

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания к лабораторным работам

ЧАСТЬ I

Издание второе, переработанное

МИНСК
2007

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине “Теоретические основы электротехники”, часть первая рассмотрены на заседании методической комиссии агроэнергетического факультета и рекомендованы к изданию на ротапринте БГАТУ.

Протокол № 1 от 11.09.2007 г.

Составители: Крутов Анатолий Викторович

Корко Виктор Станиславович

Кочетова Эмма Леонидовна

Гузанова Татьяна Федоровна

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Правила выполнения лабораторных работ.....	4
Правила безопасности при выполнении лабораторных работ.....	6
Лабораторная работа № 1. Законы Кирхгофа. Потенциальная диаграмма электрической цепи.....	9
Лабораторная работа № 2. Цепи постоянного тока.....	14
Лабораторная работа № 3. Линия электропередачи постоянного тока.....	21
Лабораторная работа № 4. Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников.....	24
Лабораторная работа № 5. Разветвленная цепь переменного тока.....	30
Лабораторная работа № 6. Исследование свойств электрических цепей.....	37
Лабораторная работа № 7. Измерение мощности и определение параметров приемника в цепи переменного тока.....	44
Лабораторная работа № 8. Элементы электрических цепей и их математические модели.....	51
Лабораторная работа № 9. Линия электропередачи переменного тока.....	61
Лабораторная работа № 10. Резонанс напряжений.....	66
Лабораторная работа № 11. Резонанс токов и компенсация сдвига фаз.....	71
Лабораторная работа № 12. Исследование электрических цепей с индуктивно-связанными катушками.....	78
Лабораторная работа № 13. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении.....	84
Литература.....	91
Приложения.....	92

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данные методические указания к лабораторным работам составлены в соответствии с программой курса «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и включают в себя работы по теме «Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального токов». 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 коротко 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 находящимися 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 испытываемой цепи. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть переделаны.

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности и периодически ими меняться. При этом все должны активно участвовать в смысле 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. После этого студенты приступают 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 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 напряже-

ния 127, 220 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. 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 электроцепью нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый 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 выключатель и пригласить преподавателя.

7. Во время работы не касаться неизолированных частей электрических

цепей, находящихся под напряжением.

8. Все изменения в цепи проводятся при отключенном выключателе. 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 моральную и дисциплинарную ответственность.

Работа № I

ЗАКОНЫ КИРХГОФА, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГРАММА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

I. 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.

II. 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. I.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. I.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.

ЭДС имеют следующие условные обозначения на схемах  или . Как в первом, так и во втором обозначении ЭДС направлены слева направо (от минуса к плюсу).

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.

III. Описание лабораторной установки

Для исследования цепей постоянного тока на лабораторном стенде имеются набор резисторов и два источника постоянной ЭДС: $E1$ и $E2$. Внешний вид панели стенда показан на рис. I.1.

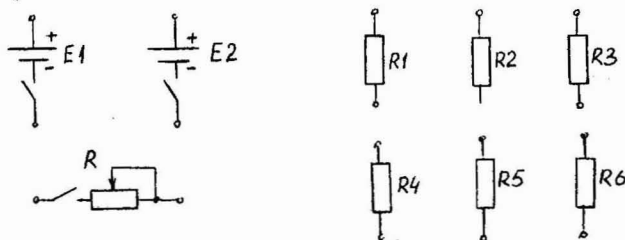


Рис. I.1. Элементы цепи постоянного тока

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. I.2).

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

IV. Программа и методика выполнения работы.

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. I.2. Амперметры подключить левой (отрицательной) клеммой к узлу "с".

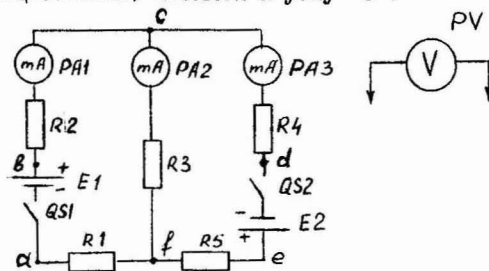


Рис. I.2. Схема сложной цепи постоянного тока.

4.2. Записать значения сопротивлений резисторов.

I.1. Сопротивления резисторов

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

4.3. Убедиться в справедливости первого закона Кирхгофа: $\sum I = 0$.

Включить источники ЭДС, измерить ЭДС и токи. При этом токи амперметров, имеющих отклонение стрелки вправо, записать со знаком плюс, а влево – со знаком минус.

Токи со знаком плюс подходят к узлу "с", со знаком минус отходят от узла "с". Данные измерений занести в таблицу I.2. На схеме электрической цепи указать направления токов в ветвях.

I.2. Проверка первого закона Кирхгофа для узла "с" и расчетные значения токов

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

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

Обходя контур, согласно таблице I.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. I.2.

Знаки перед напряжениями на резисторах расставить согласно направлениям токов в этих резисторах (см. пункт 4.3).

1.3. Проверка второго закона Кирхгофа для контуров электрической цепи

Контур	E_1	E_2	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{R4}	U_{R5}	ΣE	ΣU
	В	В	В	В	В	В	В	В	В
<i>abcdefa</i>					—				
<i>abcfa</i>		—				—	—		
<i>fcdef</i>	—		—	—					

4.5. Измерить и записать в таблицу 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).

1.4. Потенциалы точек электрической цепи

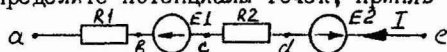
Потенциалы	φ_a	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e	φ_f
Измерено, В						

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 (табл. 1.1., 1.2), рассчитать токи, занести их в таблицу 1.2 и сравнить с измеренными. Отчет должен содержать расчеты по данному пункту.

4.7. Построить потенциальную диаграмму для контура *abcdefa*.

V. Контрольные вопросы

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, приняв $\varphi_a = 0$.



ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

I. Цель работы

Цель работы состоит в экспериментальной проверке эквивалентных преобразований схем электрических цепей, а также в установлении связей между напряжениями и токами при изменении сопротивления одного из элементов цепи.

II. 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).

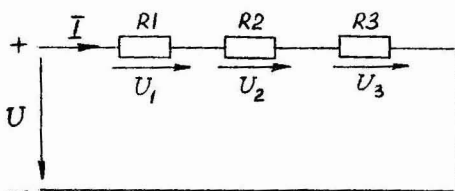


Рис.2.1. Последовательное соединение приемников

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

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

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).

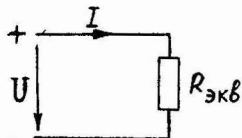


Рис.2.2. Схема эквивалентной электрической цепи

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).

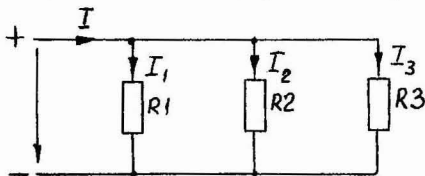


Рис.2.3. Параллельное соединение приемников

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

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

Найденное эквивалентное сопротивление цепи $R_{\text{экв}}$ позволяет заменить цепь с параллельным соединением приемников эквивалентной цепью с одним приемником (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.

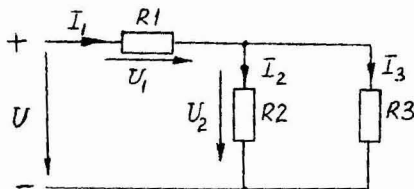


Рис.2.4. Смешанное соединение приемников

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 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)

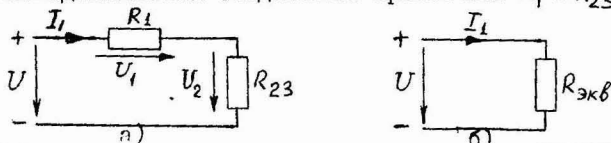


Рис.2.5. Схемы последовательных преобразований цепи рис.2.4

находят эквивалентное сопротивление всей цепи

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

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.

III. Описание лабораторной установки

Объектом исследования являются электрические цепи с одним источником ЭДС EI 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 на 15 В (электронный, цифровой, М 253, М 330).

IV. 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).

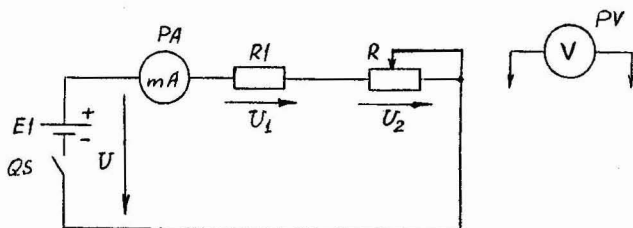


Рис.2.6. Электрическая цепь с последовательным соединением приемников.

2.1. Напряжения и ток при последовательном соединении приемников

Измерено				Рычислено			
U	U_1	U_2	I	R_1	R	$R_{\text{экв}}$	$R_{\text{экв}} = \frac{U}{I}$
В	В	В	мА	Ом	Ом	Ом	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.

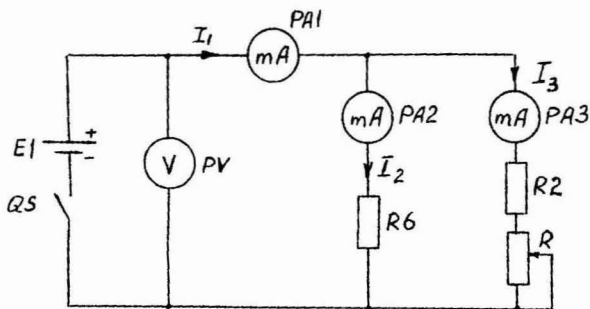


Рис.2.7. Электрическая цепь с параллельным соединением приемников

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

2.2. Напряжение и токи при параллельном соединении приемников

Измерено				Вычислено			
U	I_1	I_2	I_3	R_6	$R_2 + R$	$R_{экв}$	$R_{экв} = \frac{U}{I}$
В	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	Ом

б). По данным опыта проверить соблюдение первого закона Кирхгофа $I_1 = I_2 + I_3$.

в). Построить в одних осях координат графики зависимостей

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

4.3. Смешанное соединение приемников.

а). Собрать схему рис.2.8, измерить токи и напряжения для трех различных значений сопротивления R .

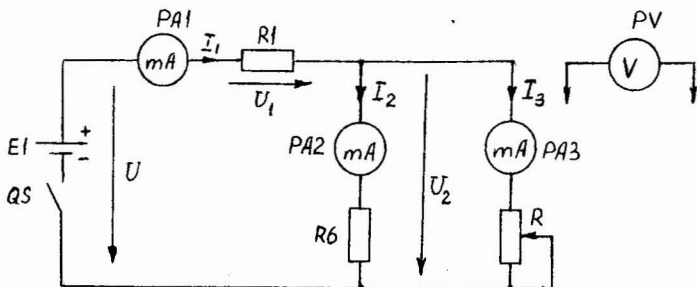


Рис. 2.6 Электрическая цепь со смешанным соединением приемников

2.3. Напряжения и токи при смешанном соединении приемников

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

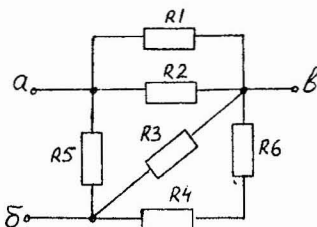
4.4. Руководствуясь законами Ома и Кирхгофа, объяснить, как изменятся токи и падения напряжений в цепи при уменьшении или увеличении одного из сопротивлений при последовательном, параллельном и смешанном соединении приемников.

У. Контрольные вопросы

1. Какое соединение приемников называют последовательным и какое - параллельным?

2. Как определяется эквивалентное сопротивление при последовательном, параллельном и смешанном соединении сопротивлений?

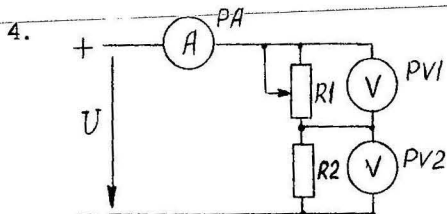
3.



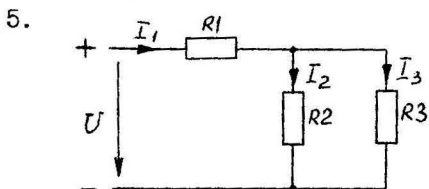
Дано: $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом}$,

$R_4 = R_5 = R_6 = 5 \text{ Ом}$.

