{1}{\omega C} = \frac{U_C}{I}.$$

Из выражения связи между действующим током и напряжением следует

$$U^2 = R^2 I^2 + (\omega L I - \frac{1}{\omega C} I)^2,$$

откуда

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

Построение векторной диаграммы тока и напряжений цепи с последовательным соединением приемников начинают с построения на комплексной плоскости вектора тока  $\dot{I}$ . Вектор напряжения  $\dot{U}_R = R\dot{I}$  совпадает с направлением вектора тока  $\dot{I}$ , вектор напряжения  $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I} = \omega L\dot{I}e^{j90^\circ}$  повернут относительно вектора  $\dot{I}$  против направления движения часовой стрелки на  $90^\circ$ , вектор напряжения  $\dot{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I} = \frac{1}{\omega C}\dot{I}e^{-j90^\circ}$  повернут относительно вектора  $\dot{I}$  по направлению движения часовой стрелки на  $90^\circ$ . На векторной диаграмме (рис. 7.2) начальная фаза тока  $\psi_i$  принята равной нулю, и вектор тока  $\dot{I}$  сонаправлен с действительной осью комплексной плоскости:  $\dot{I} = I$ . Тогда  $\dot{U}_R = U_R$ ,  $\dot{U}_C = -jU_C$ .

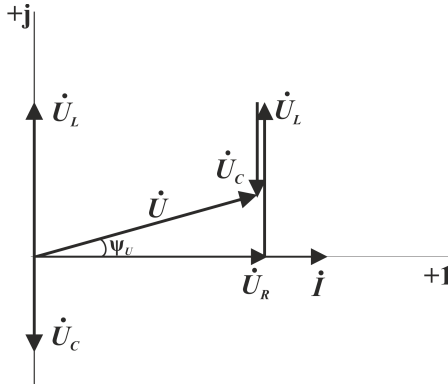


Рис. 7.2. Векторная диаграмма напряжений

Сложив векторы  $\dot{U}_R$ ,  $\dot{U}_L$ , и  $\dot{U}_C$ , получим вектор  $\dot{U}$ . Его длина определяет действующее напряжение  $U$ , а положение относительно координатных осей – начальную фазу  $\psi_u$ . В данном случае  $\psi_u = \varphi$ , поскольку  $\psi_i = 0$ .

### 3. Описание лабораторной установки

Для исследования цепей переменного тока на лабораторном стенде имеется набор резисторов  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ , две индуктивные катушки  $L1$  и  $L2$ , одна  $L1$  с зажимами 1–2 и вторая  $L2$  с зажимами 3–4, и батарея конденсаторов  $C$  со ступенчатым регулированием емкости. Для плавного регулирования напряжения имеется лабораторный автотрансформатор.

Зажимы этих элементов выведены на лицевую сторону панели стенда (рис. 7.3).

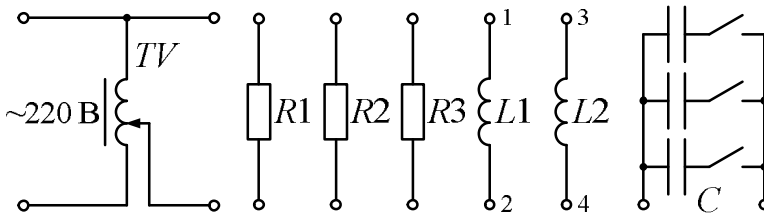


Рис. 7.3. Элементы лабораторного стенда

Для измерения синусоидальных токов на стенде имеются амперметры с пределами измерений 1–2 А.

Для измерения напряжений следует воспользоваться двумя вольтметрами. Один с пределом измерения до 250 В, как правило, используется для измерения напряжения источника питания, и второй, многопредельный, на 75–600 В – для измерения напряжения на элементах цепи.

В данной лабораторной работе неразветвленная цепь собирается из следующих элементов: резисторов  $R1$  и  $R2$ , индуктивных катушек  $L1$  и  $L2$  и батареи конденсаторов  $C$  емкостью 60 мкФ. Два или более из перечисленных элементов соединяются последовательно (рис. 7.4). Лабораторный автотрансформатор  $TV$  предназначен для плавного регулирования напряжения.

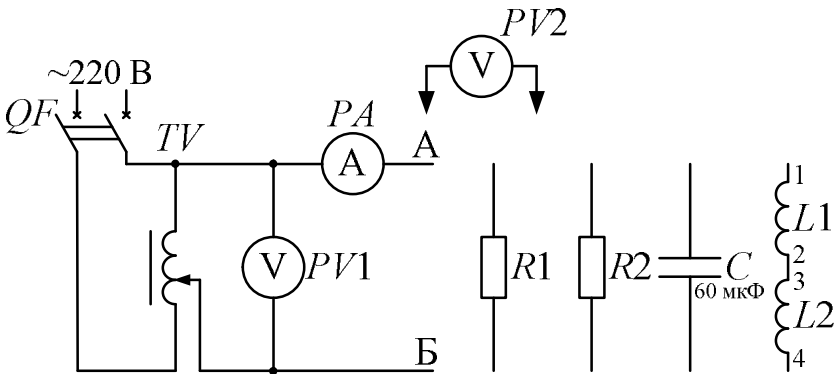


Рис. 7.4. Схема электрической цепи с последовательным соединением приемников: PV1 – вольтметр, А 250 В; PV2 – вольтметр, А 600 В; PA – амперметр 2 А

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 4.4, подключив к зажимам АБ последовательно соединенные резисторы  $R1$  и  $R2$ . Установить напряжение на входе цепи такое, чтобы ток в цепи равнялся  $I = 1$  А, произвести измерения и данные занести в табл. 7.1. Аналогично провести измерения в цепях с другими последовательно соединенными элементами, согласно табл. 7.1.



Таблица 7.1

## Ток и напряжения цепи

Элементы, составляющие цепь	Измерено						
	$I, A$	$U, B$	$U_{R1}, B$	$U_{R2}, B$	$U_{L1}, B$	$U_{L2}, B$	$U_C, B$
$R1, R2$							
$R1, C$							
$L1, L2$							
$L1, L2, R1$							
$L1, L2, C$							

4.2. По данным измерений вычислить сопротивления элементов, входящих в цепь. Значения сопротивлений занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

## Значения сопротивлений элементов цепи

$R1, Ом$	$R2, Ом$	$X_{L1}, Ом$	$X_{L2}, Ом$	$X_C, Ом$

4.3. По значениям сопротивлений элементов в цепи определить активное, реактивное, комплексное и полное сопротивления цепи. Сравнить последнее со значением полного сопротивления, найденного по формуле  $Z = \frac{U}{I}$ .

Приняв начальную фазу тока  $i$  равной нулю  $\psi_i = 0$ ,  $\dot{I} = I$ , записать измеренные напряжения на элементах цепи в комплексной форме. По этим напряжениям определить комплексное напряжение на входе цепи, основываясь на втором законе Кирхгофа  $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$ . Найти модуль комплексного напряжения  $U$ , сравнить его с измеренным и убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа. Данные занести в соответствующую строку табл. 7.3.

Расчетные значения напряжений и сопротивлений

№	$R$ , Ом	$X$ , Ом	$Z$ , Ом	$Z$ , Ом	$Z = U / I$ , Ом	$\dot{U}_{R1}$ , В	$\dot{U}_{R2}$ , В	$\dot{U}_{L1}$ , В	$\dot{U}_{L2}$ , В	$\dot{U}_C$ , В	$\dot{U}$ , В	$U$ , В
1												
2												
3												
4												
5												

4.4. Построить векторные диаграммы для каждого пункта табл. 7.1. На векторных диаграммах указать угол  $\phi$ .

### 5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При построении векторных диаграмм по п. 4.4 рабочего задания за исходный вектор следует принять вектор тока  $\dot{I}$  и направить его по горизонтальной оси. Векторы напряжений проводятся в масштабе  $m_U = 20$  В/см. Вектор  $\dot{U}_R$  совпадает по направлению с вектором тока  $\dot{I}$ , вектор  $\dot{U}_C$  отстает от вектора тока (повернут по часовой стрелке) на угол  $90^\circ$ , и вектор напряжения  $\dot{U}_L$  опережает вектор тока  $\dot{I}$  (повернут против часовой стрелки) на угол  $90^\circ$ .

Вектор общего напряжения  $\dot{U}$  находится в результате суммирования векторов в соответствии с уравнением Кирхгофа:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Длина вектора  $\dot{U}$  определяет значение действующего напряжения на входе цепи  $U$ . Угол между векторами  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$  есть угол  $\phi$ .

### 6. Контрольные вопросы и задания

1. Какова связь между мгновенными значениями тока и напряжения на активном сопротивлении  $R$ , на индуктивности  $L$ , на емкости  $C$ ?

2. Каков сдвиг фаз напряжения и тока на активном сопротивлении  $R$ , на индуктивности  $L$ , на емкости  $C$ ? Сформулируйте и запишите второй закон Кирхгофа в комплексной форме.

3. Запишите закон Ома в комплексной форме и соотношение между действующими значениями напряжения и тока.

4. Запишите выражение комплексного сопротивления и полного сопротивления.

5. Чему равны реактивное, емкостное и индуктивное сопротивления?

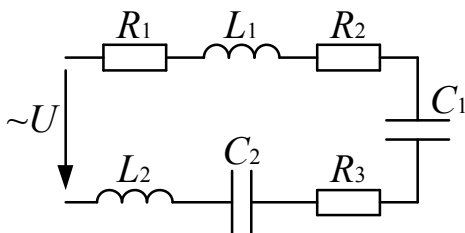
6. Как рассчитывается угол?

7. В каких пределах может изменяться угол  $\varphi$  электрической цепи? Что означает  $\varphi > 0$  и  $\varphi < 0$ ?

8. Объясните построение векторных диаграмм в вашей работе.

9. Дано:  $U = 100$  В;  $f = 50$  Гц;  $R_1 = 2$  Ом;  $R_2 = 1$  Ом;  $R_3 = 3$  Ом;  $L_1 = 15,9$  мГн;  $L_2 = 31,8$  мГн;  $C_1 = 636$  мкФ;  $C_2 = 1590$  мкФ.

Определить величины  $\underline{Z}$ ,  $Z$ ,  $I$ ,  $\varphi$ ; построить векторную диаграмму тока и напряжений для электрической цепи, представленной на нижеследующей схеме.



## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

#### 1. Цель работы

Целью работы является экспериментальная проверка законов Кирхгофа в разветвленной цепи переменного тока. Построение векторных диаграмм. Определение сопротивлений по экспериментальным данным.

#### 2. Общие сведения

**Цепь с параллельным соединением приемников.** При параллельном соединении приемников напряжение на каждом из них одно и то же, поскольку они подключены к одним и тем же двум узлам. Пусть сопротивления приемников равны

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L; \quad \underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C}.$$

При анализе цепей с параллельным соединением приемников удобно пользоваться комплексными проводимостями. Комплексная проводимость есть величина обратная комплексному сопротивлению.

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad \text{или} \quad \underline{Y} = \frac{1}{Ze^{j\psi}} = Ye^{-j\varphi} = Y \cos \varphi - j \sin \varphi = g - jb,$$

где  $g$  – активная проводимость;  
 $b$  – реактивная проводимость;  
 $Y$  – полная проводимость.

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}; \quad \cos \varphi = \frac{g}{Y}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{Y}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}.$$

Закон Ома при использовании проводимости имеет вид:

$$\dot{I} = \underline{Y}\dot{U} \quad \text{или} \quad I = (g - jb)\dot{U}.$$

Для цепи, представленной на рис. 8.1,

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + j\omega L} = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = g_1 - jb_1.$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R_2 + j \frac{1}{\omega C}} = \frac{R_2}{R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} + j \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} = g_2 + jb_2.$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \quad \underline{Y}\dot{U} = \underline{Y}_1\dot{U} + \underline{Y}_2\dot{U}.$$

Откуда общая комплексная проводимость цепи с параллельным соединением приемников

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2; \quad \underline{Y} = (g_1 + g_2) - j(b_L - b_C) = g - jb,$$

где  $g = g_1 + g_2$ ;  $b = b_L - b_C$ .