Определить эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов $a-\delta$, $\delta-b$.

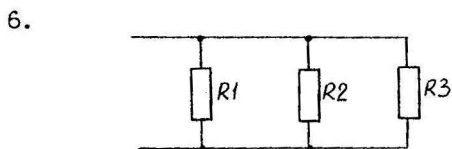


Как изменятся показания приборов при перемещении движка реостата R_1 вниз, если $U = \text{const}$?



Определить токи

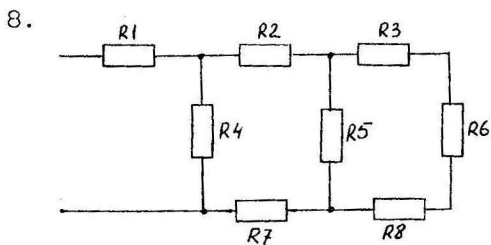
I_1, I_2, I_3 ,
если известно:
 $U = 100 \text{ В}; R_1 = 8 \text{ Ом};$
 $R_2 = 20 \text{ Ом}; R_3 = 30 \text{ Ом}.$



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.



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

Работа № 3

ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

I. Цель работы

Исследование линии электропередачи постоянного тока с переменной нагрузкой.

II. 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).

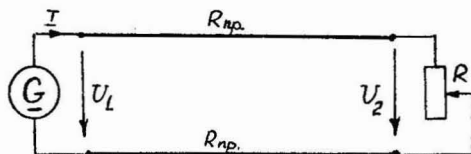


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема линии электропередачи

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: $U_1 = U_2 + R_{лп.} I$,

$R_{лп.} = 2R_{пр.}$ - сопротивление проводов линии.

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 $R \gg R_L$.

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_L}{P_1} = \frac{U_1 I - I^2 R_L}{U_1 I} = 1 - \frac{I R_L}{U_1}.$$

Анализ выражения мощности приемника показывает, что при $R = R_L$ 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_L линии передачи, $I = \frac{U_1}{R_L}$ 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_L . 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 $\Delta P_L = I^2 R_L$.

III. 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. I.1).

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

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Руководствуясь разделами II и III данной работы, составить самостоятельно 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 ΔU_4 и ΔU_5 (всего не менее девяти замеров). Данные измерений свести в таблицу.

4.3. По данным замеров рассчитать сопротивление проводов линии электропередачи $R_{л}$, сопротивление приемника R , мощность источника P_1 , мощность приемника P_2 и КПД линии электропередачи η . Результаты расчетов свести в таблицу. В отчете привести расчетные формулы.

4.4. Построить на одном рисунке графики зависимостей

$$U_2, P_1, P_2, \eta = f(I).$$

У. Контрольные вопросы

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 $P_1 = f(I)$, $P_2 = f(I)$,
 $U_2 = f(I)$, $\eta = f(I)$.

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ

I. Цель работы

Экспериментальная проверка 2-го закона Кирхгофа в цепи переменного тока. Построение векторных диаграмм. Определение сопротивлений по экспериментальным данным.

II. Общие сведения

Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников в общем случае содержит резистивный (R), индуктивный (L) и емкостный (C) элементы (рис. 4. I).

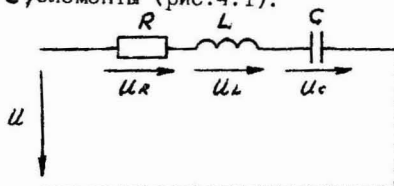


Рис. 4. I. Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников

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

$$U = U_R + U_L + U_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt,$$

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° , напряжение на емкостном элементе $U_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$ отстает по фазе от тока на 90° . 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.

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

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

Это соотношение представляет собой уравнение цепи (рис.4.1), составленное по второму закону Кирхгофа в комплексной форме. В этом уравнении $\dot{U}_R = R\dot{I}$; $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$; $\dot{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I}$.

Из этого уравнения легко получается закон Ома в комплексной форме

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

Выражение, стоящее в знаменателе, есть комплексное сопротивление \underline{Z} цепи с последовательным соединением элементов R, L, C .

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

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

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

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

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

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

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

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 $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$, 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

$$U^2 = R^2 I^2 + (\omega L I - \frac{1}{\omega C} I)^2, \quad \text{откуда } U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

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° , 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° . На векторной диаграмме (рис.4.2) начальная фаза тока \dot{I} принята равной нулю и вектор тока \dot{I} совпадает с действительной осью комплексной плоскости $I = I$. Тогда $\dot{U}_R = U_R$, $\dot{U}_L = jU_L$, $\dot{U}_C = -jU_C$.

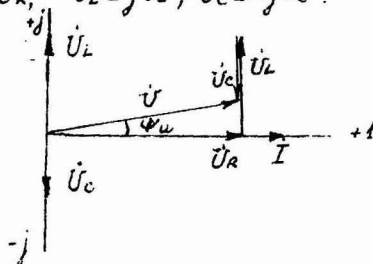


Рис.4.2 Векторная диаграмма

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 ψ_u . В данном случае $\psi_u = \varphi$, поскольку $\psi_i = 0$.

III. Описание лабораторной установки

Для исследования цепей переменного тока на лабораторном стенде имеется набор резисторов R_1, R_2, R_3 , две индуктивные катушки L_1 и L_2 , одна L_1 с зажимами 1 – 2 и вторая L_2 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.4.3).

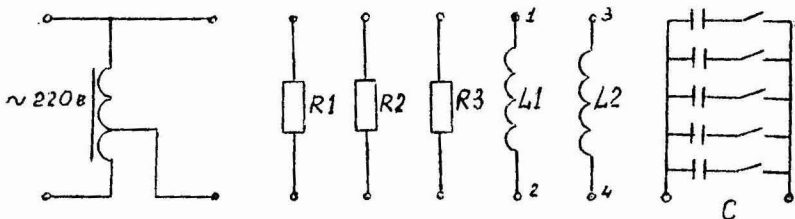


Рис.4.3 Элементы лабораторного стенда для исследования цепей переменного тока

Для измерения синусоидальных токов на стенде имеются амперметры с пределами измерений $I - 2 \text{ A}$.

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 $75 - 600 \text{ В}$ - 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.4.4). Лабораторный автотрансформатор TV предназначен для плавного регулирования напряжения.

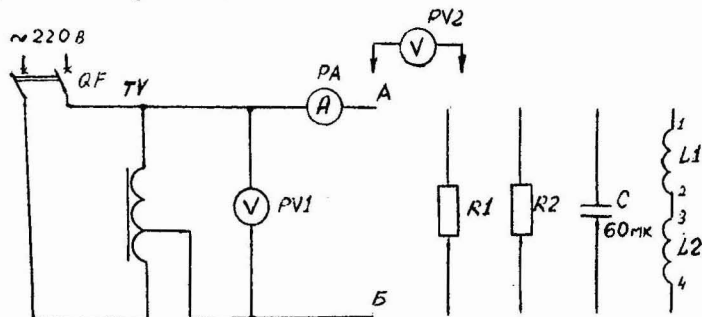


Рис.4.4. Схема электрической цепи с последовательным соединением приемников

$PV1$ - вольтметр 250 В ,
 $PV2$ - вольтметр 600 В ,
 PA - амперметр 2 A .

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.4.4., подключив к зажимам AB последовательно соединенные резисторы $R1$ и $R2$. Установить напряжение на входе цепи такое, чтобы ток в цепи равнялся

$I = 1 \text{ A}$, произвести измерения и данные занести в таблицу 4.1.

Аналогично провести измерения в цепях с другими последовательно соединенными элементами, согласно таблице 4.1.

4.1. Ток и напряжения цепи

Элементы, составляющие цепь	Измерено						
	I	U	U_{R1}	U_{R2}	U_{L1}	U_{L2}	U_C
	A	B	B	B	B	B	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 таблицу 4.2.

4.2. Значения сопротивлений элементов цепи

R_1	R_2	X_{L1}	X_{L2}	X_C
Ом	Ом	Ом	Ом	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 $\psi_c = 0$, $\dot{I} = I$, записать измеренные напряжения на элементах цепи в комплексной форме. По этим напряжениям определить комплексное напряжение на входе цепи, основываясь на втором законе Кирхгофа $\vec{U} = \vec{U}_{R1} + \vec{U}_{L1} + \vec{U}_{L2} + \vec{U}_C$. Найти модуль комплексного напряжения U , сравнить его с измеренным и убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа. Данные расчетов занести в соответствующую строку таблицы 4.3.

4.3. Расчетные значения напряжений и сопротивлений

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

4.4. Построить векторные диаграммы для каждого пункта табл. 4.1.

На векторных диаграммах указать угол φ .

У. Методические указания к обработке результатов эксперимента

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

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

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

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

У1. Контрольные вопросы

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.

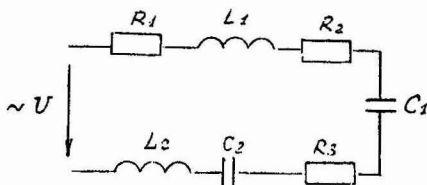
5. Чему равны реактивное, емкостное и индуктивное сопротивления ?

6. Как рассчитывается угол φ ?

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

8. Объясните построение векторных диаграмм в вашей работе.

9.



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

Определить Z, Z, I, φ ,
 построить векторную диаграмму тока и напряжений на каждом элементе цепи.

РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

I. Цель работы

Экспериментальная проверка законов Кирхгофа в цепи переменного тока. Построение векторных диаграмм. Определение сопротивлений по экспериментальным данным.

II. 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 (рис.5.1). Пусть сопротивления приемников равны

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

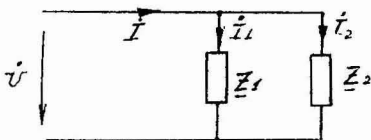


Рис.5.1. Параллельное соединение приемников

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

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad \text{или} \quad \underline{Y} = \frac{1}{Z} e^{j\varphi} = Y e^{j\varphi} = Y \cos\varphi - j Y \sin\varphi = g - j\mathcal{B},$$

где g - активная проводимость,

\mathcal{B} - реактивная проводимость,

Y - полная проводимость.

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

Закон Ома при использовании проводимости имеет вид:

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{U} \quad \text{или} \quad \underline{I} = (g - j\mathcal{B}) \underline{U}.$$

Для цепи, представленной на рис.5.1,

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

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

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \quad \underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{Y}_1 \underline{U} + \underline{Y}_2 \underline{U}$$

Откуда общая комплексная проводимость цепи с параллельным соединением приемников

$$Y = Y_1 + Y_2; \quad Y = (g_1 + g_2) - j(b_1 - b_2) = g - j\beta,$$

где $g = g_1 + g_2$; $b = b_1 - b_2$.

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

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{Y_1 + Y_2} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

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 φ

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

Угол φ_2 будет отрицательным. Затем определяют начальную фазу тока $\psi_{i_1} = \psi_u - \varphi_1 = -\varphi_1$; $\psi_{i_2} = \psi_u - \varphi_2 = -\varphi_2$.

Токи в комплексной форме имеют вид:

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{j\psi_{i_1}}, \quad \dot{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2} \quad - \text{показательная форма записи}$$

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

В последних выражениях $I_1' = I_1 \cos \varphi_1$; $I_1'' = I_1 \sin \varphi_1$; $I_2' = I_2 \cos \varphi_2$; $I_2'' = I_2 \sin \varphi_2$.

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.

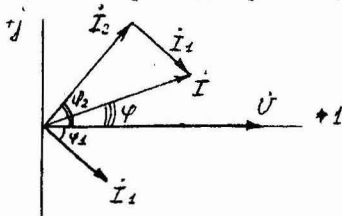


Рис.5.2. Векторная диаграмма напряжения и токов

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 φ_1 положи-

тельный, а вектор тока \dot{I}_2 сдвинут относительно вектора напряжения \dot{U} против часовой стрелки (опережает), так как угол φ_2 отрицательный.

Цепь со смешанным соединением приемников

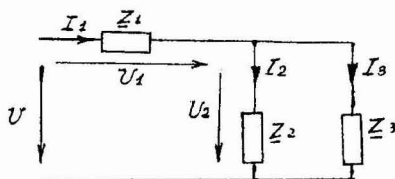


Рис.5.3. Цепь со смешанным соединением приемников

Токи в цепи со смешанным соединением приемников рассчитываются путем преобразования схемы. Заменяем параллельно соединенные приемники одним эквивалентным с проводимостью $\underline{Y}_{2,3} = \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3$ или с сопротивлением $\underline{Z}_{2,3} = \frac{1}{\underline{Y}_{2,3}}$. После этого преобразования схема состоит из двух последовательно соединенных участков с сопротивлениями \underline{Z}_1 и $\underline{Z}_{2,3}$. Общее сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2,3}; \quad \underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}$$

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.

III. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служат цепи с параллельным соединением приемников (рис.5.4 а,б) и цепи со смешанным соединением приемников (рис.5.4 с). Каждая из этих цепей поочередно подключается к зажимам "А" и "В" (рис.5.4). Емкость конденсатора С для каждой схемы равна 60 мкФ. Лабораторный автотрансформатор TV предназначен для регулирования напряжения на входе цепи.

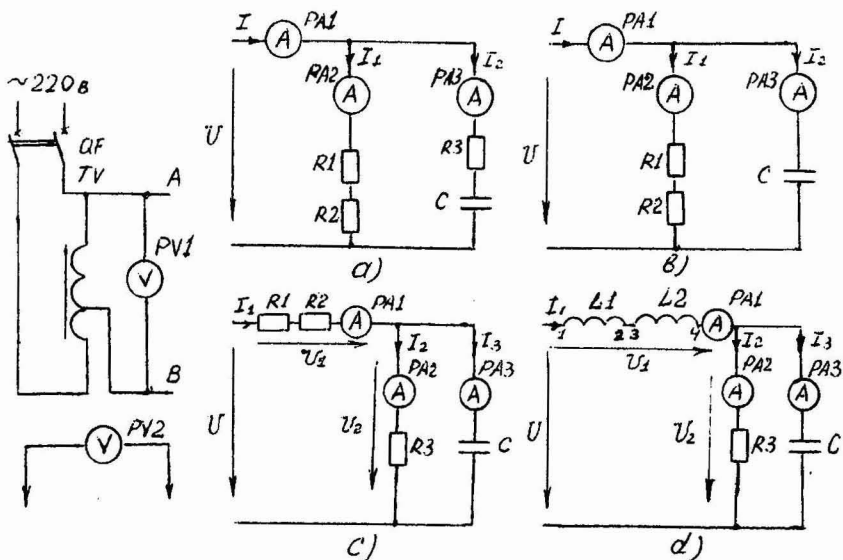


Рис.5.4. Схемы электрических цепей с параллельным и со смешанным соединением приемников

PA1, PA2, PA3 амперметры 2 А.

PV1 - вольтметр 250 В

PV2 - вольтметр 600 В.

IV. Программа и методика выполнения работы

Параллельное соединение приемников

4.1. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением приемников по схеме рис.5.4.а.

Установить напряжение на входе цепи $U = 60\text{ В}$. Произвести измерения и данные занести в таблицу 5.1.

4.2. В схеме цепи рис.5.4.а исключить резистор *R3*, оставив во второй ветви только конденсатор *C* (рис.5.4.в), произвести измерения и данные занести в таблицу 5.1.

5.1. Напряжения и токи на элементах цепи с параллельным соединением приемников

Схема	Измерено							
	U	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_C	I	I_1	I_2
	B	B	B	B	B	A	A	A
а)								
в)								

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

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{j\psi_1}; \quad \dot{I}_2 = I_2 e^{j\psi_2}$$

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 измеренным и убедиться в справедливости первого закона Кирхгофа.

Данные вычислений занести в таблицу 5.2. Проведенные расчеты привести в отчете.

5.2. Расчетные значения сопротивлений и токов цепи с параллельным соединением приемников.

Схема	Z_1	Z_2	Z	Z	$Z = \frac{U}{I}$	\dot{I}_1	\dot{I}_2	\dot{I}	I
	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	A	A	A	A
а)									
в)									

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

Смешанное соединение приемников

4.5. Собрать цепь со смешанным соединением приемников (рис. 5.4.с). Установить напряжение на входе цепи $U = 150$ В. Произвести измерения и данные занести в таблицу 5.3.

4.6. В схеме цепи рис. 5.4.с два последовательно соединенные резистора $R1$ и $R2$ заменить двумя последовательно соединенными индуктивными катушками $L1$ и $L2$ (рис. 5.4.д). Произвести измерения и данные занести в таблицу 5.3.

5.3. Токи, напряжения и сопротивления цепи при смешанном соединении приемников

СХЕ МА	Измерено						Вычислено					
	U	U_1	U_2	I_1	I_2	I_3	Z_1	Z_2	Z_3	Z	Z	$Z = \frac{U}{I}$
	В	В	В	А	А	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
с)												
д)												

4.7. По экспериментальным данным найти Z_1, Z_2, Z_3, Z и Z . Сравнить полное сопротивление со значением полного сопротивления, полученного из 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 U_2 равной нулю $\psi_{u_2} = 0$, 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 $-\psi_2$ и $-\psi_3$. 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 тока \dot{I}_1 на угол ψ_1 . Сложив векторы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , получим вектор напряжения $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$.

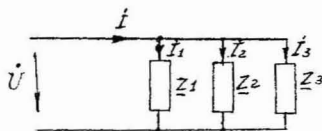
Рассматриваемые цепи представлены элементами R, L, C , поэтому угол сдвига фаз напряжения и тока каждой ветви находится лег-

ко: для элемента R $\varphi = 0$, для элемента L $\varphi = 90^\circ$ и для элемента C $\varphi = -90^\circ$.

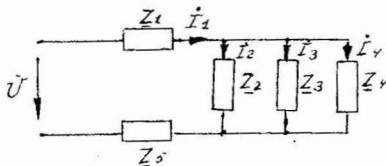
Рекомендуется масштаб напряжения $m_U = 20 \frac{V}{cm}$, масштаб тока $m_I = 0,4 \frac{A}{cm}$.

VI. Контрольные вопросы

1. Чему равен угол сдвига фаз напряжения и тока на резистивном, индуктивном и емкостном элементах ?
2. Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа в комплексной форме.
3. Запишите закон Ома при использовании комплексной проводимости.
4. Как определяются комплексная и полная проводимости цепи ?
5. Чему равны активная, реактивная, индуктивная и емкостная проводимости цепи с последовательным соединением элементов R, L, C ?
6. Как определяется угол сдвига фаз напряжения и тока φ ?
7. Расскажите порядок расчета токов в цепи со смешанным соединением приемников.
8. Объясните порядок построения векторных диаграмм в данной работе.
9. Дано: \dot{U} , Z_1 , Z_2 , Z_3 .
Определить токи. Задачу решить в общем виде.



10. Дано: \dot{U} , Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 .
Определить токи. Задачу решить в общем виде.



ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

I. Цель работы

Экспериментальная проверка справедливости принципа наложения, принципа эквивалентного генератора и принципа взаимности.

II. 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 исследование ее. Эти свойства часто именуется теоремами или принципами. К ним относятся принцип наложения, принцип компенсации, принцип эквивалентного генератора, принцип взаимности, принцип линейности 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 Z 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) \dot{U}_{abx} , и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению Z_{bx} цепи относительно зажимов a и b при разомкнутой ветви ab и замкнутых накоротко источниках ЭДС.

Ток \dot{I} в ветви ab в схеме цепи с эквивалентным генератором (рис. 6.1) находится из выражения
$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_{abx}}{Z_{bx} + Z}$$

Напряжение \dot{U}_{abx} и входное сопротивление Z_{bx} определяются экспериментальным или расчетным путем.

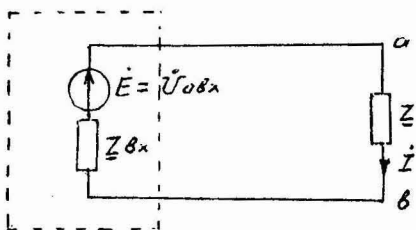


Рис. 6. I. Схема цепи с эквивалентным генератором

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 \dot{U}_{abx} и Z_{bx} расчетным путем ветвь ab с сопротивлением Z размыкают и рассчитывают токи в изменившейся цепи. Затем выбирают контур, в который входило бы напряжение \dot{U}_{abx} на месте разрыва ветви ab , и составляют уравнение по второму закону Кирхгофа. Из этого уравнения и определяют \dot{U}_{abx} . Входное сопротивление цепи Z_{bx} относительно зажимов a и b при разомкнутой ветви ab и замкнутых накоротку источниках ЭДС определяется, как правило, путем последовательных преобразований схемы цепи, то есть аналогично нахождению $Z_{экв}$. При определении \dot{U}_{abx} и Z_{bx} опытным путем выполняют два опыта.

1) Опыт холостого хода. Ветвь ab размыкают и измеряют напряжение \dot{U}_{abx} на зажимах a и b .

2) Опыт короткого замыкания. Сопротивление ветви ab замыкают накоротко и измеряют в этой ветви ток короткого замыкания \dot{I}_k . Как видно из схемы рис. 6. I, ток \dot{I}_k определяется выражением

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}_{abx}}{Z_{bx}}. \text{ Откуда следует, что } Z_{bx} = \frac{\dot{U}_{abx}}{\dot{I}_k}$$

Принцип взаимности.

Если ЭДС $E_{ab} = \dot{E}_1$, действуя в ветви ab сколь угодно сложной цепи при отсутствии в цепи прочих ЭДС, вызывает в другой ветви cd этой цепи ток $\dot{I}_{cd} = \dot{I}_1$, то такая же ЭДС $E_{cd} = \dot{E}_1$, действуя в ветви cd при отсутствии прочих ЭДС, вызовет в ветви ab такой же ток $\dot{I}_{ab} = \dot{I}_1$.

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 $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_3$. Исходя из принципа наложения, ток в первой ветви будет равен $\dot{I}_1 = \dot{I}_1^{(1)} + \dot{I}_1^{(2)} + \dot{I}_1^{(3)}$. Здесь верхний индекс в скобках показывает, под действием какой ЭДС возникает ток.

Если в цепи оставить только одну ЭДС \dot{E}_1 , а \dot{E}_2 и \dot{E}_3 принять равными нулю, но сохранить их внутренние сопротивления, то токи в ветвях $\dot{I}_1^{(1)}, \dot{I}_2^{(1)}, \dot{I}_3^{(1)}$ найдутся достаточно просто, так как в цепи действует только одна ЭДС \dot{E}_1 . Если эту ЭДС \dot{E}_1 перенести из I-й ветви во вторую, то в первой ветви, согласно принципу взаимности, будет ток равный $\dot{I}_2^{(1)}$, но в действительности во второй ветви действует ЭДС на \dot{E}_2 , а \dot{E}_2 , которая в $\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}$ раз больше ЭДС \dot{E}_1 , следовательно, и составляющая тока первой ветви от ЭДС \dot{E}_2 в $\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}$ раз больше, то есть $\dot{I}_1^{(2)} = \dot{I}_2^{(1)} \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}$. Аналогично составляющая тока первой ветви от ЭДС \dot{E}_3 будет равна $\dot{I}_3^{(1)} \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_1}$. Истинный ток первой ветви будет равен алгебраической сумме составляющих $\dot{I}_1 = \dot{I}_1^{(1)} + \dot{I}_1^{(2)} + \dot{I}_1^{(3)} = \dot{I}_1^{(1)} + \dot{I}_2^{(1)} \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} + \dot{I}_3^{(1)} \frac{\dot{E}_3}{\dot{E}_1}$.

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 \dot{E}_1 . В противном случае ставят знак минус.

III. Описание лабораторной установки

Объектом исследования является сложная электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками ЭДС в разных ветвях (рис.6.2). Элементы, из которых составляется электрическая цепь, расположены на панелях стенда, внешний вид которых показан на рис.1.4. (в описании работы № I).

Для измерения токов необходимо использовать амперметры на 100-150 мА, для измерения напряжений - вольтметр М253 или М 330 на 15 В.

-IV.-Программа и методика выполнения
работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.6.2. Амперметры левой (отрицательной) клеммой присоединить к узлу "с".