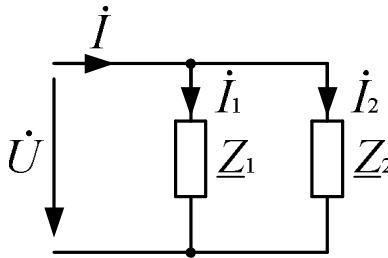


Рис. 8.1. Параллельное соединение приемников

Общее комплексное сопротивление цепи  $\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}}$ . В частном случае, когда цепь состоит из двух параллельно соединенных приемников

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

Для проверки первого закона Кирхгофа по экспериментальным данным необходимо иметь комплексные выражения напряжения и токов.

Если начальная фаза напряжения не задана, то, как правило, она принимается равной нулю  $\psi_u = 0$ , тогда  $\dot{U} = U$  и вектор напряжения  $\dot{U}$  совпадает с направлением вещественной оси комплексной плоскости. Для записи токов ветвей в комплексной форме определяют вначале разность фаз напряжения и тока каждой ветви  $\varphi$ :

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_1}{R_1} = \arctg \frac{X_L}{R_1}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2} = \arctg \frac{-X_C}{R_2}.$$

Угол  $\varphi_2$  будет отрицательным. Затем определяют начальную фазу тока  $\psi_{i1} = \psi_u - \varphi_1 = -\varphi_1$ ;  $\psi_{i2} = \psi_u - \varphi_2 = -\varphi_2$ .

Токи в комплексной форме имеют вид:

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{-j\varphi_1}, \quad \dot{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2} \quad - \text{показательная форма записи}$$

или

$$\dot{I}_1 = I_1' - jI_1''; \quad \dot{I}_2 = I_2' - jI_2'' \quad - \text{алгебраическая форма записи.}$$

В последних выражениях

$$I_1' = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_1'' = I_1 \sin \varphi_1; \quad I_2' = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_2'' = I_2 \sin \varphi_2.$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (I'_1 + I'_2) - j(I''_1 + I''_2) = I' + jI''.$$

Действующее значение  $I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}$ . Ток  $\dot{I}$  может быть определен с помощью векторной диаграммы цепи.

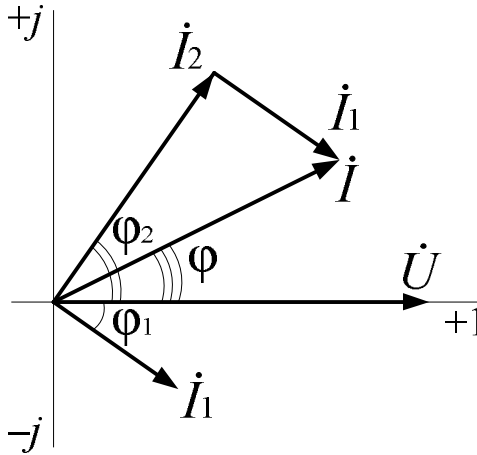


Рис. 8.2. Векторная диаграмма напряжения и токов

Построив векторы токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  и затем сложив их, получим вектор тока  $\dot{I}$ . Длина вектора  $\dot{I}$  есть действующий ток. На векторной диаграмме вектор тока  $\dot{I}_1$  сдвинут относительно вектора напряжения  $\dot{U}$  по часовой стрелке (отстает), так как угол  $\varphi_1$  положительный, а вектор тока  $\dot{I}_2$  сдвинут относительно вектора напряжения  $\dot{U}$  против часовой стрелки (опережает), так как угол  $\varphi_2$  отрицательный.

**Цепь со смешанным соединением приемников.** Токи в цепи со смешанным соединением приемников рассчитываются путем преобразования схемы. Заменим параллельно соединенные приемники одним эквивалентным с проводимостью  $\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3$  или

с сопротивлением  $\underline{Z}_{23} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3}}$ . После этого преобразования схема состоит из двух последовательно соединенных участков с сопротивлениями  $\underline{Z}_1$  и  $\underline{Z}_{23}$ . Общее сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23}; \quad \underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

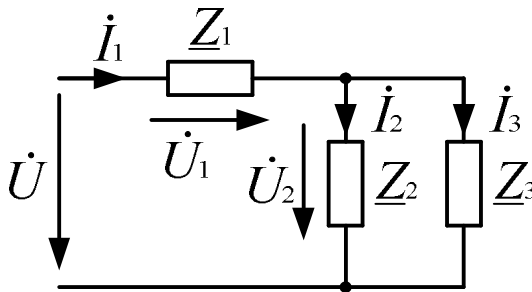


Рис. 8.3. Цепь со смешанным соединением приемников

Зная общее сопротивление, находим ток на входе  $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}$ . Затем найдем напряжение  $\dot{U}_2$  из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа  $0 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 - \dot{U}$ ;  $\dot{U}_2 = \dot{U} - \dot{U}_1 = \dot{U} - \underline{Z}_1 \dot{I}_1$ . Зная напряжение  $\dot{U}_2$ , находим токи ветвей  $\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_2}$ ;  $\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_3}$ . Векторная диаграмма строится по комплексным значениям токов и напряжений.

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служат цепи с параллельным соединением приемников (рис. 8.4, б, в) и цепи со смешанным соединением приемников (рис. 8.4, г, д).



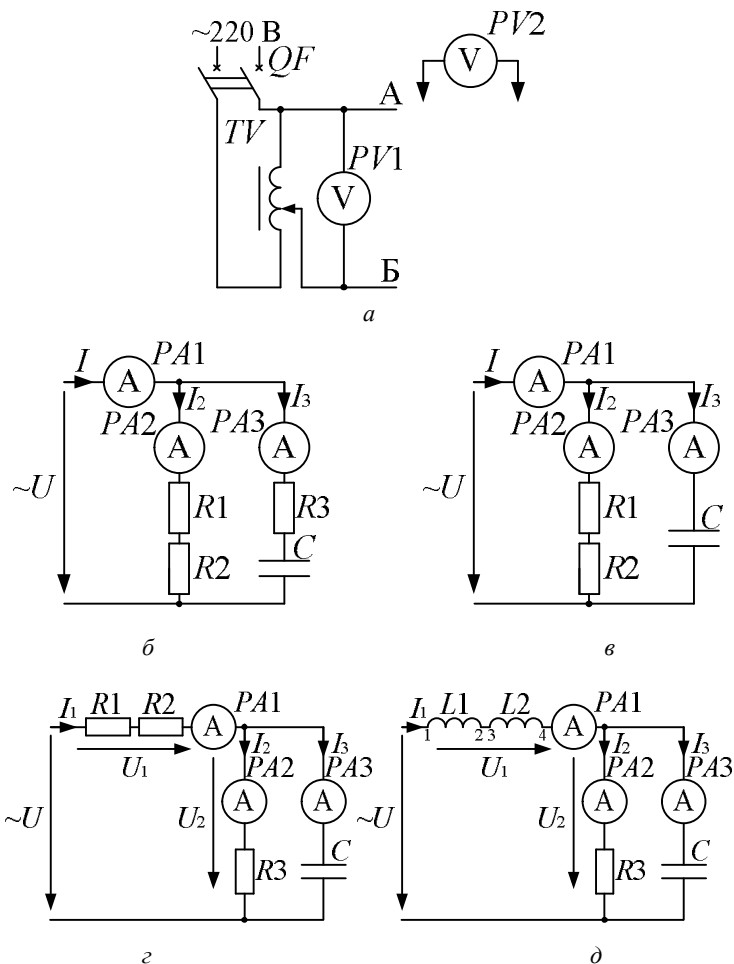


Рис. 8.4. Схемы электрических цепей с параллельным (б, в) и со смешанным (г, д) соединением приемников; а – схема подключения цепей к источнику напряжения:  
 PA1, PA2, PA3 – амперметры 2 А; PV1 – вольтметр, А 250 В; PV2 – вольтметр, А 150 В

Каждая из этих цепей поочередно подключается к зажимам «А» и «Б» (рис. 8.4, а). Емкость конденсатора  $C$  для каждой схемы равна 60 мкФ. Лабораторный автотрансформатор  $TV$  предназначен для регулирования напряжения на входе цепи.

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением приемников по схеме (см. рис. 8.4, а, б).

Установить напряжение на входе цепи  $U = 60$  В. Произвести измерения и данные занести в табл. 8.1.

4.2. В схеме цепи (см. рис. 8.4, б) исключить резистор  $R_3$ , оставив во второй ветви только конденсатор  $C$  (см. рис. 8.4, в), произвести измерения и данные занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Напряжения и токи на элементах цепи  
с параллельным соединением приемников

Схема	Измерено							
	$U$ , В	$U_{R1}$ , В	$U_{R2}$ , В	$U_{R3}$ , В	$U_C$ , В	$I$ , А	$I_1$ , А	$I_2$ , А
а								
б								

4.3. По экспериментальным данным вычислить сопротивления элементов, входящих в цепь, и по ним определить  $Z_1$ ;  $Z_2$ ;  $Z$ ;  $Z$ . Сравнить полное сопротивление  $Z$  со значением полного сопротивления, полученного по формуле  $Z = \frac{U}{I}$ .

Приняв начальную фазу напряжения  $u$  равной нулю  $\psi_u = 0$ , записать измеренные токи  $I_1$  и  $I_2$  в комплексной форме

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{-j\varphi_1}; \quad \dot{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2}.$$

Записав комплексные токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  в алгебраической форме, определить комплекс тока  $\dot{I}$ , основываясь на первом законе Кирхгофа  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ . Найти модуль комплекса тока  $I$ , сравнить его с замеренным и убедиться в справедливости первого закона Кирхгофа.

Данные вычислений занести в табл. 8.2. Проведенные расчеты привести в отчете.

Таблица 8.2

Расчетные значения сопротивлений и токов цепи  
с параллельным соединением приемников

Схема	$Z_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z = U / I,$ Ом	$i_1,$ А	$i_2,$ А	$i,$ А	$I,$ А
<i>a</i>									
<i>б</i>									

4.4. Построить векторную диаграмму токов и напряжения цепи с параллельным соединением приемников для обеих схем.

4.5. Собрать цепь со смешанным соединением приемников (рис. 8.4, *a*, *з*). Установить напряжение на входе цепи  $U = 150$  В. Произвести измерения и данные занести в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Токи, напряжения и сопротивления цепи  
при смешанном соединении приемников

Схема	Измерено						Вычислено					
	$U,$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$Z_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$Z_3,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z = U / I_1,$ Ом
<i>в</i>												
<i>з</i>												

4.6. В схеме цепи рис. 8.4, *з* два последовательно соединенные резистора  $R1$  и  $R2$  заменить двумя последовательно соединенными индуктивными катушками  $L1$  и  $L2$  (рис. 8.4, *д*). Произвести измерения и данные занести в табл. 8.3.

4.7. По экспериментальным данным найти  $Z_1$ ;  $Z_2$ ;  $Z_3$ ;  $Z$  и  $Z$ . Сравнить полное сопротивление со значением полного сопротивления, полученного их выражения  $Z = \frac{U}{I}$ . Совпадение обоих значений

означает, что в данной цепи выполняются оба закона Кирхгофа, поскольку расчетное значение полного сопротивления было найдено на основании именно этих законов.

4.8. Построить векторную диаграмму токов и напряжений цепи со смешанным соединением приемников для обеих схем. Рекомендуется

принять начальную фазу напряжения  $\dot{U}_2$  равной нулю  $\psi_{u2} = 0$ , тогда  $\dot{U}_2 = U_2$  и вектор  $\dot{U}_2$  совпадает по направлению с действительной осью комплексной плоскости. Затем строят векторы токов  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  под углом  $-\varphi_2$  и  $-\varphi_3$ . По ним находят вектор  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ . После этого строят вектор напряжения  $\dot{U}_1$ . Он будет сдвинут относительно вектора  $\dot{I}_1$  на угол  $\varphi_1$ . Сложив векторы  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ , получим вектор напряжения  $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$ .