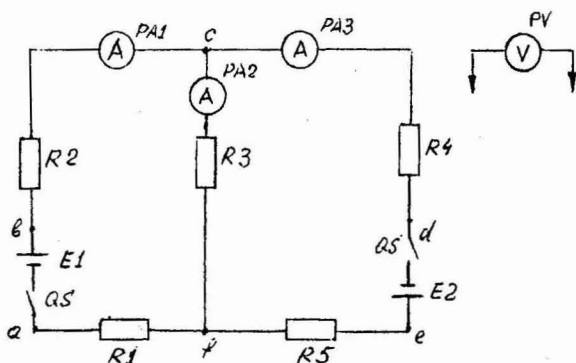


Рис.6.2. Схема сложной цепи постоянного тока.

4.2. Выписать с панели стенда значения сопротивлений резисторов.

6.1. Сопротивления резисторов

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

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.

6.2. Значения ЭДС и токов цепи

Измерено				
E_1	E_2	I_1	I_2	I_3
В	В	мА	мА	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 таблицу 6.3.

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 "e" на зажим "a". Включить источник ЭДС E_2 и измерить токи с учетом знаков. Данные измерений занести в таблицу 6.3.

6.3. Значение токов при исследовании принципа наложения

Порядок действий	Частичные токи					
	Измерено			Вычислено		
	I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
	mA	mA	mA	mA	mA	mA
Включена E_1						
Включена E_2						
Алгебраически сложить частичные токи						
Записать истинные токи из таблицы 6.2.						

в) Убедиться в справедливости принципа наложения.

г) Рассчитать токи в ветвях по методу наложения и сравнить их с результатами измерений (таблица 6.3). 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 рис.6.2. Разомкнуть ветвь с резистором R_3 . Измерить напряжение $U_{сфх}$.

б) Восстановить исходную цепь, замкнуть накоротко резистор R_3 в ветви $сф$. Измерить амперметром PA_2 ток I_k .

в) По результатам измерений определить

$$R_{bx} = \frac{U_{cfk}}{I_k}$$

г) Вычислить ток в ветви "cf" через U_{cfk} и R_{bx} при заданном R_3 и сравнить его с результатом измерения тока I_2 (таб.6.2).

4.6. Определение параметров эквивалентного генератора расчетным путем:

а) начертить схему с разомкнутой ветвью "cf";

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

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

г) определить ток I_2 , сравнить его величину с замеренной.

Схемы цепей и расчеты привести в отчете.

4.7. Проверка принципа взаимности.

а) Восстановить исходную цепь (рис.6.2). Отключить от цепи источник ЭДС E_2 , для чего перенести конец проводника с зажима e на зажим d . Измерить и записать токи $I_1^{(1)}$; $I_2^{(1)}$; $I_3^{(1)}$ при включенной ЭДС E_1 .

б) Перенести источник ЭДС E_1 в ветвь cf (рис.6.3). Измерить и записать токи $I_1^{(2)}$; $I_2^{(2)}$; $I_3^{(2)}$

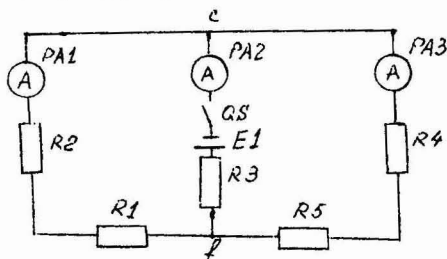


Рис.6.3. Проверка принципа взаимности

в) Сравнить ток $I_2^{(1)}$ из пункта 4.7, а) и ток $I_1^{(2)}$ из пункта 4.7б) и убедиться в справедливости принципа взаимности.

г) Используя принцип наложения и принцип взаимности, рассчитать ток I_1 исходной цепи (рис.6.2) при действии обеих ЭДС E_1 и E_2 по значению токов в ветвях при действии только одной ЭДС E_1 (пункт 4.7а), воспользовавшись выражением

$$I_1 = I_1^{(1)} + I_2^{(1)} \frac{E_{2d}}{E_{1d}} + I_3^{(1)} \frac{E_{3e}}{E_{1d}}$$

В этом выражении E_{1d} ; E_{2d} ; E_{3e} - ЭДС соответствующих ветвей.

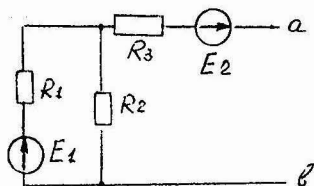
Для рассматриваемой цепи (рис.6.2) $E_{1b} = E_1$, $E_{2b} = 0$, $E_{3b} = E_2$.
 Значения ЭДС E_1 и E_2 взять из таблицы 6.2.

Сравнить значение тока I_1 с данными эксперимента (таблица 6.2).

У. Контрольные вопросы

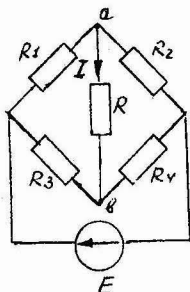
1. В чем состоит принцип наложения ?
2. Каков порядок расчета токов методом наложения ?
3. Каков порядок расчета тока в ветви по методу эквивалентного генератора ?
4. Каков порядок опытного определения величины ЭДС и внутреннего сопротивления эквивалентного генератора, замещающего активный двухполюсник ?

5.



Дано: $E_1 = E_2 = 10 \text{ В}$;
 $R_1 = R_2 = R_3 = 5 \text{ Ом}$.
 Определить величину ЭДС и внутреннее сопротивление генератора, эквивалентного заданной схеме, относительно зажимов a b .

6.



Дано: $E = 100 \text{ В}$;
 $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$;
 $R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$;
 $R = 1 \text{ Ом}$.

Определить ток I в сопротивлении R по методу эквивалентного генератора.

7. В чем состоит принцип взаимности ?

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПРИЕМНИКА В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА

I. Цель работы

Изучение схем измерения и методов расчета активной, реактивной и полной мощностей и параметров приемника в цепи синусоидального тока.

II. Общие сведения

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

$$u = U_m \sin \omega t,$$

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

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

$$p = u i = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi).$$

Из полученного выражения видно, что мгновенная мощность состоит из двух составляющих: постоянной $UI \cos \varphi$ и переменной $UI \cos(2\omega t - \varphi)$. Мгновенная мощность положительна, когда у напряжения u и тока i одинаковые знаки, т.е. когда действительные направления напряжения и тока в цепи одинаковы. Мгновенная мощность p отрицательна, когда у напряжения и тока разные знаки, т.е. когда действительные направления напряжения и тока в цепи противоположны.

Когда мгновенная мощность p положительна, энергия поступает от источника в приемник, когда мгновенная мощность отрицательна, энергия возвращается из приемника источнику. Такой возврат энергии источнику питания возможен в цепи, содержащей индуктивность L и емкость C , так как энергия периодически запасается в магнитных и электрических полях этих элементов цепи.

Мгновенная мощность дает наиболее полную характеристику энергетических процессов цепи.

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 $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{g}{Y}$, то активная мощность может иметь еще следующие выражения:

$$P = I^2 R = U^2 g.$$

Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

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

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

Для выяснения понятия реактивной мощности рассмотрим цепь переменного тока с катушкой без активного сопротивления, т.е. с чистой индуктивностью. В такой цепи отсутствует необратимое преобразование электрической энергии в теплоту, в то же время включенная в цепь катушка представляет собой элемент с концентрированным магнитным полем. Так как магнитное поле переменное, то в моменты его нарастания цепь поглощает энергию, а в моменты убывания поля энергия возвращается обратно источнику. Таким образом, в такой цепи имеет место процесс обмена энергией между приемником и источником.

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

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

$$Q = I^2 X = U^2 b.$$

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. $\cos \varphi = 1$.

Так как $U = Z \cdot I$, $I = YU$, то $S = I^2 Z = U^2 Y$.

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. 7.1).

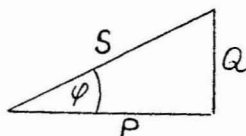


Рис. 7.1. Треугольник мощностей

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 $X < 0$, если $X_L < X_C$.

III. 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 . Токосодержащая катушка включается в цепь последовательно, подобно амперметру, её 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, а $\angle \dot{U} \dot{I}$ – 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 $P = n_{изм.} C_w$, где $n_{изм.}$ - число делений шкалы, указываемое стрелкой прибора.

Фазометр - прибор для измерения угла φ 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.

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.7.2.

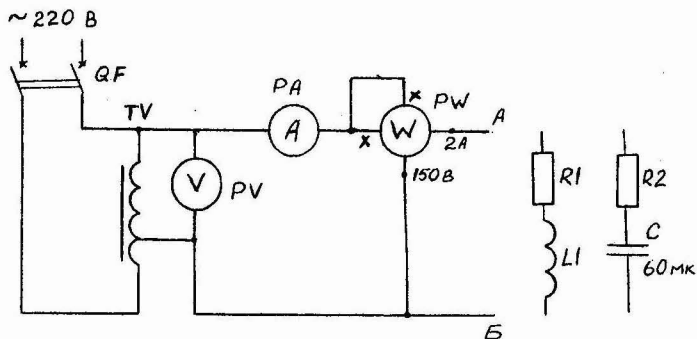


Рис. 7.2 Схема электрической цепи для измерения мощности и параметров приемника

PV - вольтметр, 250 В;
 PA - амперметр, 2 А ;
 PW - многопредельный ваттметр;
 TV - автотрансформатор.

4.2. Подключая к зажимам AB 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 таблицу 7.1.

7.1. Измерение мощности и параметров приемников с помощью ваттметра

Приемник	Измерено			Вычислено				
	I	U	P	S	Q	Z	R	X
	А	В	Вт	ВА	вар	Ом	Ом	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 напряжению 220 В. Переключатель прибора "генератор – приемник" должен быть в положении "приемник".

4.4. Повторить пункт 4.2. программы. Записать показания приборов в таблицу 7.2. Угол φ следует записывать с учетом знака:
 $\varphi_{\text{инд.}} > 0$, $\varphi_{\text{емк.}} < 0$.

7.2. Измерение мощности и параметров приемников с помощью фазометра

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

У. Контрольные вопросы

1. Чему равна мгновенная мощность цепи переменного тока ?
2. Чему равна активная мощность ?
3. Как определяются реактивная и полная мощности ?
4. Какова разница между активной, реактивной и полной мощностями ? В каких единицах они измеряются ?
5. Дано: $i = 5 \sin \omega t$ А, $u = 100 \sin(\omega t + 30^\circ)$ В.
Определить активную и реактивную мощности .
6. Чему равен коэффициент мощности ?

УІ. Приложение

Устройство для измерения реактивной мощности однофазных приемников.

Реактивная мощность однофазной цепи может быть измерена ваттметром электродинамической системы. Известно, что угол отклонения α стрелки ваттметра пропорционален произведению трех величин $UI \cos(\angle \dot{U} \dot{I})$. Это произведение не всегда выражает активную мощность, все зависит от фазового соотношения между током и напряжением. Если, например, изменить фазу напряжения на 90° , то ваттметр измерит реактивную мощность приемника. Для обеспечения такого сдвига фаз применен фазовращатель напряжения, схема цепи которого приведена на рис.7.3а.

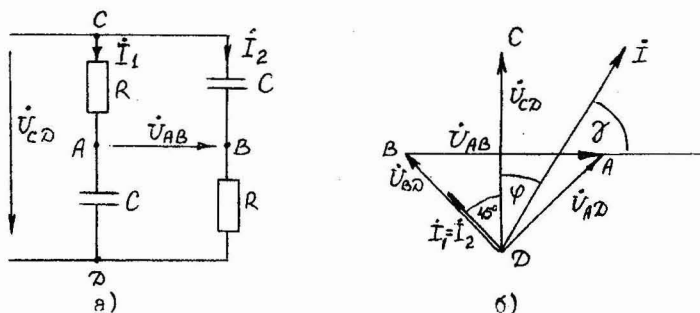


Рис.7.3 Схема фазовращателя напряжения (а) и топографическая векторная диаграмма (б)

Если построить топографическую векторную диаграмму цепи (рис. 7.3, б), то окажется, что при $R=X_C$ напряжение U_{AB} равно напряжению U_{CD} , но сдвинуто относительно его на угол 90° . Угол $\gamma = 90^\circ - \varphi$ а $\cos \gamma = \cos(90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$. Отсюда показание ваттметра, включенного по схеме рис. 7.4, равно произведению $U_{AB} I \cos \gamma = U_{AB} I \sin \varphi$, т.е. реактивной мощности Q .

УП. Задание по УИРС

Использование ваттметра в качестве измерителя реактивной мощности.

7.1. Ознакомиться с устройством для измерения реактивной мощности однофазного приемника.

7.2. Собрать цепь по схеме рис. 7.4.

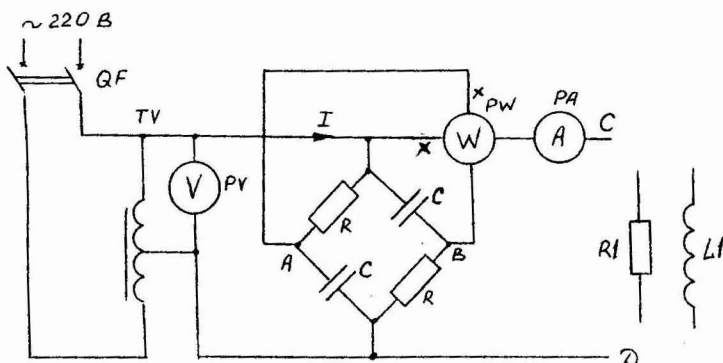


Рис. 7.4. Схема электрической цепи для измерения реактивной мощности

Элементы мостового фазовращателя напряжения смонтированы на переносной панели.

7.3. Подключая поочередно к зажимам CD резистор и индуктивную катушку LI , убедиться, что при подключении резистора стрелка устанавливается у отметки 0, а при подключении индуктивной катушки ваттметр измеряет реактивную мощность.

Работа № 8

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

I. Цель работы

Исследование параметров резисторов, индуктивных катушек и конденсаторов. Схемы замещения и математические модели этих элементов.

II. Общие сведения

Для того чтобы упростить исследование процессов в реальной электрической цепи, её заменяют схемой замещения, составленной из резистивных, индуктивных и емкостных элементов.

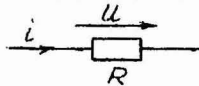
Резистивный элемент – это идеализированный элемент схемы электрической цепи, в котором электрическая энергия преобразуется в теплоту. Параметром, характеризующим резистивный элемент, является сопротивление R , Ом.

Индуктивный элемент – это идеализированный элемент схемы электрической цепи, в котором накапливается энергия магнитного поля. Параметром, характеризующим индуктивный элемент, является индуктивность L , Гн.

Емкостный элемент – это идеализированный элемент схемы электрической цепи, в котором накапливается энергия электрического поля. Параметром, характеризующим емкостной элемент, является емкость C , Ф.

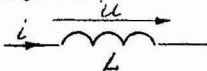
Связь между током и напряжением на элементах имеет следующий вид.

Для резистивного элемента



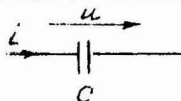
$$u = Ri$$

Для индуктивного элемента



$$u = L \frac{di}{dt}$$

Для емкостного элемента



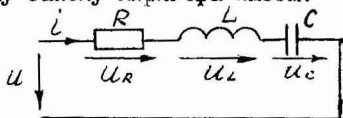
$$u = \frac{1}{C} \int i dt$$

Математическая связь между током и напряжением на элементе есть математическая модель этого элемента.

Любая ветвь схемы электрической цепи содержит хотя бы один из рассмотренных элементов.

Система уравнений, составленных по законам Кирхгофа для данной цепи, является математической моделью этой цепи.

Например, для последовательной цепи R , L , C согласно 2-му закону Кирхгофа имеем:



$$U_R + U_L + U_C - U = 0$$

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U$$

Полученное уравнение есть математическая модель этой цепи. Если цепь разветвленная, то количество уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, должно равняться числу ветвей цепи.

При переменном токе любое электротехническое устройство характеризуется тремя параметрами R , L , C , поскольку в этом устройстве будут в наличии тепловые потери, переменное магнитное поле и переменное электрическое поле. Кроме того, если отдельные части устройства связаны взаимной индукцией, то в число параметров войдет еще взаимная индуктивность M .

В то же время такие элементы электрических цепей как резистор, индуктивная катушка и конденсатор при низкой частоте, куда относится и промышленная частота 50 Гц, могут быть приближенно охарактеризованы одним параметром. Влияние остальных параметров на электромагнитные процессы в этих элементах незначительно. В этом случае резистор можно рассматривать как резистивный элемент, индуктивную катушку – как индуктивный элемент, конденсатор – как емкостной элемент. Соответственно этому математической моделью резистора будет выражение $U = Ri$; индуктивной катушки – $U = L \frac{di}{dt}$; конденсатора $U = \frac{1}{C} \int i dt$.

Данная лабораторная работа ставит своей целью исследование правомочности таких допущений.

Резистор

Резистор есть элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления R . Резистор чаще всего изготавливают из провода, намотанного на изолирующее

основание. Материал провода имеет, как правило, высокое удельное сопротивление ρ . Сопротивление провода длиной l и поперечным сечением S (рис.8.1) находится из выражения $R = \rho \frac{l}{S}$.

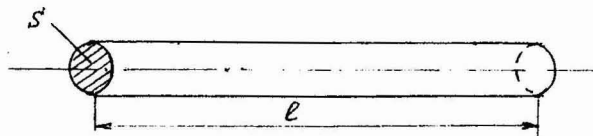


Рис.8.1. Провод

На сопротивление проводника влияет частота тока. С ростом частоты ток распределяется по сечению проводника неравномерно: внутри плотность тока уменьшается, ток вытесняется к поверхности проводника, что вызывает как бы уменьшение сечения проводника, а значит, увеличение сопротивления. Это явление носит название поверхностного эффекта. Неравномерность распределения тока по сечению проводника происходит также под влиянием тока, проходящего по соседнему проводнику. Это явление носит название эффекта близости. По этим причинам сопротивление проводника переменному току (активное сопротивление) выше, чем сопротивление этого же проводника постоянному току. Увеличение сопротивления проводника за счет поверхностного эффекта и эффекта близости заметно при весьма высоких частотах.

Применяемые на практике проволочные резисторы обладают всегда некоторой индуктивностью, и, кроме того, между отдельными витками имеется емкость. При достаточно низких частотах емкость резистора практически никакого влияния не имеет и в расчетах не учитывается, часто пренебрегают и индуктивностью.

Схемы замещения резистора имеют вид, представленный на рис.8.2

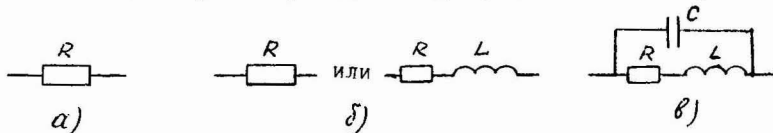


Рис.8.2.Схемы замещения резистора при а) постоянном токе, б) низких частотах, в) высоких частотах

Индуктивная катушка

Индуктивная катушка есть элемент электрической цепи, предназначенный для использования его индуктивности.

Индуктивная катушка представляет собой несколько круговых витков провода, по которому проходит ток (Рис.8.3). Материал провода имеет, как правило, малое удельное сопротивление ρ , и индуктивная катушка обладает малым активным сопротивлением R . При постоянном токе напряжение на зажимах катушки определится падением напряжения на сопротивлении провода катушки и ток во всех точках будет одинаковый.

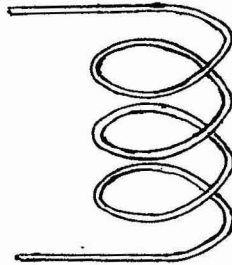


Рис.8.3. Индуктивная катушка

При переменном токе изменяющееся магнитное поле, вызываемое собственным током, будет наводить в витках ЭДС самоиндукции. Между витками, так же как между отдельными точками смежных витков, электрическое поле станет переменным, и через диэлектрик, окружающий витки, будет проходить ток смещения. Чем выше частота переменного тока, тем больше будут ЭДС самоиндукции и ток смещения. Следовательно, схема замещения индуктивной катушки при переменном токе должна содержать помимо сопротивления R индуктивность L и емкость C .

При низких частотах током смещения, то есть емкостью, можно пренебречь.

При не очень малой частоте можно пренебречь сопротивлением R провода катушки, поскольку $\omega L \gg R$, и считать индуктивную катушку чисто индуктивным элементом.

Таким образом, в зависимости от выбранного диапазона частот схема замещения индуктивной катушки различная (Рис.8.4)

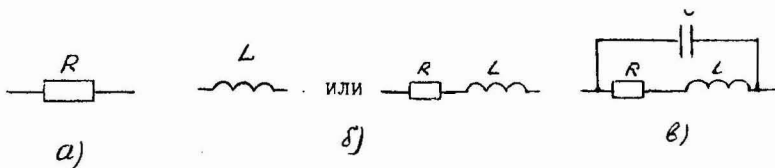


Рис.8.4. Схема замещения индуктивной катушки при а) постоянном токе, б) переменном токе низкой частоты, в) переменном токе высокой частоты

Конденсатор

Конденсатор есть элемент электрической цепи, предназначенный для использования его емкости.

Конденсатор состоит из двух металлических электродов, разделенных диэлектриком (рис.8.5).

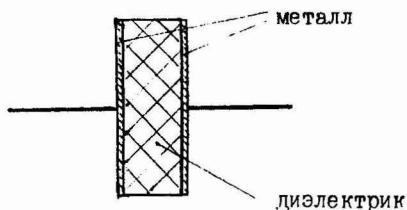


Рис.8.5. Конденсатор

При постоянном напряжении и идеальном диэлектрике тока в цепи с конденсатором не будет, его сопротивление равно бесконечности. Если напряжение переменное, то в процессе изменения электрического заряда возникает переменный ток. При низких частотах конденсатор с некоторым допущением можно рассматривать как емкостный элемент. С увеличением частоты опутимую роль начинают играть потери энергии в диэлектрике, которые возрастают с ростом частоты, поэтому ток в конденсаторе опережает по фазе напряжение на его зажимах на угол $|\varphi|$, меньший $\pi/2$. Угол, дополняющий $|\varphi|$ до $\pi/2$, обозначается буквой δ и называется углом потерь (рис.8.6). Параллельная схема замещения конденсатора и соответ-

вующая ей вектордиаграмма представлены на рис.8.6.

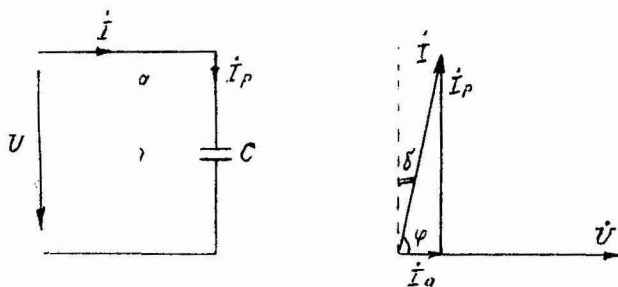


Рис. Схема замещения конденсатора с параллельным соединением g и C и ее векторная диаграмма

На практике кнсатор характеризуется двумя параметрами C и $tg\delta$. Для плельной схемы замещения

$$tg\delta = \frac{gU}{I_{C\omega C}U} = \frac{g}{\omega C} = \frac{g}{\omega C}$$

При достаточнсоких частотах необходимо учесть наличие индуктивности, орляемой магнитным полем, создаваемым током конденсатора (рв7.).

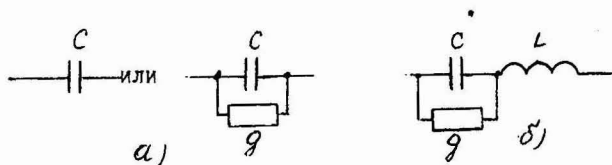


Рис.8Схемы замещения конденсатора при а) ни частотах, б) высоких частотах

Строго разгрань области частот, при которых справедлива та или иная схемаещения, не представляется возможным, так как это зависит оожества факторов.

Ш. сание лабораторной установки

Объектом исследования служат:

1) Резистор, сощий из двух последовательно соединенных резисторов $R1$ и .

2) Индуктивная катушка $L1$ с зажимами I и 2.

3) Конденсатор C 50 мкФ.

Эти три элемента электрических цепей исследуются как на постоянном напряжении (рис.8.8), так и на переменном напряжении (рис.8.9).