Рассматриваемые цепи представлены элементами  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , поэтому угол сдвига фаз напряжения и тока каждой ветви находится легко: для элемента  $L$   $\varphi = 90^\circ$  и для элемента  $C$   $\varphi = -90^\circ$ .

Рекомендуемый масштаб напряжения  $m_U = 20$  В/см, масштаб тока  $m_I = 0,4$  А/см.

## 5. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение комплексной проводимости.
2. По заданному комплексному сопротивлению, комплексной проводимости постройте прямоугольные треугольники полного сопротивления и полной проводимости.
3. Как определяется угол сдвига фаз?
4. Чему равен угол сдвига фаз на элементах  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ?
5. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для схемы на рис. 8.4, б; рис. 8.4, г.

## Лабораторная работа № 9

### ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Целью работы является изучение схем измерения и методов расчета активной, реактивной и полной мощностей и параметров приемника в цепи синусоидального тока.

#### 2. Общие сведения

Пусть напряжение, приложенное к зажимам цепи, и ток в этой цепи выражаются соответственно уравнениями.

Мгновенная мощность  $p$ , получаемая приемником цепи, находится как произведение мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui.$$

Активная мощность  $P$  есть среднее значение мгновенной мощности за период  $T$ :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt .$$

Подставляя выражение мгновенной мощности  $p$ , получим формулу активной мощности синусоидального тока:

$$P = UI \cos \varphi.$$

Множитель  $\cos \varphi$  носит название коэффициента мощности.

Активная мощность  $P$  физически представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени в виде теплоты на участке цепи с сопротивлением  $R$ .

Так как  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ , то активная мощность может быть выражена следующим образом:

$$P = I^2 R.$$

Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

При расчетах электрических цепей пользуются также понятием реактивная мощность, которая определяется по формуле

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Реактивная мощность характеризует ту часть энергии, которая колеблется между приемником и источником.

Так как  $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$ , то величина реактивной мощности в цепи переменного тока может быть выражена следующим образом:

$$Q = I^2 X.$$

Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар). Если  $\sin \varphi > 0$ , то  $Q > 0$ , если  $\sin \varphi < 0$ , то  $Q < 0$ . Так как  $X = X_L - X_C$ , то

$$Q = I^2 (X_L - X_C) = I^2 X_L - I^2 X_C = Q_L - Q_C.$$

Наряду с понятием активной мощности  $P$  и реактивной  $Q$ , применяется понятие полной мощности  $S$ :

$$S = UI.$$

Математически произведение  $UI = S$  представляет наибольшую возможную активную мощность  $P$ , которую можно получить при заданных значениях  $U$  и  $I$  и при сдвиге фаз  $\varphi = 0$ , т. е.  $\cos \varphi = 1$ . Полная мощность измеряется в вольт-амперах (В·А).

Между  $P$ ,  $Q$  и  $S$  существует соотношение  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ . Графически эту связь можно представить в виде прямоугольного треугольника (рис. 9.1).

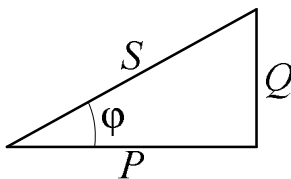


Рис. 9.1. Треугольник мощностей

По измеренным или вычисленным значениям тока  $I$ , напряжения  $U$  и мощности  $P$  приемника легко определяются параметры приемника  $R, X, Z$ .

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad R = Z \cos \varphi, \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Реактивное сопротивление  $X > 0$ , если  $X_L > X_C$ ; и, наоборот,  $X < 0$ , если  $X_L < X_C$ .

### 3. Описание лабораторной установки

Для измерения величин, предусмотренных программой работы на лабораторном стенде имеется ваттметр, фазометр, амперметр на 2 А и вольтметр на 250 В.

Ваттметр – прибор для измерения мощности. В лаборатории используется многопредельный ваттметр электродинамической системы. Ваттметр имеет две катушки – напряжения и тока. Катушка напряжения включается параллельно участку цепи, подобно вольтметру, ее зажимы на лицевой стороне ваттметра отмечены буквой  $U$ . Токовая катушка включается в цепь последовательно, подобно амперметру, ее зажимы отмечены буквой  $I$ . Один зажим токовой катушки и один зажим катушки напряжения отмечают звездочками – это генераторные зажимы. При измерении активной мощности эти зажимы должны включаться со стороны источника энергии.

Ваттметр устроен так, что измеряет значение  $UI \cos(\angle \dot{U}\dot{I})$  где  $U$  и  $I$  действующие напряжение и ток, подведенные к ваттметру,  $\varphi = \angle \dot{U}\dot{I}$  – угол сдвига фаз между ними.

Цена деления многопредельного ваттметра вычисляется по формуле

$$C_W = \frac{U_n I_n}{n},$$

где  $U_n$  и  $I_n$  – номинальные напряжение и ток ваттметра, указанные на лицевой стороне прибора;

$n$  – число делений всей шкалы.

Активная мощность, измеряемая ваттметром, равна

$$P = n_{\text{изм}} \cdot C_W,$$

где  $n_{\text{изм}}$  – число делений шкалы, указываемое стрелкой прибора.

Фазометр – прибор для измерения угла  $\phi$  сдвига фаз напряжения и тока. На лицевой стороне фазометра, также как у ваттметра, имеются зажимы для подключения напряжения  $U$  и тока  $I$ , между которыми определяется сдвиг фаз. Два зажима также являются генераторными и отмечены звездочками. Схема включения фазометра в электрическую цепь аналогична включению ваттметра. Устройство фазометра таково, что в нерабочем состоянии стрелка прибора занимает произвольное положение на шкале.

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9.2.

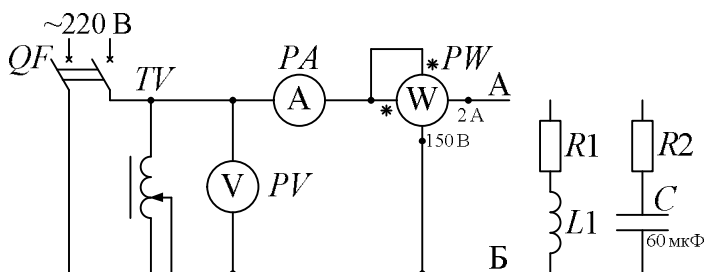


Рис. 9.2. Схема электрической цепи для измерения мощности и параметров приемника:

PV – вольтметр, А 250 В; PA – амперметр, 2 А;

PW – многопредельный ваттметр; TV – автотрансформатор



4.2. Подключить к зажимам АБ поочередно приемники  $R1, L1$  и  $R2, C$ , и оба этих приемника, соединенных последовательно, и, устанавливая в каждом из трех случаев при помощи автотрансформатора ток  $I = 2$  А, записать показания приборов в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Измерение мощности и параметров приемников с помощью ваттметра

Приемник	Измерено			Вычислено				
	$I,$ А	$U,$ В	$P,$ Вт	$S,$ ВА	$Q,$ вар	$Z,$ Ом	$R,$ Ом	$X,$ Ом
$R1, L1$								
$R2, C$								
$R1, L1, R2, C$								

4.3. Включить в электрическую цепь вместо ваттметра фазометр. Рекомендуется выбрать для фазометра предел измерения по току 5 А и по направлению 220 В. Переключатель прибора «генератор-приемник» должен быть в положении «приемник».

4.4. Повторить пункт 4.2 программы. Записать показания приборов в табл. 9.2. Угол  $\varphi$  следует записать с учетом знака:  $\varphi_{\text{инд}} > 0$ ,  $\varphi_{\text{емк}} < 0$ .

Таблица 9.2

Измерение мощности и параметров приемников с помощью фазометра

Приемник	Измерено				Вычислено					
	$I,$ А	$U,$ В	$\varphi$	$\cos \varphi$	$S,$ ВА	$P,$ Вт	$Q,$ вар	$Z,$ Ом	$R,$ Ом	$X,$ Ом
$R1, L1$										
$R2, C$										
$R1, L1,$ $R2, C$										

4.5. Вычислить величины, указанные в таблицах. Расчетные формулы привести в отчете.

4.6. Построить в масштабе треугольник мощностей для приемника  $R1, L1$ .

### 5. Контрольные вопросы

1. Чему равна мгновенная мощность цепи переменного тока?
2. Чему равна активная мощность?
3. Как определяется реактивная и полная мощности?
4. Какова разница активной, реактивной и полной мощностей?  
В каких единицах они измеряются?
5. Дано:  $i = 5 \sin \omega t, A$ ;  $u = 5 \sin(\omega t + 30^\circ), B$ .
6. Чему равен коэффициент мощности?

## Лабораторная работа № 10

### ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Целью работы является исследование линии электропередачи переменного тока при различном характере нагрузки.

#### 2. Общие сведения

Линия электропередачи переменного тока обладает активным и реактивным сопротивлениями. Активное сопротивление есть сопротивление прямого и обратного металлических проводов. Реактивное сопротивление создается как индуктивным сопротивлением, определяемым наличием магнитного поля вокруг проводов, так и емкостным сопротивлением, определяемым наличием электрического поля между проводами, два провода являются обкладками конденсатора. Кроме того, сопротивление изоляции проводов хотя и велико, но оно конечно, поэтому через изоляцию проходит небольшой ток утечки. Таким образом, между проводами проходит емкостной ток и ток утечки. Оба этих тока не зависят от того, включен приемник или нет.

В воздушных линиях с напряжением ниже 110 кВ емкостным током линии и током утечки через изоляцию пренебрегают в силу их незначительности. Это позволяет представить линию электропередачи схемой замещения в виде последовательного соединения резистивного  $R_{\text{л}}$  и индуктивного  $X_{\text{л}}$  элементов (рис. 10.1, а).

Для электрической цепи (рис. 10.1, а) уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид:

$$\underline{Z} = \frac{D}{C}.$$

В соответствии с этим уравнением построим векторную диаграмму. Для определенности положим, что нагрузка имеет индуктивный характер. Вектор напряжения на приемнике  $\dot{U}_2$  расположим по оси действительных чисел (рис. 10.1, б). Ток  $\dot{I}$  отстает

от него на угол  $\varphi_2$  в силу индуктивного характера нагрузки. Падение напряжения в активном сопротивлении линии  $R_{\text{л}}\dot{I}$  совпадает по фазе с током, падение напряжения в индуктивном сопротивлении линии  $jX_{\text{л}}\dot{I}$  опережает ток на  $90^\circ$ . Складывая векторы  $\dot{U}_2$ ,  $R_{\text{л}}\dot{I}$  и  $jX_{\text{л}}\dot{I}$ , получим напряжение  $\dot{U}_1$  в начале линии, то есть на источнике.

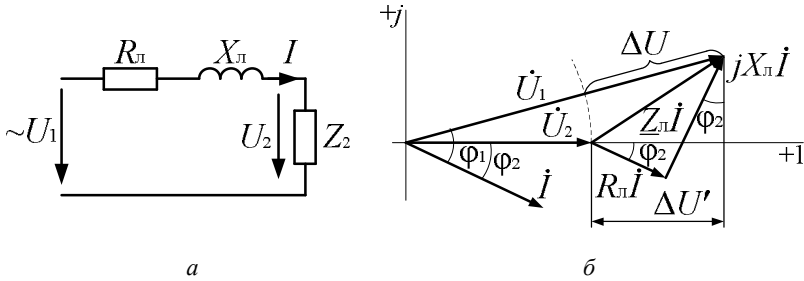


Рис. 10.1. Схема линии электропередачи (а), векторная диаграмма (б)

Из векторной диаграммы видно, что напряжение в конце линии  $\dot{U}_2$  отличается от напряжении в начале линии  $\dot{U}_1$  как по величине, так и по фазе. Это отличие обусловлено падением напряжения в линии. Под **падением напряжения** в линии передачи понимают модуль геометрической разности векторов напряжения в начале ( $\dot{U}_1$ ) и в конце ( $\dot{U}_2$ ) линии:

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_2| = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2} \cdot I = Z_{\text{л}} I.$$

На векторной диаграмме падение напряжения в линии равно в масштабе длине вектора  $Z_{\text{л}}\dot{I}$ .

Поскольку сдвиг фаз между  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  на работе потребителя не отражается, то при расчете проводов учитывают не падение напряжения, а потерю напряжения в линии.

Потеря напряжения в линии передачи равна разности модулей напряжения в начале и конце линии, то есть  $\Delta U = |\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|$ . Потеря

напряжения показывает, на какую величину напряжение в конце линии меньше, чем напряжение в начале линии.

На векторной диаграмме (рис. 10.1, б) потеря напряжения равна в масштабе длине отрезка  $\Delta U$ , полученного засечкой радиусом, равным длине вектора  $\dot{U}_2$ . Из векторной диаграммы видно, что падение напряжения  $Z_{\text{л}}I$  больше потери напряжения  $\Delta U$ .

При емкостном характере нагрузки напряжение в конце линии  $U_2$  может сравняться и даже превысить напряжение в начале линии  $U_1$ .

Потерю напряжения с достаточной для практических целей точностью можно рассчитать по формуле

$$\Delta U' = R_{\text{л}}I \cos \varphi_2 + X_{\text{л}}I \sin \varphi_2,$$

где  $\varphi_2$  – сдвиг фаз между напряжением и током на приемнике.

На векторной диаграмме (рис. 10.1, б) показан отрезок прямой  $\Delta U'$ , полученный как сумма проекций векторов  $R_{\text{л}}\dot{I}$  и  $jX_{\text{л}}\dot{I}$  на горизонтальную ось. Как видно, этот отрезок приближенно равен отрезку  $\Delta U$ , соответствующему потере напряжения в линии.

Параметры линии  $R_{\text{л}}$  и  $X_{\text{л}}$  можно рассчитать аналитически, исходя из ее конструкции. В условиях лаборатории  $R_{\text{л}}$  и  $X_{\text{л}}$  можно найти из опыта короткого замыкания линии. По данным, полученным из этого опыта:

$$Z_{\text{л}} = \frac{U_{\text{1к}}}{I_{\text{к}}}, \quad R_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cos \varphi_2, \quad X_{\text{л}} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 - R_{\text{л}}^2}.$$

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования является модель линии передачи переменного тока (рис. 10.2).

В качестве нагрузки к зажимам АБ включается фаза  $A$  резистивного трехфазного приемника.

Для создания индуктивного характера нагрузки к резистивному приемнику параллельно включается индуктивная катушка  $L2$ .

Для создания емкостного характера нагрузки к резистивному приемнику параллельно включается емкость  $C = 10$  мкФ.

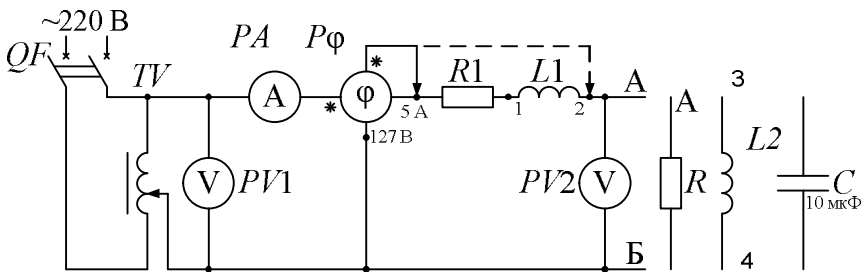


Рис. 10.2. Электрическая модель линии передачи переменного тока

Для измерения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в начале и в конце линии входной зажим обмотки напряжения фазометра поочередно присоединяется к зажиму 5 А фазометра и к зажиму 2 индуктивной катушки  $L1$ .

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 10.2.

4.2. Опыт короткого замыкания линии.

Ручку лабораторного автотрансформатора ( $TV$ ) поставить в положение нуля. Зажимы АБ соединить накоротко. Плавно повышая напряжение, установить ток 1 А. Данные измерений занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Параметры линии электропередачи

Измерено				Вычислено		
$U_{1к},$ В	$I_k,$ А	$\varphi_1,$ град	$\cos \varphi_1$	$Z_{л},$ Ом	$R_{л},$ Ом	$X_{л},$ Ом

По данным опыта рассчитайте параметры линии передачи.

4.3. Испытание линии передачи при различном характере нагрузки. Поочередно подключая к зажимам АБ активный, активно-индуктивный и активно-емкостный приемники, установить напряжение источника питания  $U_1 = 100$  В и провести необходимые измерения согласно табл. 10.2. Угол  $\varphi$  следует записать с учетом знака.

Таблица 10.2

Взаимная индуктивность и коэффициент связи магнитно-связанных катушек

Приемник	Измерено					Вычислено				
	$I$ , А	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$\varphi_1$ , град	$\varphi_2$ , град	$R_n I$ , В	$X_n I$ , В	$Z_n I$ , В	$\Delta U$ , В	$\Delta U'$ , В
Активный										
Активно-индуктивный										
Активно-емкостной										

4.4. Постройте в масштабе векторные диаграммы для трех видов нагрузки. Рекомендуемый масштаб напряжения  $m_U = 10$  В/см.

### 5. Контрольные вопросы и задания

1. Что означают потеря и падение напряжения в линии передачи?
2. Как получена формула для приближенного определения потери напряжения  $\Delta U'$ ?
3. При какой нагрузке  $\Delta U$  и  $\Delta U'$  особенно отличаются друг от друга?
4. Какие параметры линии передачи можно определить из опыта короткого замыкания?
5. Как рассчитать мощности источника, приемника и КПД линии передачи?
6. Почему для передачи электрической энергии на дальние расстояния необходимо повышать напряжение?
7. Рассчитайте напряжение источника питания  $U_1$ , если напряжение на приемнике  $U_2 = 220$  В, сопротивление приемника  $R = 110$  Ом, активное и реактивное сопротивления линии электропередачи  $R_n = 3$  Ом,  $X_n = 4$ . Определите потерю и падение напряжения в линии электропередачи.

## Лабораторная работа № 11

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ

### 1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование влияния характера нагрузки на форму кривой тока при несинусоидальном напряжении источника.

### 2. Общие сведения

На практике кривые ЭДС, напряжений и токов в большей или меньшей степени отличаются от синусоидальных. Если это отличие значительное, то явления, происходящие в электрических цепях с несинусоидальными периодическими ЭДС, проще всего анализировать путем разложения кривой ЭДС в ряд Фурье. Несинусоидальное напряжение, создаваемое источником несинусоидальной ЭДС, разложенное в ряд Фурье, имеет вид

$$U(t) = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \psi_{U1}) + \\ + U_{m2} \sin(2\omega t + \psi_{U2}) + \dots + U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{Uk}) + \dots,$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая напряжения или нулевая гармоника;

$U_{m1} \sin(\omega t + \psi_{U1})$  – первая или основная гармоника напряжения.

Все последующие члены ряда именуются по номеру гармоники и носят название высших гармоник.  $U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{Uk})$  – высшая гармоника напряжения порядка  $k$ . Номер гармоники  $k$  показывает во сколько раз частота этой гармоники больше основной частоты

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ , где  $T$  – период несинусоидального напряжения  $U(t)$ .

Используя принцип наложения, рассчитывают токи в цепи от каждой составляющей напряжения, входящей в ряд Фурье.

При расчете тока  $I_0$ , возникающего от действия постоянной составляющей напряжения  $U_0$  (нулевой гармоники), используют методы расчета цепей постоянного тока. При этом необходимо иметь



в виду, что индуктивность для постоянного тока имеет сопротивление, равное нулю, а емкость – сопротивление, равное бесконечности (разрыв цепи).

Расчет тока первой и последующих гармоник выполняется с использованием методов расчета цепей синусоидального тока. Здесь уместно использовать комплексный метод.

Закон Ома для  $k$ -й гармоники в комплексной форме имеет вид:

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}_k}{R + j \left( k\omega L - \frac{1}{k\omega C} \right)}.$$

Так как индуктивное и емкостное сопротивления зависят от частоты, то значения этих сопротивлений не одинаковы для разных гармоник. Индуктивное сопротивление для  $k$ -й гармоники в  $k$  раз больше, а емкостное, наоборот, в  $k$  раз меньше, чем для первой гармоники

$$X_{Lk} = k\omega L = kX_{L1}, \quad X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{X_{C1}}{k}.$$

Частота на активное сопротивление оказывает незначительное влияние, и им можно пренебречь.

Мгновенное значение тока в ветви получают путем суммирования мгновенных значений токов всех гармоник:

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \psi_{i1}) + I_{m2} \sin(2\omega t + \psi_{i2}) + \dots + I_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{ik}) + \dots,$$

Действующее значение несинусоидального тока равно

$$I = \sqrt{I_0^2 + \left( \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left( \frac{I_{m2}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots}$$

Действующее значение несинусоидального тока измеряется приборами электромагнитной и электродинамической систем (приборами переменного тока).

Среднее значение несинусоидального тока за период равно постоянной составляющей тока  $I_0$  (нулевой гармонике):

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = I_0.$$

Среднее значение несинусоидального тока измеряется приборами магнитоэлектрической системы (приборами постоянного тока).

Активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots$$

По закону Джоуля-Ленца:

$$P = I^2 R.$$

В цепи, содержащей индуктивные катушки и конденсаторы, кривая тока отличается по форме от кривой напряжения.

Индуктивное сопротивление растет с ростом частоты, поэтому в токе индуктивного элемента высшие гармоники имеют относительно меньшее значение, чем в напряжении. Катушка сглаживает кривую тока, по сравнению с кривой напряжения.

Емкостное сопротивление уменьшается с ростом частоты, поэтому в токе емкостного элемента высшие гармоники имеют относительно большее значение, чем в напряжении. Конденсатор искажает кривую тока по сравнению с кривой напряжения.

Кривая тока  $i$  подобна кривой напряжения  $U$  в случае, если цепь обладает только активным сопротивлением  $R$ , одинаковым для всех частот.

### 3. Описание лабораторной установки

На лабораторном стенде имеется источник питания, создающий несинусоидальное напряжение (рис. 11.1, *a*).

Разложение несинусоидального напряжения  $u(t)$  (рис. 11.1, *б*) в ряд Фурье имеет вид:

$$u(t) = \frac{U_m}{\pi} + \frac{U_m}{2} \sin(\omega t) + \frac{2}{3\pi} U_m \sin(2\omega t - 90^\circ) \text{ В,}$$

где  $U_m = 33 \cdot \sqrt{2} \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

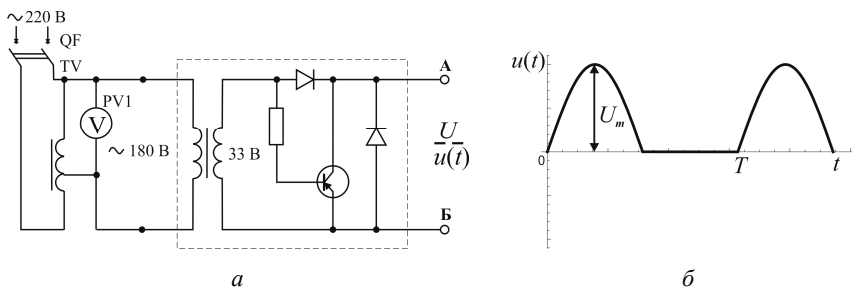


Рис. 11.1. Электрическая схема источника несинусоидального напряжения (а), график напряжения (б)

Объектом исследования является несинусоидальный электрический ток в цепи на рис. 11.2.

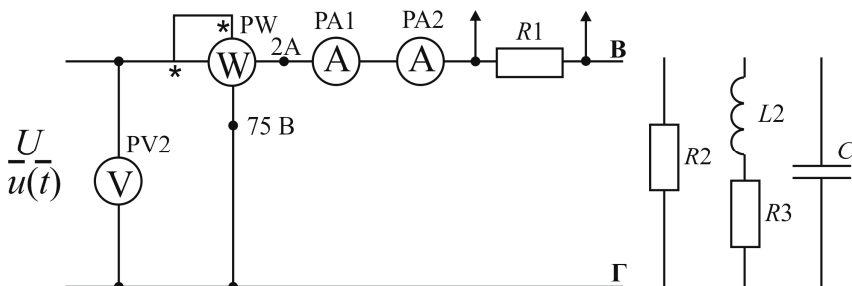


Рис. 11.2. Электрическая схема для исследования цепи несинусоидального тока

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, используют измерительные приборы:

$PV1$  – 250 В, щитовой вольтметр;

$PV2$  – 75 В, многопредельный вольтметр электромагнитной системы;

$PA1$  – 1 А, амперметр электромагнитной системы (Э514, Э365) для измерения действующего тока  $I$ ;

$PA2 - 1,5$  А, амперметр магнитоэлектрической системы (M253) для измерения постоянной составляющей тока  $I_0$ ;

$PW$  – многопредельный ваттметр.