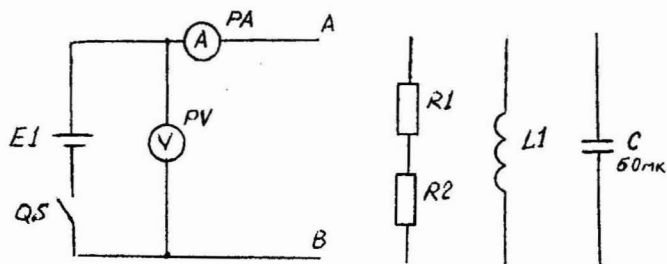


Рис.8.8. Схема электрической цепи для исследования элементов электрических цепей на постоянном напряжении

PA - амперметр Э 514, 1 А;

PV - вольтметр М253 на 30 В или Э59 на 75 В.

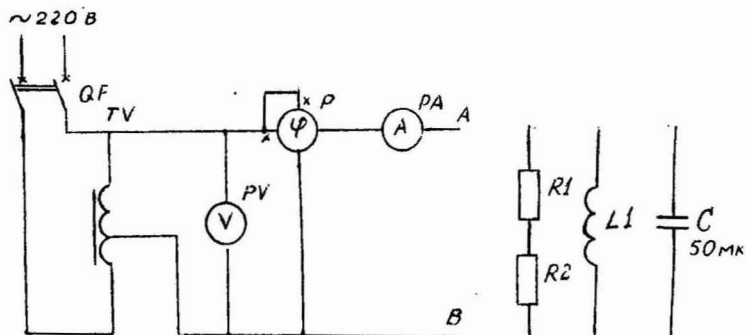


Рис.8.9. Схема электрической цепи для исследования элементов электрических цепей на переменном напряжении

PA - амперметр Э 514, 2 А;

PV - вольтметр Э59 на 150 В;

P - фазометр.

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.8.8. Поочередно подключая к зажимам А и В резистор, индуктивную катушку и конденсатор емкостью $C = 50 \text{ мкФ}$, произвести измерения согласно таблице 8.1.

8.1. Экспериментальное определение параметров элементов электрических цепей при постоянном токе

Элемент	Измерено		Вычислено	Схема замещения
	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	
Резистор				
Индуктивная катушка				
Конденсатор				

4.2. Собрать электрическую цепь по схеме рис.8.9. Установить $U = 100 \text{ В}$.

Поочередно подключая к зажимам А и В резистор, индуктивную катушку и конденсатор емкостью $C = 50 \text{ мкФ}$, произвести измерения согласно таблице 8.2. Угол φ следует записать с учетом знака.

8.2. Экспериментальное определение параметров элементов электрических цепей при переменном токе

Элемент	Измерено				Вычислено					
	U	I	φ	$\cos\varphi$	Z	R	X	Y	g	b
	В	А			Ом	Ом	Ом	См	См	См
Резистор										
Индуктивная катушка										
Конденсатор										

4.3. По данным измерений п.4.1. вычислить сопротивление резистора, индуктивной катушки и конденсатора. Нарисовать схемы замещения резистора и катушки индуктивности при постоянном токе.

4.4. По данным измерений п.4.2 вычислить параметры R и X последовательной схемы замещения резистора, индуктивной катушки и конденсатора и параметры g и b параллельной схемы замещения резистора, индуктивной катушки и конденсатора.

4.5. По данным таблицы 8.2 нарисовать последовательные схемы замещения резистора и индуктивной катушки. Построить векторные диаграммы. Записать математическую модель последовательной схемы замещения резистора и математическую модель последовательной схемы замещения катушки индуктивности в дифференциальной и комплексной формах.

По данным таблицы 8.2 нарисовать параллельную схему замещения конденсатора, построить векторную диаграмму. Указать на диаграмме угол потерь δ . Записать математическую модель параллельной схемы замещения конденсатора в дифференциальной и комплексной формах.

4.6. Основываясь на данных эксперимента, проведенного при частоте 50 Гц (таблица 8.2), определить, с какой относительной погрешностью можно считать, что резистор характеризуется только активным сопротивлением R , индуктивная катушка – только индуктивным сопротивлением X_L , конденсатор – только емкостным сопротивлением X_C .

Относительная погрешность определяется по формуле

$$\beta = \frac{\alpha_x - \alpha}{\alpha} \cdot 100\%$$

где α_x – измеренная величина (Z),
 α – действительная величина (R, X_L, X_C).

4.7. Результаты обработки экспериментальных данных по пунктам 4.5. и 4.6. для резистора свести в таблицу 8.3. Аналогичные таблицы сделать для индуктивной катушки и для конденсатора.

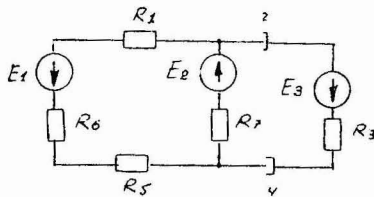
8.3. Элемент электрической цепи и его схемы замещения при синусоидальном токе, $f = 50$ Гц.

Резистор

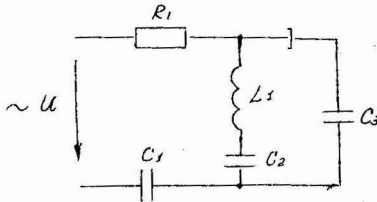
Схема замещения	Векторная диаграмма	Математическая модель	Упрощенная схема замещения и погрешность при использовании её, β

У. Коньные вопросы

1. Назовите элементы электрических цепей и опишите их конструктивное устройство
2. Что представляет собой математическая модель элемента электрической цепи?
3. Что такое эквивалентная схема замещения?
4. Нарисуйте схемы замещения резистора и индуктивной катушки на постоянном токе и схемы замещения резистора, индуктивной катушки и конденсатора переменного тока при низких частотах и при высоких частотах.
5. Составьте математическую модель цепи постоянного тока.



6. Составьте математическую модель цепи синусоидального тока в дифференциальной и компактной формах.



ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

I. Цель работы

Исследование линии электропередачи при различном характере нагрузки

II. 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 проходят 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 можно пренебречь. Это позволяет представить линию электропередачи схемой замещения в виде последовательного соединения резистивного R_1 и индуктивного X_1 элементов (рис.9. I, а).

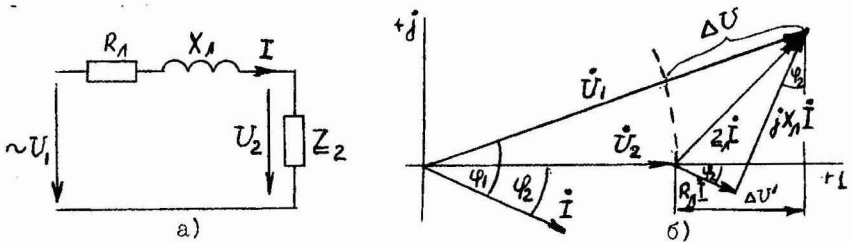


Рис.9. I. Схема линии электропередач (а), векторная диаграмма (б).

Для электрической цепи (рис. 9. I, а) уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид:

$$\dot{U}_1 = (R_n + jX_n) \dot{I} + \dot{U}_2.$$

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. 9. I, б). Ток \dot{I} отстает от него на угол φ_2 в силу индуктивного характера нагрузки. Падение напряжения в активном сопротивлении линии $R_n \dot{I}$ совпадает по фазе с током, падение напряжения в индуктивном сопротивлении линии $jX_n \dot{I}$ опережает ток на 90° . Складывая векторы \dot{U}_2 , $R_n \dot{I}$ и $jX_n \dot{I}$, получим напряжение \dot{U}_1 в начале линии, то есть на источнике.

Из векторной диаграммы видно, что напряжение в конце линии \dot{U}_2 отличается от напряжения 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:

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_2| = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} \cdot I = Z_n I.$$

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

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. 9. I, б) потеря напряжения равна в масштабе длине отрезка ΔU , полученного засечкой радиусом равным длине вектора \dot{U}_2 . Из векторной диаграммы видно, что падение напряжения $Z_n I$ больше потери напряжения ΔU .

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: $\Delta U' = R_n I \cos \varphi_2 + X_n I \sin \varphi_2$,

где φ_2 - сдвиг фаз между напряжением и током на приемнике.

На векторной диаграмме (рис.9.1,б) показан отрезок прямой $\Delta U'$, полученный как сумма проекций векторов $R_L \dot{I}$ и $jX_L \dot{I}$ на горизонтальную ось. Как видно, этот отрезок приблизительно равен отрезку ΔU , соответствующему потере напряжения в линии.

Параметры линии R_L и X_L можно рассчитать аналитически, исходя из ее конструкции. В условиях лаборатории R_L и X_L можно найти из опыта короткого замыкания линии. По данным, полученным из этого опыта:

$$Z_L = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}, \quad R_L = Z_L \cos \varphi_1, \quad X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}.$$

Ш. Описание лабораторной установки

Объектом исследования является модель линии передачи переменного тока (рис.9.2)

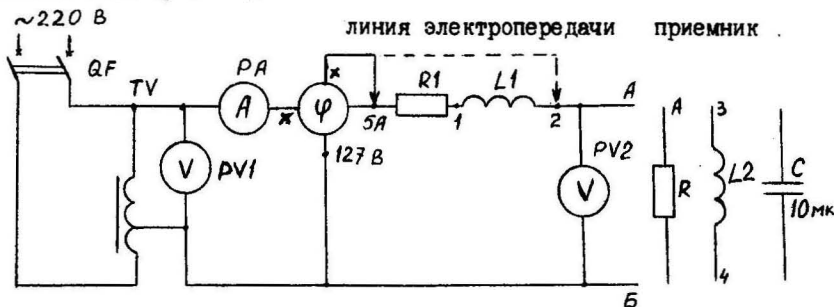


Рис.9.2. Электрическая модель линии передачи переменного тока

- PA - амперметр 1 А;
- PV1 - вольтметр 250 В;
- PV2 - многопредельный вольтметр;
- φ - фазометр.

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

Для создания индуктивного характера нагрузки к резистивному приемнику параллельно включается индуктивная катушка L_2 .

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

Для измерения φ_1 и φ_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 L_1 .

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.9.2.

4.2. Опыт короткого замыкания линии.

Ручку лабораторного автотрансформатора (TV) поставить в положение нуля. Зажимы АБ соединить накоротко. Плавно повышая напряжение, установить ток I А. Данные измерений занести в таблицу 9.1.

9.1. Параметры линии электропередачи

Измерено				Вычислено		
$U_{кк}$	$I_{кк}$	φ_1	$\cos\varphi_1$	Z_L	R_L	X_L
В	А	град		Ом	Ом	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-емкостной приемники, установить напряжение источника питания $U_1 = 100$ В и провести необходимые измерения согласно таблице 9.2. Угол φ следует записать с учетом знака.

9.2. Падение и потеря напряжения в линии электропередачи при различном характере нагрузки

Приемник	Измерено					Вычислено				
	I	U_1	U_2	φ_1	φ_2	$R_L I$	$X_L I$	$Z_L I$	ΔU	$\Delta U'$
	А	В	В			В	В	В	В	В
Активный										
Активно-индуктивный										
Активно-емкостной										

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

У. Контрольные вопросы

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 ΔU и $\Delta U'$ особенно отличаются друг от друга ?
4. Почему параметры линии передачи можно определить именно 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 $U_2 = 220 \text{ В}$, сопротивление приемника $R = 110 \text{ Ом}$, сопротивления линии электропередачи $R_L = 3 \text{ Ом}$, $X_L = 4$. Определите потерю и падение напряжения в линии электропередачи.

Работа № 10
РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

I. Цель работы

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

II. 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.

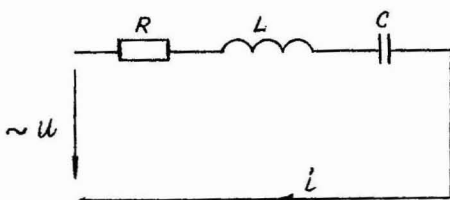


Рис. 10.1. Цепь с последовательным соединением участков R, L, C

Полное сопротивление Z цепи (рис. 10.1) 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 $L = \frac{1}{\omega C}$. 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. 10.2). Поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называется резонансом напряжений.