Для наблюдения формы кривой тока используется электронный осциллограф. На вход осциллографа подается напряжение с активного сопротивления  $R1$ . Для снятия осциллограмм необходимо заготовить кальку или прозрачную бумагу.

Для создания нагрузки индуктивного характера используется индуктивная катушка  $L2$ .

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. К зажимам АБ (рис. 11.1, а) источника несинусоидального напряжения подключить электрическую цепь (рис. 11.2).

4.2. Записать напряжение источника  $u(t)$  в виде ряда Фурье:

$$u(t) = 14,8 + 23,3 \sin(\omega t) + 9,9 \sin(2\omega t - 90^\circ) \text{ В, } f = 50 \text{ Гц.}$$

Записать параметры элементов электрической цепи в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Параметры элементов электрической цепи

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$L_2$ , Гн	$C$ , мкФ
30	30	41	0,15	50

4.3. Подключая поочередно к зажимам ВГ активный, индуктивный и емкостной приемники, установить с помощью трансформатора  $TU$  на входе источника несинусоидальное напряжение 180 В. Провести измерения согласно табл. 11.2. Скопировать осциллограммы токов для каждого из приемников. Изображение должно содержать порядка двух периодов.

Таблица 11.2

Измеренные и расчетные электрические величины цепи несинусоидального тока

Приемники	Измерено				Вычислено		
	$U$ , В	$I$ , А	$I_0$ , А	$P$ , Вт	$I$ , А	$I_0$ , А	$P$ , Вт
Активный							
Индуктивный							
Емкостной							

4.4. Для одной из схем электрической цепи по указанию преподавателя выполнить следующее:

а) нарисовать расчетную схему и по заданному напряжению источника питания и заданным параметрам элементов цепи рассчитать постоянную составляющую тока  $I_0$ , амплитуды и начальные фазы первой и второй гармоник тока и записать выражение тока в виде:

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \psi_{i1}) + I_{m2} \sin(2\omega t + \psi_{i2});$$

б) рассчитать действующее значение тока  $I$  и мощность  $P$ . Рассчитанные значения внести в табл. 11.2. Расчеты всех величин должны быть приведены в отчете;

в) построить график тока  $i = f(t)$  (одно полное колебание) на миллиметровой бумаге и сравнить его с осциллограммой тока и графиком напряжения на входе цепи (график напряжения нанести пунктиром в произвольном масштабе).

## 5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Для расчета амплитуд первой и второй гармоник тока рекомендуется использовать закон Ома в виде:

$$I_{mk} = \frac{U_{mk}}{Z_k},$$

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

Начальные фазы первой и второй гармоник тока можно определить из выражения

$$\psi_{ik} = \psi_{uk} - \varphi_k,$$

где  $\psi_{uk}$  – начальная фаза напряжения  $k$ -й гармоники;

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{R} \text{ – сдвиг фаз напряжения и тока } k\text{-й гармоника.}$$

Для построения графика несинусоидального тока рекомендуется по горизонтальной оси нанести две шкалы, учитывающие изменения фаз первой и второй гармоник за один и тот же промежуток времени (рис. 11.3). Рекомендуемый масштаб для первой гармоники 30 град/см.

По вертикали откладывают токи гармоник в одном и том же масштабе.

Следует помнить, если начальная фаза  $\psi > 0$ , то синусоида сдвинута влево от начала координат; если  $\psi < 0$ , то синусоида сдвинута вправо от начала координат.

Для примера на рис. 11.3 приведено построение графика заданного несинусоидального напряжения

$$u(t) = 14,8 + 23,3 \sin(\omega t) + 9,9 \sin(2\omega t - 90^\circ) \text{ В.}$$

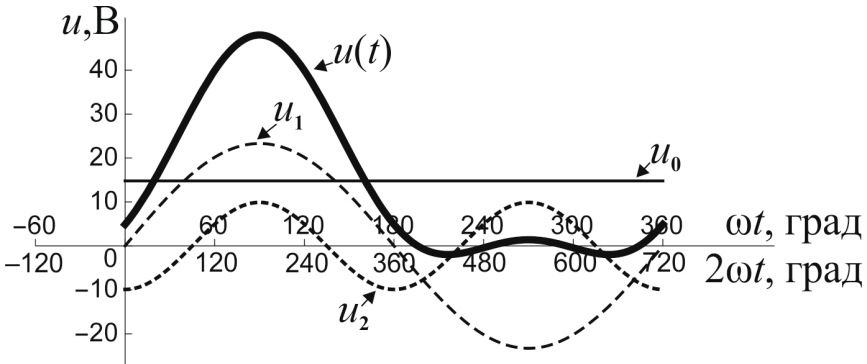


Рис. 11.3. График несинусоидального напряжения

Графики каждой гармоники строятся отдельно. Для построения графика несинусоидальной величины необходимо суммировать ординаты гармоник для одних и тех же моментов времени.

## 6. Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения в электрической цепи несинусоидальных токов и напряжений?
2. Как называются слагаемые ряда Фурье? Почему они имеют такие названия?
3. Как рассчитывается линейная электрическая цепь при действии в ней периодических несинусоидальных источников ЭДС?
4. Чему равно действующее значение несинусоидального тока?
5. Чему равна активная мощность несинусоидального тока?
6. Как зависят от частоты индуктивное и емкостное сопротивления?
7. Как влияет характер реактивного элемента на форму кривой тока в нем при действии несинусоидального напряжения?

## Лабораторная работа № 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

#### 1. Цель работы

Цель работы – определить с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания коэффициенты А-формы записи уравнений четырехполюсника.

#### 2. Общие сведения

Четырехполюсником называют электрическую цепь, имеющую два входных и два выходных зажима. Понятием «четырехполюсник» пользуются тогда, когда интересуются токами и напряжением только в двух ветвях, на входе и на выходе четырехполюсника. В качестве четырехполюсника могут быть представлены трансформатор, линия передачи энергии, мостовая схема. Принято изображать четырехполюсник в виде прямоугольника с двумя парами выводов (рис. 12.1).

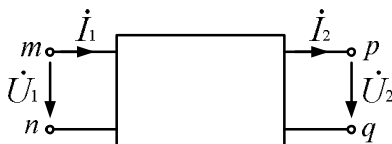


Рис. 12.1. Электрическая схема четырехполюсника

Четырехполюсник является передаточным звеном между источником энергии и приемником. К входным зажимам  $mn$  присоединяют источник питания, к выходным  $pq$  – приемник. Если внутри четырехполюсника отсутствуют источники энергии, то такой четырехполюсник называется пассивным.

Предполагается, что схема внутренних соединений четырехполюсника и значения сопротивлений в ней остаются неизменными.

Для любого пассивного четырехполюсника напряжение и ток на входе  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  связаны с напряжением и током на его выходе  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$  линейными зависимостями, которые называются уравнениями



четыреполюсника. Уравнения четыреполюсника имеют различную форму записи. Рассмотрим А-форму:

$$\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2.$$

Комплексные коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  в уравнениях (1) зависят от схемы внутренних соединений четыреполюсника, значений сопротивлений и частоты. Коэффициенты связаны между собой соотношением:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1. \quad (2)$$

Если источник питания присоединить к зажимам  $pq$ , а приемник к зажимам  $mn$ , то уравнения четыреполюсника примут вид

$$\dot{U}_1 = \underline{D}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \quad (3)$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{A}\dot{I}_2.$$

Четыреполюсник называется симметричным, если при перемене местами источника питания и приемника токи в источнике питания и приемнике не изменяются. В симметричном четыреполюснике  $\underline{A} = \underline{D}$ .

Комплексные коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  можно определить, используя входные сопротивления четыреполюсника, полученные опытным путем. Опытное определение параметров четыреполюсника имеет существенное значение, когда внутреннее строение четыреполюсника неизвестно.

Определим комплексное входное сопротивление четыреполюсника при трех различных режимах его работы:

1. При питании со стороны зажимов  $mn$  и разомкнутой ветви  $pq$  (холостой ход ветви  $pq$ ,  $I_2 = 0$ ) из уравнений (1):

$$\underline{Z}_{10} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} = Z_{10}e^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}. \quad (4)$$

2. При питании со стороны зажимов  $mn$  и коротком замыкании ветви  $pq$  (короткое замыкание,  $U_2 = 0$ ) из уравнений (1):

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{\dot{U}_{ik}}{\dot{I}_{ik}} = Z_{ik} e^{j\varphi_{ik}} = \frac{B}{\underline{D}}. \quad (5)$$

3. При питании со стороны зажимов  $pq$  и разомкнутой ветви  $mn$  (холостой ход ветви  $mn$ ,  $I_2 = 0$ ) из уравнений (3):

$$\underline{Z}_{20} = Z_{20} e^{j\varphi_{20}} = \frac{D}{\underline{C}}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения четырех неизвестных коэффициентов  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  располагаем четырьмя уравнениями:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1; \quad \underline{Z}_{10} = \frac{A}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{1k} = \frac{B}{\underline{D}}; \quad \underline{Z} = \frac{D}{\underline{C}}.$$

Решая совместно последние уравнения, получим:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}^2}{\underline{Z}_{20}(\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1k})}}; \quad \underline{C} = \frac{A}{\underline{Z}_{10}}; \quad \underline{D} = \underline{C}\underline{Z}_{20}; \quad \underline{B} = \underline{D}\underline{Z}_{1k}.$$

### 3. Описание лабораторной установки

В качестве четырехполюсника используются две магнитно-связанные катушки (рис. 12.2).

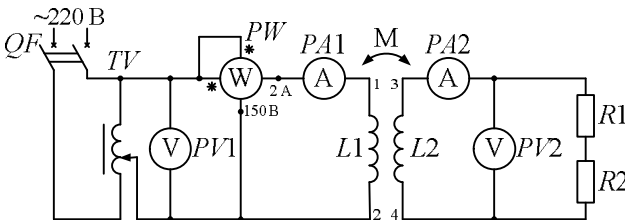


Рис. 12.2. Электрическая схема опытного определения входных сопротивлений четырехполюсника:

PV1 – вольтметр, А 250 В; PV2 – вольтметр, А 150 В;  
PV1, PV2 – амперметры, 2 А; PW – ваттметр на 150 В и 2 А

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Рабочий режим четырехполосника. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 12.2. Установить на входе напряжение  $U_1 = 100$  В, измерить и записать  $I_1, P_1, U_2, I_2$ .

4.2. Провести опыт холостого хода при питании со стороны первичных зажимов. Разомкнуть ветвь с резисторами  $R1$  и  $R2$ , установить напряжение  $U_{10} = 100$  В, измерить  $I_{10}, P_{10}$ .

4.3. Опыт короткого замыкания при питании со стороны первичных зажимов.

Замкнуть зажимы 3, 4 индуктивной катушки  $L2$  накоротко, подать такое напряжение на вход цепи, чтобы ток короткого замыкания на входе  $I_{1k}$ , равнялся току  $I_1$  из пункта 5.1 настоящей работы, измерить  $U_{1k}, P_{1k}$ .

4.4. Опыт холостого хода при питании со стороны вторичных зажимов.

Разобрать схему со стороны зажимов 3, 4. Перенести провода с зажимов 1, 2 на зажимы 3, 4. Зажимы 1, 2 оставить разомкнутыми. К зажимам 3, 4 подать напряжение  $U'_{10} = 100$  В и измерить  $I'_{10}, P'_{10}$ .

4.5. Используя данные пунктов 5.2 и 5.4, определить, является ли данный четырехполосник симметричным.

4.6. По опытным данным определить комплексные входные сопротивления:

$$\underline{Z}_{10} = Z_{10} e^{j\varphi_{10}}; \quad \underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad \varphi_{10} = \arccos \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}};$$

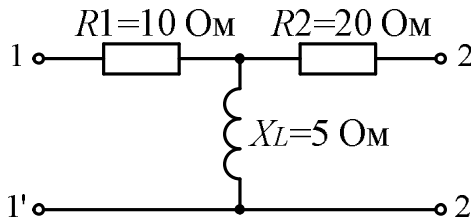
$$\underline{Z}_{1k} = Z_{1k} e^{j\varphi_{1k}}; \quad \underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad \varphi_{1k} = \arccos \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}};$$

$$\underline{Z}_{20} = Z_{20} e^{j\varphi_{20}}; \quad \underline{Z}_{20} = \frac{U_{20}}{I_{20}}; \quad \varphi_{20} = \arccos \frac{P_{20}}{U_{20} I_{20}}.$$

4.7. Рассчитать коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$ , проверить соотношение  $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ .

## 5. Контрольные вопросы и задания

1. Что называют четырехполюсником?
2. Какой четырехполюсник называют активным и какой пассивным?
3. Какой четырехполюсник называют симметричным?
4. Запишите уравнения четырехполюсника А-формы.
5. На основании каких опытов могут быть составлены уравнения для расчета постоянных коэффициентов четырехполюсника?
6. Как определяется комплексное входное сопротивление четырехполюсника?
7. Запишите выражения для определения у заданного четырехполюсника входных сопротивлений  $Z_{1k}$ ,  $Z_{10}$ ,  $Z_{2k}$ ,  $Z_{20}$ .



# Лабораторная работа № 13

## РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Целью работы является исследование резонансного режима в неразветвленной электрической цепи, содержащей резистор, индуктивную катушку и конденсатор. Исследование зависимостей тока и напряжения на элементах цепи от емкости конденсатора. Построение векторных диаграмм методом засечек.

### 2. Общие сведения

Резонансом называется такой режим пассивной цепи, содержащей катушки индуктивности и конденсаторы, при котором ее входное сопротивление является чисто активным. При резонансе ток совпадает по фазе с напряжением на входе цепи.

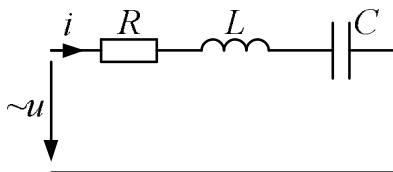


Рис. 13.1. Цепь с последовательным соединением элементов  $R, L, C$

Полное сопротивление  $Z$  цепи (рис. 13.1) равно

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

Для такой цепи резонанс наступит при условии, что реактивное сопротивление  $X = X_L - X_C = 0$  или, иначе говоря, индуктивное сопротивление цепи должно равняться емкостному сопротивлению  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ . В этом случае полное сопротивление цепи будет чисто активным  $Z = R$ .

При  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  противоположные по фазе напряжения на индуктивном элементе  $U_L$  и на емкостном элементе  $U_C$  равны по величине (рис. 13.2). Поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называют резонансом напряжений.

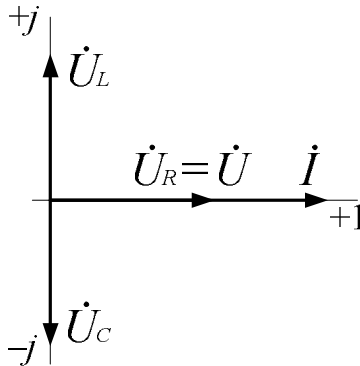


Рис. 13.2. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Полное сопротивление  $Z$  при  $X_L = X_C$  минимально, поскольку оно равно только активному сопротивлению цепи, а ток  $I$  при заданном напряжении  $U$  достигает наибольшего значения  $I = \frac{U}{R}$ .

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах при резонансе могут превысить по величине напряжение сети, на которое подключена вся схема, во столько раз, во сколько раз  $X_L = X_C$  больше активного сопротивления  $R$ . Это может вызвать повреждение приборов и элементов цепи из-за пробоя изоляции. Кроме того, повышенное напряжение опасно для обслуживающего персонала.

Однако благодаря этим же свойствам – максимальному току и повышенным напряжениям на индуктивности и емкости – резонанс напряжений находит широкое применение в радиотехнике и технике связи.

Из условия  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  следует, что резонанса можно достичь, изменяя либо частоту напряжения источника, либо параметры цепи –

индуктивность или емкость. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

С энергетической стороны при резонансе полная мощность  $S = UI$  равна активной мощности  $P = UI \cos \varphi$ , поскольку угол  $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R} = 0$  и  $\cos \varphi = 1$ . Реактивная мощность индуктивного элемента и реактивная мощность емкостного элемента одинаковы  $Q_L = Q_C = 0$ . Между катушкой индуктивности и конденсатором происходит обмен энергией. Энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля и обратно.

Энергия, поступающая в цепь от источника питания, в любой момент времени целиком переходит в теплоту в активном сопротивлении.

### 3. Описание лабораторной установки

Исследуемая неразветвленная цепь собирается из резистора R1, двух индуктивных катушек, соединенных между собой зажимами 2–3, и батареи конденсаторов. Цепь присоединяется к лабораторному автотрансформатору, предназначенному для плавного регулирования напряжения. Зажимы этих элементов выведены на лицевую сторону панели стенда (рис. 13.3).

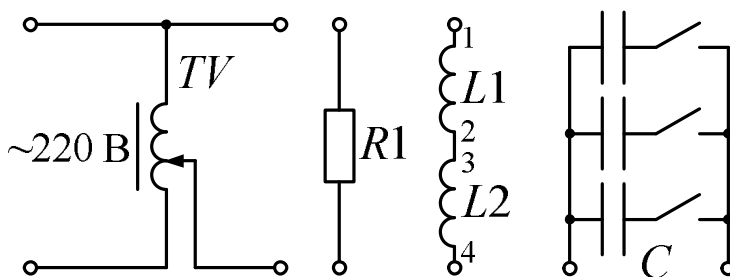


Рис. 13.3. Элементы лабораторного стенда для исследования резонанса напряжений

Для измерения величин, предусмотренных программой работы, на стенде имеются фазометр, амперметр на 2 А и два вольтметра, один на 250 В для измерения напряжения на входе цепи и второй на 600 В в качестве переносного для измерения напряжения на индуктивно-резистивном приемнике и конденсаторе.

Две индуктивные катушки должны быть соединены последовательно зажимами 2 и 3 для создания большего индуктивного сопротивления. Резистор R1 необходим для ограничения тока в режиме резонанса. Переменная емкость батареи конденсаторов позволит создать резонансный режим.

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Руководствуясь разделами 2 и 3, самостоятельно составить схему электрической цепи для исследования резонанса напряжений. В схеме должны быть предусмотрены амперметр для измерения тока, вольтметр для измерения напряжения на входе цепи, фазометр для измерения угла  $\varphi$  и  $\cos \varphi$ , переносной вольтметр. Подготовить таблицу для записи измерений.

4.2. Собрать электрическую цепь для исследования резонанса напряжений. Чтобы избежать больших напряжений на зажимах катушек и батареи конденсаторов, установить в цепи при помощи автотрансформатора напряжение  $U = 80$  В. Во время проведения опыта напряжение поддерживать неизменным.

4.3. Изменяя емкость батареи конденсаторов от 0 до 60 мкФ, измерить ток  $I$ , напряжение  $U_k$  на участке, содержащем индуктивные катушки с последовательно включенным резистором R1, напряжение  $U_C$  на батарее конденсаторов,  $\cos \varphi$  и угол  $\varphi$ . Угол  $\varphi$  следует записывать с учетом знака:  $\varphi_{\text{инд}} > 0$ ,  $\varphi_{\text{емк}} < 0$ . Всего выполнить не менее 8 измерений, из них одно должно соответствовать режиму резонанса, при котором значение угла  $\varphi = 0$  и ток имеют максимальное значение. Число измерений до резонанса и после него должно быть примерно одинаковым. Напряжение  $U_k$  измеряется на участке, содержащем индуктивные катушки и последовательно включенный резистор R1. Отдельно напряжение на резисторе R1 трудно измерить, так как оно слишком мало.

4.4. Для резонансного режима электрической цепи вычислить полное сопротивление всей цепи  $Z = \frac{U}{I}$ , активное сопротивление



всей цепи  $R = Z \cos \varphi$ , полное сопротивление на участке с индуктивными катушками  $Z_k = \frac{U_k}{I}$ , индуктивное сопротивление

$$X_L = \sqrt{Z_k^2 - R^2} \text{ и емкостное сопротивление } X_C = \frac{U_C}{I}.$$

4.5. Построить на одном рисунке графики зависимостей  $U(C)$ ;  $U_k(C)$ ;  $U_C(C)$ ;  $I(C)$ ;  $\cos \varphi(C)$ .

4.6. По результатам измерений построить векторные диаграммы тока и напряжений для трех режимов работы цепи: а) до резонанса; б) при резонансе; в) после резонанса.

## 5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. При выполнении пункта 4.5 задания рекомендуется масштаб по горизонтальной оси для емкости  $m_C = 4 \text{ мкФ/см}$ , по вертикальной оси масштаб для напряжения  $m_U = 20 \text{ В/см}$ ; масштаб тока  $m_i = 0,2 \text{ А/см}$  и для коэффициента мощности в 1 см 0,2 единицы.

5.2. При построении векторных диаграмм рекомендуется масштаб напряжения  $m_U = 40 \text{ В/см}$ .

Построение векторных диаграмм необходимо начинать с вектора тока. Вектор напряжения на конденсаторе  $\dot{U}_C$  отстает от вектора тока на  $90^\circ$ . Положение вектора напряжения  $\dot{U}_k$ , поскольку он содержит активную и индуктивную составляющие, можно найти следующими способами. Первый способ – метод засечек. Из точки 0 векторной диаграммы проводится дуга окружности радиусом, равным в масштабе напряжению  $U$ , а из конца вектора  $\dot{U}_C$  дуга окружности радиусом, равным в масштабе напряжению  $U_k$  (рис. 13.4).

В точке пересечения дуг окружностей сходятся векторы  $\dot{U}$  и  $\dot{U}_k$ . Такое построение основано на том, что  $\dot{U} = \dot{U}_C + \dot{U}_k$ .

Второй способ учитывает, что для напряжения  $U$  известна не только величина, но и угол  $\varphi$  сдвига по отношению к вектору тока  $\dot{I}$ . Если  $\varphi > 0$ , то вектор  $\dot{U}$  направляется в сторону опережения (против часовой стрелки) по отношению к вектору  $\dot{I}$ , если  $\varphi < 0$ , то в сторону отставания (по часовой стрелке).

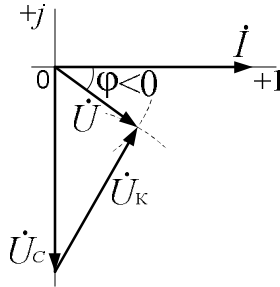


Рис. 13.4. Векторная диаграмма

Вектор напряжения  $\dot{U}_K$  проводится в соответствии с уравнением

$$\dot{U}_K = \dot{U} - \dot{U}_C.$$

Векторы  $\dot{U}$  и  $-\dot{U}_C$  складываются по правилу параллелограмма.

### 6. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение резонансного режима в электрической цепи.
2. Каково условие резонанса в цепи с последовательным соединением элементов  $R, L, C$  ?
3. Почему резонанс в последовательной цепи носит название резонанса напряжений?
4. К каким нежелательным явлениям и почему может привести резонанс напряжений?
5. Каким образом достичь резонанса при последовательном соединении элементов  $R, L, C$  ?
6. Какова особенность резонанса напряжений с энергетической стороны?

# Лабораторная работа № 14

## РЕЗОНАНС ТОКОВ И КОМПЕНСАЦИЯ УГЛА СДВИГА ФАЗ

### 1. Цель работы

Целью работы является исследование режима резонанса токов в электрической цепи с параллельным соединением ветвей. Исследование зависимости тока на входе цепи и коэффициента мощности от емкости конденсатора.