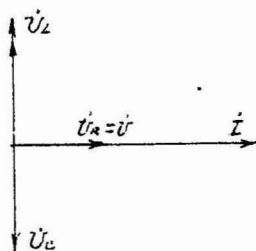


Рис. 10.2

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

$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = 0$ и $\cos \varphi = 1$. Реактивная мощность индуктивного элемента и реактивная мощность емкостного элемента одинаковы $Q_L = Q_C$. Реактивная мощность всей цепи $Q = Q_L - Q_C = 0$. 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.

III. Описание лабораторной установки

Исследуемая неразветвленная цепь собирается из резистора $R1$, двух индуктивных катушек, соединяемых 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. 10.3)

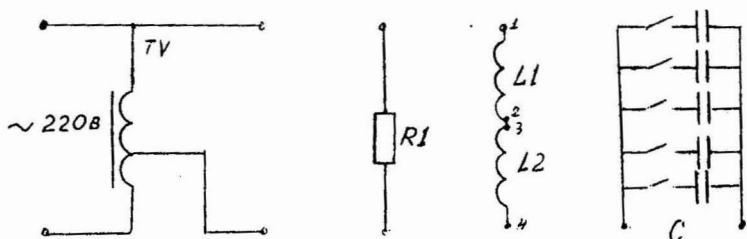


Рис. 10.3. Элементы лабораторного стенда для исследования резонанса напряжений

Для измерения величин, предусмотренных программой работы, на стенде имеются фазометр, амперметр на 2 А и два вольтметра, один на 250 В для измерения 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.

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Руководствуясь разделами II и III, 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 φ 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 R_1 , напряжение U_c на батарее конденсаторов, $\cos \varphi$ и угол φ . Угол φ 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 имеет 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 R_1 . Отдельно напряжение на резисторе R_1 трудно измерить, так как оно слишком мало.

4.4. Для резонансного режима электрической цепи вычислить полное сопротивление 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 $X_L = \sqrt{Z_k^2 - R^2}$ 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.

У. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. При выполнении пункта 4.5 задания рекомендуется масштаб по горизонтальной оси для емкости $m_c = 4 \frac{\text{мкФ}}{\text{см}}$, по вертикальной оси - масштаб для напряжения $m_v = 20 \frac{\text{В}}{\text{см}}$; масштаб тока $m_z = 0,2 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ и для $\cos \varphi$ $0,2 \frac{1}{\text{см}}$.

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

Построение векторных диаграмм необходимо начинать с вектора тока. Вектор напряжения на конденсаторе U_c отстает от вектора

тока на 90° . Положение вектора напряжения \dot{U}_k , поскольку он содержит активную и индуктивную составляющие, можно найти следующими способами. Первый способ – метод засечек. Из точки O векторной диаграммы проводится дуга окружности радиусом, равным в масштабе напряжению \dot{U} , а из конца вектора \dot{U}_c дуга окружности радиусом, равным в масштабе напряжению \dot{U}_k (рис. 10.4).

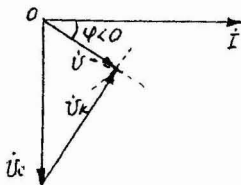


Рис. 10.4 Векторная диаграмма

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 ψ сдвига по отношению к вектору тока \dot{I} . Если $\psi > 0$, то вектор \dot{U} направляется в сторону опережения (против часовой стрелки) по отношению к вектору \dot{I} , если $\psi < 0$, то в сторону отставания (по часовой стрелке).

Вектор напряжения \dot{U}_k проводится в соответствии с уравнением $\dot{U}_k = \dot{U} - \dot{U}_c$.

У1. Контрольные вопросы

1. Дайте определение резонансного режима в электрической цепи.
2. Каково условие резонанса в цепи с последовательным соединением участков 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 участков R , L , C ?
6. Какова особенность резонанса напряжений с энергетической стороны?

Работа № II
РЕЗОНАНС ТОКОВ И КОМПЕНСАЦИЯ СДВИГА ФАЗ

I. Цель работы

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

II. Общие сведения

Резонанс токов имеет место при параллельном соединении ветвей с емкостными и индуктивными элементами.

Явление, происходящее в цепи рис. II.2, можно наглядно представить с помощью векторной диаграммы (рис. II.1).

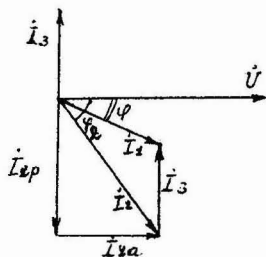


Рис. II.1 Векторная диаграмма

Ток I_2 в приемнике R, L отстает от приложенного напряжения U на угол φ_2 . Ток I_3 в конденсаторе C опережает напряжение на 90° . Общий ток I_1' в неразветвленной части цепи равен векторной сумме токов обеих ветвей

$$I_1' = I_1 + I_3$$

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 φ 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 φ 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_x

$$I_3 = I_x \sin \varphi_2 = I_{xp}; \quad I_3 = I_{xp}.$$

Эти токи будут полностью компенсировать друг друга благодаря тому, что имеют сдвиг по фазе на 180° . 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_x общий ток будет расти, угол φ приобретает отрицательное значение и увеличивается, коэффициент мощности уменьшается.

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

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

где U — напряжение, приложенное к цепи;
 Y — полная проводимость цепи,

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

β_L — индуктивная проводимость ветви R, L ; $\beta_L = \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}$,

β_C — емкостная проводимость ветви с емкостью; $\beta_C = \omega C$.

Изменяя или индуктивность L , или емкость C , или сопротивление R , или частоту питающего напряжения, можно достичь того, что β_L будет равняться β_C , и тогда общий ток $I_1 = UY$ становится чисто активным. Это соответствует режиму резонанса. Следовательно, условие резонанса токов можно записать как $\beta_L = \beta_C$ 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 превращение 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.

III. 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. II.2).

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

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь для исследования резонанса токов (рис. II.2).

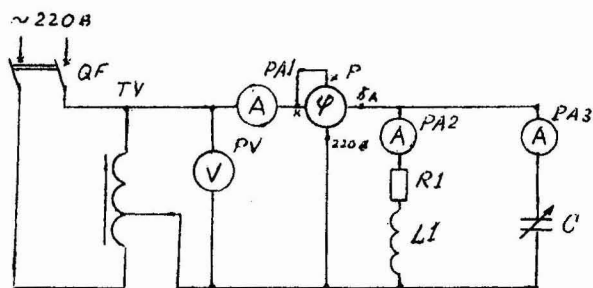


Рис. II.2. Схема цепи для исследования резонанса токов

PV – вольтметр 250 В, $PA1, PA2$ – амперметры I А,
 $PA3$ – амперметр 2 А, P – фазометр.

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 приобретает наименьшее значение. Число измерений до резонанса и после него должно быть примерно одинаковым. Угол следует записывать с учетом знака: $\varphi_{\text{инд.}} > 0, \varphi_{\text{емк.}} < 0$. Данные измерений занести в таблицу II.1

II.1. Напряжение, токи и коэффициент мощности цепи

Измерено							Вычислено				
C	U	I ₁	I ₂	I ₃	φ	cos φ	Y	g	Y ₂	b ₂	b _c
мкФ	В	А	А	А			см	см	см	см	см

4.4. Для резонансного режима электрической цепи вычислить полную проводимость цепи $Y = \frac{I_1}{U}$, активную проводимость $g = Y \cdot \cos \varphi$, 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.

У. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При построении векторных диаграмм и графиков рекомендуется масштаб для тока $m_I = 0,2 \frac{\text{А}}{\text{см}}$.

Построение векторных диаграмм необходимо начинать с вектора напряжения. Вектор емкостного тока \vec{I}_3 проводится под углом 90° к вектору напряжения в сторону опережения. Положение вектора тока \vec{I}_2 , поскольку он содержит активную и реактивную составляющие, находится методом засечек. Для этого из точки О векторной диаграммы проводится окружность радиусом, равным в

в масштабе \vec{I}_1 , а из конца вектора \vec{I}_3 - окружность радиусом, равным в масштабе \vec{I}_2 . Векторы \vec{I}_1 и \vec{I}_2 должны сходиться в точке пересечения окружностей (рис. II.3). Такое построение основано на том, что $\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \vec{I}_3$

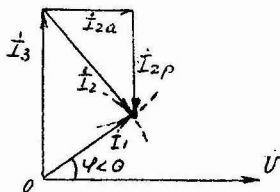


Рис. II.3. Векторная диаграмма

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

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

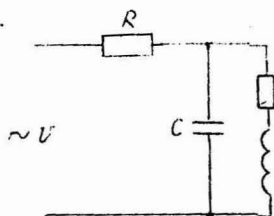
Второй способ построения векторных диаграмм основан на том, что из эксперимента известен угол φ между общим током \vec{I}_1 и напряжением \vec{U} . В этом случае построение векторных диаграмм также нужно начинать с вектора напряжения \vec{U} . Вектор тока \vec{I}_3 направляется в сторону опережения под углом 90° , а вектор \vec{I}_2 под углом φ к напряжению \vec{U} .

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

VI. Контрольные вопросы

1. Какое явление называется 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.

5.



Определить величину емкостного сопротивления X_c , при котором в цепи возникает резонанс токов, если $R = 6 \text{ Ом}$; $X_L = 8 \text{ Ом}$.

Рис. II.4 Схема 1

УПлоложение

Фазоврель тока

Цепь, состоящую из конденсатора, соединенного параллельно с индуктивной катушкой и переменным резистором (рис. II.5), можно настроить на такой режим при котором значение тока I в неразветвленной части цепи зависит от сопротивления резистора

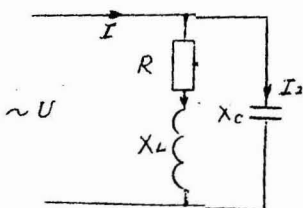


Рис. II.5 Схема фазовращателя тока

При этом угол сдвига фаз \dot{I} по отношению к напряжению \dot{U} будет изменяться (рис. II.6) для создания такого режима необходимо, чтобы $X_c = 2X_L$

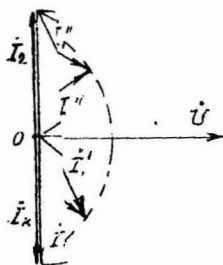


Рис. II.6. Ёрная диаграмма

Из векторной диаграммы (рис. II.6) видно, что при изменении сопротивления R конец вектора тока \vec{I}_1 и конец вектора тока \vec{I} скользят по дуге окружности радиусом, равным половине длины вектора тока \vec{I}_1 в режиме короткого замыкания R . Такая векторная диаграмма называется круговой диаграммой.

Из круговой диаграммы видно, что при определенном значении сопротивления R в цепи можно получить режим резонанса токов.

УШ. Задание по УИРС

Исследование работы разветвленной цепи в режиме фазовращателя с постоянным значением тока на входе цепи.

8.1. Используя схему для исследования резонанса токов (рис. II.2), опытным путем определить индуктивное сопротивление X_L индуктивной катушки.

8.2. Рассчитать емкость батареи конденсаторов из условия $X_C = 2X_L$ и $f = 50$ Гц. Установить это значение емкости в электрической цепи.

8.3. Изменяя сопротивление резистора ветви с L путем последовательного включения резисторов R_1 , R_2 и R_3 (все резисторы по 30 Ом), убедиться, что величина тока в неразветвленной части цепи не изменяется.

8.4. Построить векторные диаграммы напряжения и токов для трех значений сопротивления резистора.

8.5. Рассчитать сопротивление резистора, при котором в цепи наступит резонанс токов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ КАТУШКАМИ

I. Цель работы

Исследовать явление взаимной индукции на примере двух индуктивно связанных катушек. Определить опытным путем взаимную индуктивность M и одноименные зажимы этих катушек.

II. 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 связаны (индуктивно связанные) (рис. I2.1).

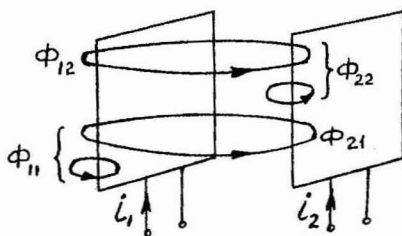


Рис. I2.1 Индуктивно связанные катушки

При протекании по катушкам переменного тока магнитные потоки будут переменными и в катушках будут наводиться кроме ЭДС самоиндукции 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 их 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 на переменном токе.