### 2. Общие сведения

Резонанс токов имеет место при параллельном соединении ветвей с емкостными и индуктивными элементами (рис. 14.1).

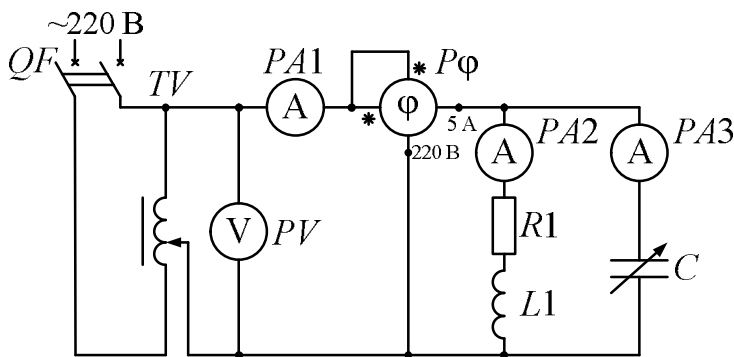


Рис. 14.1. Схема цепи для исследования резонанса токов:  
PV – вольтметр, А 250 В; PA1, PA2 – амперметры 1 А;  
PA3 – амперметр 2 А; Pφ – фазометр

Явление, происходящее в цепи (рис. 14.1), можно наглядно представить с помощью векторной диаграммы (рис. 14.2).

Ток  $I_2$  в приемнике  $R_1, L$  отстает от приложенного напряжения  $U$  на угол  $\varphi_2$ . Ток  $I_3$  в конденсаторе  $C$  опережает напряжение на  $90^\circ$ . Общий ток  $\dot{I}_1$  в неразветвленной части цепи равен векторной сумме токов обеих ветвей

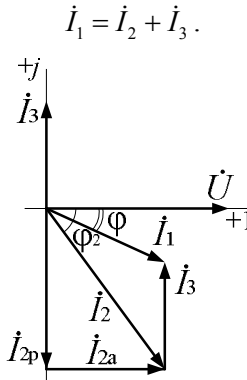


Рис. 14.2. Векторная диаграмма токов и напряжения

При отсутствии конденсатора общий ток равнялся бы току  $I_2$ . Как видно из векторной диаграммы, при параллельном подключении конденсатора к приемнику  $R, L$ , во-первых, уменьшается общий ток цепи  $I_1$ , во-вторых, уменьшается угол  $\varphi$  между общим током  $I_1$  и напряжением, следовательно, увеличивается коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

Уменьшение угла сдвига фаз напряжения на приемнике и общего тока называют *компенсацией сдвига фаз*.

Практически целесообразность уменьшения угла  $\varphi$  заключается в одновременном уменьшении общего тока  $I_1$ , что приводит к снижению потерь мощности в линии, соединяющей потребитель с источником, так как потери в линии пропорциональны квадрату тока.

Минимальную величину общего тока можно получить в том случае, когда ток в конденсаторе будет равен реактивной составляющей тока  $I_2$

$$I_3 = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = I_{2p}; \quad I_3 = I_{2p}.$$

Эти токи будут полностью компенсировать друг друга благодаря тому, что имеют сдвиг по фазе на  $180^\circ$ . Этот случай носит название резонанса токов. При резонансе общий ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением, т. е. становится чисто активным, угол  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ .

С увеличением тока в конденсаторе сверх необходимого для компенсации реактивной составляющей тока  $I_2$  общий ток будет расти, угол  $\varphi$  приобретает отрицательное значение и увеличивается, коэффициент мощности уменьшается.

Аналитический расчет параллельных цепей переменного тока проводится с помощью проводимостей. В данном случае общий ток цепи

$$I_1 = UY = U\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2},$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к цепи;

$Y$  – полная проводимость цепи;

$g$  – активная проводимость ветви  $R, L$ ;  $g = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2}$ ;

$b_L$  – индуктивная проводимость ветви  $R, L$ ;

$$b_L = \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2};$$

$b_C$  – емкостная проводимость ветви с емкостью;  $b_C = \omega C$ .

Изменяя или индуктивность  $L$ , или емкость  $C$ , или сопротивление  $R$ , или частоту питающего напряжения, можно достичь того, что  $b_L$  будет равняться  $b_C$ , и тогда общий ток  $I_1 = Ug$  становится чисто активным. Это соответствует режиму резонанса. Следовательно, условие резонанса токов можно записать как  $b_L = b_C$  или

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

В частном случае, когда можно пренебречь активным сопротивлением катушки индуктивности, условием резонанса становится равенство  $\frac{1}{\omega L} = \omega C$  или  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ . В этом частном случае ток в неразветвленной части цепи равен нулю. Это значит, что притока энергии извне нет, но в замкнутом контуре, образуемом двумя ветвями, ток проходит. В этом контуре происходит непрерывное пре-

вращение энергии электрического поля, запасенного конденсатором, в энергию магнитного поля, запасаемую катушкой, и обратно. Явление резонанса токов используется для увеличения коэффициента мощности электрических установок, в радиотехнике и технике связи.

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служит цепь с параллельным соединением ветвей. Первая ветвь содержит индуктивную катушку  $L1$  и резистор  $R1$ , вторая – батарею конденсаторов со ступенчатым регулированием емкости (рис. 14.1).

Исследуемая цепь присоединяется к лабораторному автотрансформатору, предназначенному для плавного регулирования напряжения.

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь для исследования резонанса токов (рис. 14.1).

4.2. Установить напряжение 70 В и поддерживать его неизменным.

4.3. Изменяя емкость батареи конденсаторов от 0 до 60 мкФ, произвести не менее 8 измерений, из них одно должно соответствовать режиму резонанса, при котором угол  $\varphi = 0$  и общий ток приобретают наименьшее значение. Число измерений до резонанса и последнего должно быть примерно одинаковым. Угол следует записывать с учетом знака:  $\varphi_{\text{инд}} > 0$ ,  $\varphi_{\text{емк}} < 0$ . Данные измерений занести в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Напряжение, токи и коэффициент мощности цепи

Измерено							Вычислено				
$C$ , мкФ	$U$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$\varphi$	$\cos \varphi$	$Y$ , См	$g$ , См	$Y_2$ , См	$b_L$ , См	$b_C$ , См

4.4. Для резонансного режима электрической цепи вычислить полную проводимость цепи  $Y = \frac{I_1}{U}$ , активную проводимость  $g = Y \cos \varphi$ , полную проводимость ветви с индуктивной катушкой  $Y_2 = \frac{I_2}{U}$ , индуктивную проводимость  $b_L = \sqrt{Y_2^2 - g^2}$  и емкостную проводимость  $b_C = \frac{I_3}{U}$ .

4.5. Построить на одном рисунке графики зависимостей  $I_1(C)$ ;  $I_2(C)$ ;  $I_3(C)$ ;  $\cos \varphi(C)$ .

4.6. По результатам измерений в масштабе построить векторные диаграммы токов и напряжения для трех режимов цепи: а) до резонанса; б) резонанса; в) после резонанса.

## 5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При построении векторных диаграмм и графиков рекомендуется масштаб для тока  $m_i = 0,2$  А/см.

Построение векторных диаграмм необходимо начинать с вектора напряжения. Вектор емкостного тока  $\dot{I}_3$  проводится под углом  $90^\circ$  к вектору напряжения в сторону опережения. Положение вектора тока  $\dot{I}_2$ , поскольку он содержит активную и реактивную составляющие, находится методом засечек. Для этого из точки 0 векторной диаграммы проводится окружность радиусом, равным в масштабе  $I_1$ , а из конца вектора  $\dot{I}_3$  – окружность радиусом, равным в масштабе  $I_2$ . Векторы  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  должны сходиться в точке пересечения окружностей (рис. 14.3). Такое построение основано на том, что  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ .

Вектор тока  $\dot{I}_2$  можно разложить на активную и реактивную составляющие. Активная составляющая  $\dot{I}_{2a}$  параллельна вектору напряжения, реактивная  $\dot{I}_{2p}$  отстает от вектора напряжения на  $90^\circ$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3.$$

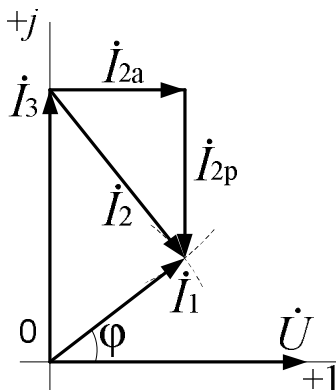


Рис. 14.3. Векторная диаграмма

Второй способ построения векторных диаграмм основан на том, что из эксперимента известен угол  $\varphi$  между общим током  $I_1$  и напряжением  $U$ . В этом случае построение векторных диаграмм также нужно начинать с вектора напряжения  $\dot{U}$ . Вектор тока  $\dot{I}_3$  направляется в сторону опережения под углом  $90^\circ$ , а вектор  $\dot{I}_1$  под углом  $\varphi$  к напряжению  $\dot{U}$ .

Если  $\varphi > 0$ , то вектор общего тока  $\dot{I}_1$  отстает от вектора напряжения; если  $\varphi < 0$ , то вектор  $\dot{I}_1$  опережает вектор напряжения  $\dot{U}$ . Вектор тока  $\dot{I}_2$  находится в соответствии с уравнением  $\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - \dot{I}_3$ .

## 6. Контрольные вопросы и задания

1. Какое явление называют резонансом токов? В каких цепях возможен резонанс токов?
2. Каково условие резонанса токов, каким образом можно достичь резонанса токов?
3. Для какой цепи и каким образом осуществляется компенсация сдвига фаз?
4. Объясните построение векторной диаграммы токов методом засечек.



## Лабораторная работа № 15

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННЫМИ КАТУШКАМИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННЫХ КАТУШЕК (4 часа)

#### 1. Цель работы

Целью работы является исследование явления взаимной индукции на примере двух индуктивно-связанных катушек. Определить опытным путем взаимную индуктивность  $M$  и одноименные зажимы этих катушек.

#### 2. Общие сведения

При достаточно близком расположении двух катушек может оказаться, что часть магнитного потока, создаваемого током первой катушки, будет сцепляться с витками второй катушки и, наоборот, часть магнитного потока, создаваемого током второй катушки, будет сцепляться с витками первой катушки. В этом случае говорят, что катушки магнитно-связанные (индуктивно-связанные) (рис. 15.1).

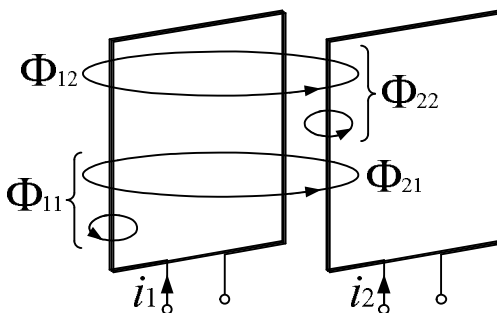


Рис. 15.1. Индуктивно-связанные катушки

При протекании по катушкам переменного тока магнитные потоки будут переменными, и в катушках кроме ЭДС самоиндукции будет наводиться ЭДС взаимной индукции  $e_M$ .

Наведение ЭДС в контуре (катушке) при изменении тока в соседнем контуре называют взаимной индукцией. ЭДС взаимной индукции первой катушки  $e_{M1} = \left| M \frac{di_2}{dt} \right|$ , второй катушки  $e_{M2} = \left| M \frac{di_1}{dt} \right|$ .

Коэффициент  $M$  называют взаимной индуктивностью контуров (катушек). Он имеет ту же размерность, что и индуктивность  $L$  и измеряется в генри (Гн). Взаимная индуктивность  $M$  зависит только от взаимного расположения катушек, числа витков, геометрических размеров катушек и от магнитных свойств среды.

При любой форме и любом расположении магнитно-связанных катушек взаимную индуктивность  $M$  между ними можно определить опытным путем.

Первый способ. Соберем электрическую цепь по схеме рис. 15.2. Напряжение, которое появится на зажимах второй катушки, вызвано ЭДС взаимной индукции. Мгновенное значение напряжения  $u_2 = M \frac{di_1}{dt}$ . Его действующее значение  $U_2 = \omega M I_1$ . Следовательно:

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

Второй способ определения  $M$  использует последовательное соединение магнитно-связанных катушек (рис. 15.3).

При последовательном соединении двух катушек они могут быть включены либо согласно, либо встречно. Согласно включению соответствует согласное направление магнитных потоков самоиндукции и взаимной индукции, встречному включению – встречное направление этих потоков.

При согласном включении приложенное к схеме напряжение

$$\dot{U} = \dot{I} [R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)].$$

При встречном включении

$$\dot{U} = \dot{I} [R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)],$$

где  $R_1, R_2$  – активные сопротивления катушек;  
 $L_1, L_2$  – индуктивности катушек;

$M$  – взаимная индуктивность;

$\omega M = X_M$  – сопротивление взаимной индукции.

$L_1 + L_2 \pm 2M = L_{\text{экв}}$  – эквивалентная индуктивность последовательно соединенных магнитно-связанных катушек.

Как видно, полное сопротивление катушек больше при согласном включении. Это может служить признаком для определения одноименных зажимов катушек. Одноименные зажимы (например, начала катушек) на электрических схемах помечают одинаковыми значками, например, звездочками.

Если на электрической схеме токи двух индуктивно связанных катушек одинаково ориентированы относительно одноименных зажимов катушек, например, оба направлены к звездочкам или оба направлены от звездочек, то имеем согласное включение, в противном случае – встречное. Знание одноименных зажимов катушек позволяет определить по электрической схеме вид включения катушек и правильно выбирать знаки (плюс или минус) при составлении уравнений по второму закону Кирхгофа.

Проведем два опыта. В первом из них включим катушки последовательно и согласно, во втором – последовательно и встречно. По результатам измерений найдем:  $X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M)$ ,  $X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M)$ .

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

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

Степень индуктивной связи между катушками характеризуется коэффициентом связи:

$$K = \frac{M}{L_1 L_2}.$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы.

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служат две магнитно-связанные катушки, зажимы которых 1–2 и 3–4 выведены на панель стенда.

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, на стенде имеются фазометр, амперметр на 2 А, два вольтметра, один на 250 В для измерения напряжения источника питания и второй многопредельный.

Исследуемая цепь подключается к лабораторному автотрансформатору, позволяющему регулировать напряжение.

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 15.2 для определения параметров катушек.

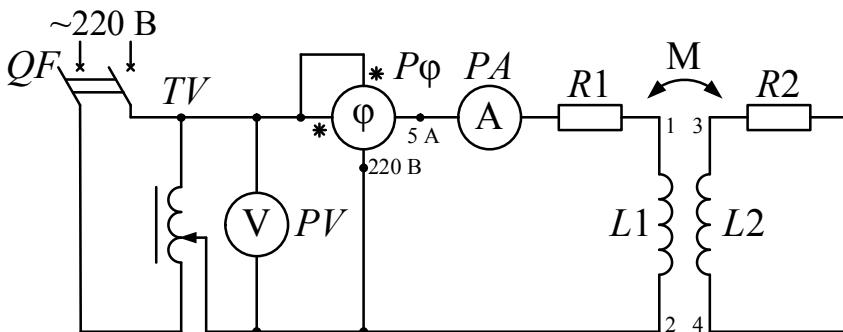


Рис. 15.2. Определение параметров индуктивных катушек

Установить ток в цепи 2 А. После измерения отключить элементы цепи  $R1$ ,  $L1$  и на их место присоединить  $R2$ ,  $L2$ . Результаты измерений внести в табл. 15.1.

Таблица 15.1

Параметры индуктивных катушек

Индуктивная катушка	Измерено			Вычислено			
	$U$ , В	$I$ , А	$\cos \varphi$	$Z$ , Ом	$R$ , Ом	$X_L$ , Ом	$L$ , Гн
№ 1 ( $R1$ , $L1$ )							
№ 2 ( $R2$ , $L2$ )							

4.2. По результатам измерений определить параметры каждой катушки: полное сопротивление  $Z = \frac{U}{I}$ , активное сопротивление  $R = Z \cos \varphi$ , реактивное сопротивление  $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ , индуктивность  $L = \frac{X_L}{\omega}$ .

4.3. Определить взаимную индуктивность  $M$  магнитно-связанных катушек (рис. 15.3):

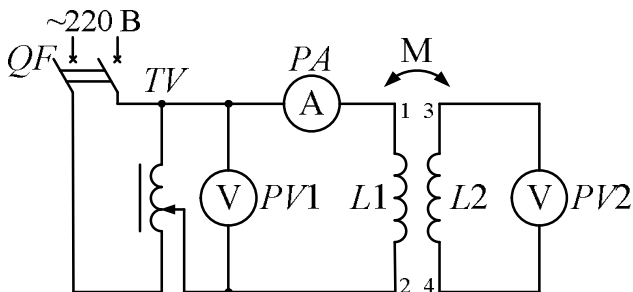


Рис. 15.3. Определение взаимной индуктивности катушек

- установить ток 2 А, результаты измерений записать в табл. 15.2;
- отключить цепь и поменять местами катушки: в первичную цепь включить катушку с зажимами 3–4, во вторичную – с зажимами 1–2 и вновь установить ток 2 А. Измерения записать в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Взаимная индуктивность и коэффициент связи магнитно-связанных катушек

Измерено			Вычислено	Измерено			Вычислено	
$U_{12}$ , В	$U_{34}$ , В	$I$ , А	$M = \frac{U_{34}}{\omega I}$ , Гн	$U_{34}$ , В	$U_{12}$ , В	$I$ , А	$M = \frac{U_{12}}{\omega I}$ , Гн	$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

4.4. По результатам измерений определить взаимную индуктивность  $M$ . Убедиться, что взаимная индуктивность одинакова для обоих опытов. Рассчитать коэффициент связи  $K$ .

4.5. Определить одноименные зажимы, эквивалентную индуктивность и взаимную индуктивность катушек при их последовательном соединении (рис. 15.4):

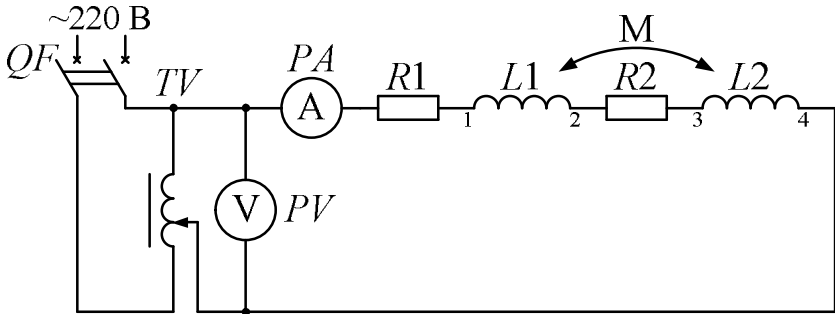


Рис. 15.4. Последовательное соединение индуктивно-связанных катушек

- установить ток 1 А. Данные измерений занести в табл. 15.3;
- отключить цепь, изменить порядок подключения зажимов второй катушки. Установить ток 1 А, данные измерений занести в табл. 15.3.

Таблица 15.3

Последовательное соединение индуктивно-связанных катушек

Номер опыта	Измерено		Вычислено				Включение катушек
	$U$ , В	$I$ , А	$R$ , Ом	$Z$ , Ом	$X$ , Ом	$L_{\text{экв}}$ , Гн	
1							
2							

4.6. По данным табл. 15.3 определить, в каком из опытов было согласное включение и в каком встречное, на схеме рис. 15.4 отметить одноименные зажимы катушек звездочками.

4.7. Вычислить эквивалентную индуктивность последовательно соединенных катушек, для чего определить полное сопротивление  $Z = \frac{U}{I}$ , активное сопротивление  $R = R_1 + R_2$  (значения  $R_1$  и  $R_2$  взять из табл. 15.1), реактивное сопротивление  $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$  и эквивалентную индуктивность  $L_{\text{эkv}} = \frac{X}{\omega}$ .

4.8. Вычислить значение  $M$  по данным согласного и встречного включения

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

4.9. Рассчитать сопротивление взаимной индукции  $X_M = \omega M$ .

4.10. Построить векторные диаграммы для согласного и встречного включения, пользуясь рассчитанными параметрами катушек.

## 5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При выполнении п. 4.10 программы работы за основной вектор рекомендуется принять вектор тока  $I = 1$  А и направить его по действительной оси на комплексной плоскости. Для векторов напряжений рекомендуется масштаб  $m_U = 20$  В/см. Векторы напряжений  $R_1 \dot{I}$  и  $R_2 \dot{I}$  совпадают по направлению с вектором тока  $\dot{I}$ . Векторы  $jX_{L1} \dot{I}$  и  $jX_{L2} \dot{I}$  опережают вектор тока на  $90^\circ$ , а вектор  $\pm jX_M \dot{I}$  опережает на  $90^\circ$  при согласном включении и отстает на  $90^\circ$  от вектора тока при встречном включении катушек. Вектор напряжения  $\dot{U}$  на входе цепи получаем в результате сложения векторов:

$$\dot{U} = R_1 \dot{I} + jX_{L1} \dot{I} \pm jX_M \dot{I} + R_2 \dot{I} + jX_{L2} \dot{I} \pm jX_M \dot{I}.$$

Графические построения выполняются в соответствии с приведенным уравнением на основании данных табл. 15.3.

## 6. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение явления взаимной индукции.
2. Запишите выражение ЭДС взаимной индукции.
3. Что такое взаимная индуктивность, от чего она зависит?
4. Назовите известные способы определения взаимной индуктивности двух магнитно-связанных катушек?
5. Что означает согласное и встречное включение катушек?
6. Какие зажимы магнитно-связанных катушек называются одноименными?
7. Как определяют вид включения катушек (согласное или встречное) по электрической схеме?



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Электронный ресурс] : учебник / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2016. – 702 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – М. : Юрайт, 2014. – 702 с.
3. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов : в 3 ч. / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2008. – Ч. 1. – 353 с.
4. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов : в 3 ч. / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2010. – Ч. 2. – 276 с.
5. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов : в 3 ч. / сост.: А. В. Крутов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – Ч. 3. – 321 с.
6. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс / сост. : А. В. Крутов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2018.
7. Сборник задач по электротехнике и электронике : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по инженерно-техническим специальностям / Ю. В. Бладыко [и др.] ; под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 478 с.
8. Крутов, А. В. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – 2-е изд., стер. – Минск : РИПО, 2016. – 375 с.

### Технические нормативные правовые акты

9. ГОСТ 19880–74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1975-07-01. – Минск : Госстандарт, 2013. – 28 с.
10. ГОСТ 1494–77 (СТ СЭВ 3231–81). Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. – Взамен ГОСТ 1494–61; введ. 1978-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 36 с.

11. ГОСТ 2.710–81 (СТ СЭВ 2182–80) ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах . – Взамен ГОСТ 2.710–75; введ. 1981-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 14 с.

12. ГОСТ 2.723–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушка индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. – Взамен ГОСТ 7624–62 ; введ. 1971-01-01 // Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах [сборник]. – М., 1970. – С. 26–40.

13. ГОСТ 2.728–74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – Взамен ГОСТ 2.728-68, ГОСТ 2.729–68, ГОСТ 2.747–68 ; введ. 1975-07-01. – М. : Издательство стандартов, 2002. – 12 с.

14. ГОСТ 2.755–87 ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – Взамен ГОСТ 2.738–68, ГОСТ 2.755–74 ; введ. 1988-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 21 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

В двух частях

Часть 1

Теория цепей постоянного тока.  
Цепи однофазного синусоидального тока

Составители:

**Крутов** Анатолий Викторович,  
**Крылова** Нина Георгиевна,  
**Гузанова** Татьяна Федоровна и др.

Ответственный за выпуск *В. А. Ковалев*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Корректор *Г. В. Анисимова*  
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 06.08.2021. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 5,27. Тираж 99 экз. Заказ 330.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.