Первый способ. Соберем электрическую цепь по схеме рис. I2.3. Очевидно, 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. I2.4).

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

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

здесь R_1, R_2 - активные сопротивления катушек;

L_1, L_2 - индуктивности катушек;

M - взаимная индуктивность;

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

$L_1 + L_2 \pm 2M = L_{экв}$ - 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.

Продолжаем два опыта. В первом включим катушки последовательно и согласно, во втором — левосторонне и встречно. По результатам измерений найдем: $X_c = \omega(L_1 + L_2 + 2M)$,

$$X_{встр} = \omega(L_1 + L_2 - 2M),$$

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

$$M = \frac{X_{согл} - X_{встр}}{4}$$

Степень индуктивной связи между катушками характеризуется коэффициентом связи :

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

Коэффициент связи всегда меньше единицы.

III. Описание лабораторной установки

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

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, на стенде имеются фазометр, амперметр 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.

IV. Программа и методы выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. I2.2. для определения параметров катушек.

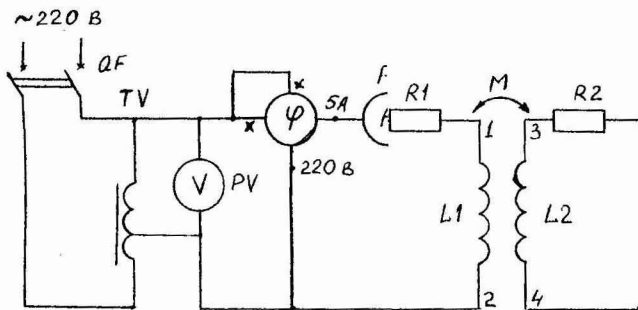


Рис. I2.2. Определение параметров индуктивных катушек

Установить ток в цепи 2 А. После измерения отключить элементы цепи R_1, L_1 и на их место присоединить R_2, L_2 . Результаты измерений внести в таблицу I2.1.

I2.1. Параметры индуктивных катушек

Индуктивная катушка	Измерено			Вычислено			
	U	I	$\cos\varphi$	Z	R	X_L	L
	В	А		Ом	Ом	Ом	Гн
№ 1							
№ 2							

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 $L = X_L / \omega$.

4.3. Определить взаимную индуктивность M магнитно связанных катушек (рис. I2.3).

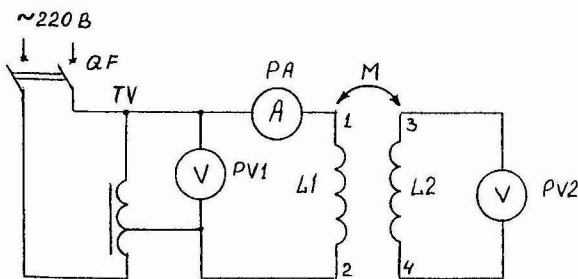


Рис. I2.3. Определение взаимной индуктивности катушек

а) Установить ток 2 А, результаты измерений записать в таблицу I2.2.

б) 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 таблицу I2.2.

I2.2. Взаимная индуктивность и коэффициент связи магнитно связанных катушек

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

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. I2.4).

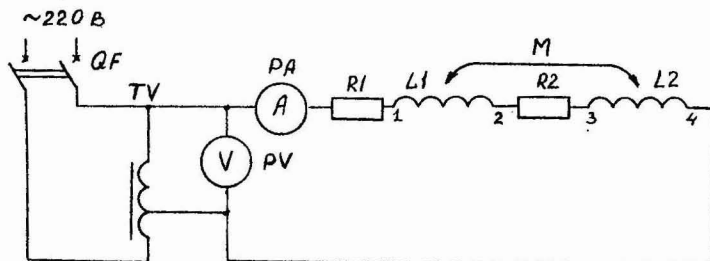


Рис. I2.4. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

- а) Установить ток I А. Данные измерений занести в таблицу I2.3.
- б) Отключить цепь, изменить порядок подключения зажимов второй катушки. Установить ток I А, данные измерений занести в таблицу I2.3.

I2.3. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

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

4.6. По данным таблицы I2.ределить в каком из опытов было согласное включение и в встречное, на схеме рис.I2.4 отметить одноименные зажимы так звездочками.

4.7. Вычислить эквивалентную индуктивность последовательно соединенных катушек, для чего сделать полное сопротивление $Z = U/I$, активное сопротивление $R = R_1 + R_2$ (значения R_1 и R_2 взять из таблицы I, реактивное сопротивление $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$ и эквивалентная индуктивность $L_{экв} = X/\omega$.

4.8. Вычислить значение M по данным согласного и встречного включения

$$M = \frac{X_{согл.стр.}}{4}$$

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

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

У. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При выполнении п.4.10 при работе за основной вектор рекомендуется принять вектор $I = I A$ и направить его по действительной оси на комплексной плоскости. Для векторов напряжений рекомендуется масштаб $20 \frac{В}{СМ}$. Векторы напряжений $R_1 \vec{I}$ и $R_2 \vec{I}$ совпадают по направлению с вектором тока \vec{I} . Векторы $jX_{L1} \vec{I}$ и $jX_{L2} \vec{I}$ опережают ток на 90° , а вектор $\pm jX_M \vec{I}$ опережает на 90° при согласном включении и отстает на 90° от вектора тока при встречном включении катушек. Вектор напряжения \vec{U} на входе цепи получаем в результате сложения векторов в соответствии с уравнением $\vec{U} = jX_{L1} \vec{I} \pm jX_M \vec{I} + R_2 \vec{I} + jX_{L2} \vec{I} \pm jX_M \vec{I}$.

VI. Контрольные вопросы

1. Какое явление называется взаимной индукцией?
2. Чему равна ЭДС взаимной индукции?
3. Что такое взаимная индукция, от чего она зависит?
4. Какие есть 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 определить вид включения катушек (согласное или встречное) по электрической схеме?

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

I. Цель работы

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

II. Общие сведения

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

$$u = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \psi_{u1}) + U_{m2} \sin(2\omega t + \psi_{u2}) + \dots + U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{uk}) + \dots,$$

где U_0 — постоянная составляющая напряжения или нулевая гармоника;

$\sin(\omega t + \psi_{u1})$ — первая или основная гармоника напряжения.

Остальные члены ряда именованы по номеру гармоники и называются высшими гармониками. $U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{uk})$ — 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 $u(t)$.

При расчете токов 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 можно использовать комплексный метод.

закон Ома для K -й гармоники в комплексной форме имеет вид:

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

Так как индуктивное и емкостное сопротивление 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:

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

Действующее значение несинусоидального тока

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

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).

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

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.

III. Описание лабораторной установки

На лабораторном стенде имеется источник питания, создающий несинусоидальное напряжение (рис. I3.1, а)

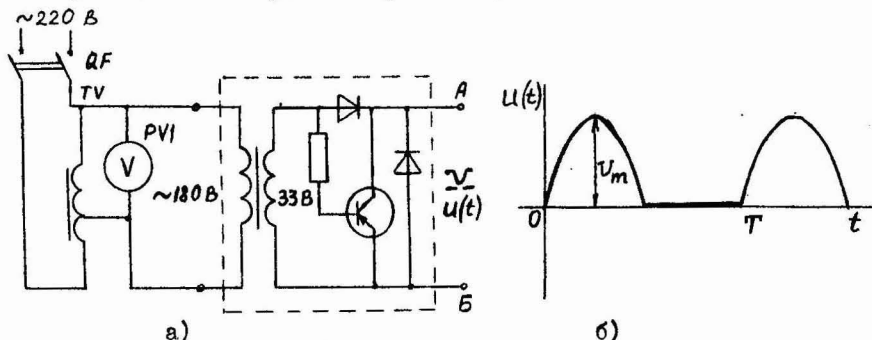


Рис. I3.1. Электрическая схема источника несинусоидального напряжения (а), график напряжения (б).

Разложение несинусоидального напряжения $u(t)$ (рис. I3.1, 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 $U_m = 33 \cdot \sqrt{2}$ В, $f = 50$ Гц.

Объектом исследования является несинусоидальный электрический ток в цепи рис. I3.2. к осциллографу

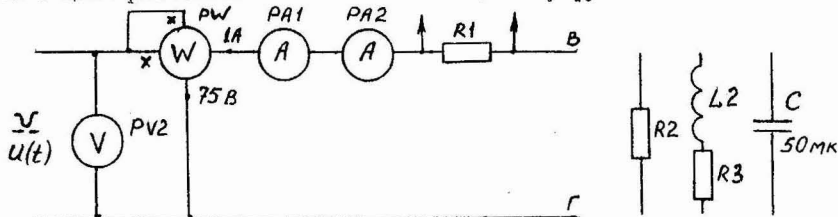


Рис. I3.2. Электрическая схема для исследования цепи несинусоидального тока.

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 (9514, 9365) 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 $L2$.

IV. Программа и методика выполнения работы

4.1. К зажимам АБ (рис. I3.1, а) источника несинусоидального напряжения подключить электрическую цепь (рис. I3.2).

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.

I3.1. Параметры элементов электрической цепи

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

4.3. Подключая поочередно к зажимам ВГ активный, индуктивный и емкостной приемники, установить с помощью трансформатора TV на входе источника несинусоидального напряжения 180 В. Провести измерения согласно таблице I3.2. Скопировать осциллограммы токов для каждого из приемников. Изображение должно содержать порядки двух периодов.

13.2. Измеренные и расчетные электрические величины цепи несинусоидального тока

Приемники	Измерено				Вычислено		
	U	I	I_0	P	I	I_0	P
	В	А	А	Вт	А	А	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:

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

б) рассчитать действующее значение тока I и мощность P .

Расчитанные значения внести в таблицу 13.2. 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).

У. 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 $Z_k = \sqrt{R^2 + (\kappa\omega L - \frac{1}{\kappa\omega C})^2}$ - полное сопротивление цепи для κ -й гармоники.

Начальные фазы первой и второй гармоник тока можно определить из выражения $\psi_{ik} = \psi_{uk} - \varphi_k$,

где ψ_{uk} - начальная фаза напряжения κ -й гармоники,
 $\varphi_k = \arctg \frac{\kappa\omega L - \frac{1}{\kappa\omega C}}{R}$ - сдвиг фаз напряжения и тока κ -й гармоники.

Для построения графика несинусоидального тока рекомендуется по горизонтальной оси нанести две шкалы, учитывающие изменение фаз первой и второй гармоник за один и тот же промежуток времени (рис. 13.3). 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. 13.3 приведено построение графика заданного несинусоидального напряжения

$$u(t) = 4,8 + 23,3 \sin \omega t + 9,9 \sin(2\omega t - 90^\circ) \text{ В.}$$

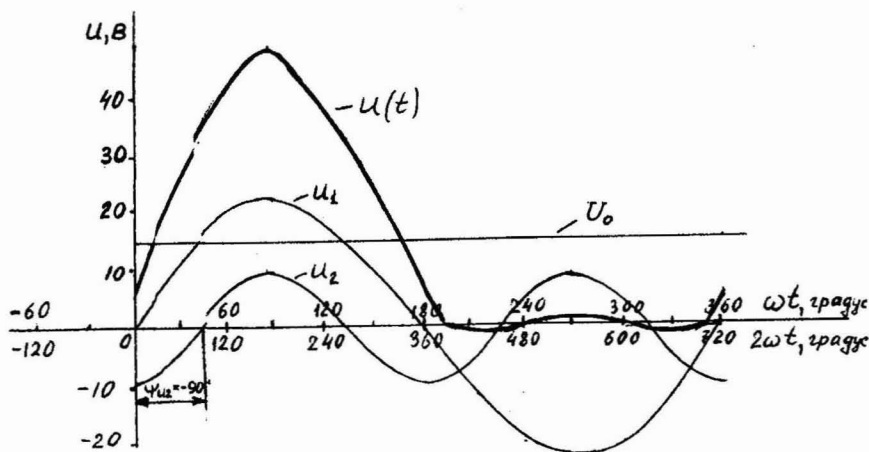


Рис. 13.3. График несинусоидального напряжения

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

VI. 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 разбивается 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 зависит от частоты индуктивное и емкостное сопротивления ?
7. Как влияет характер реактивного элемента на форму кривой тока в нем при действии несинусоидального напряжения ?

ЛИТЕРАТУРА

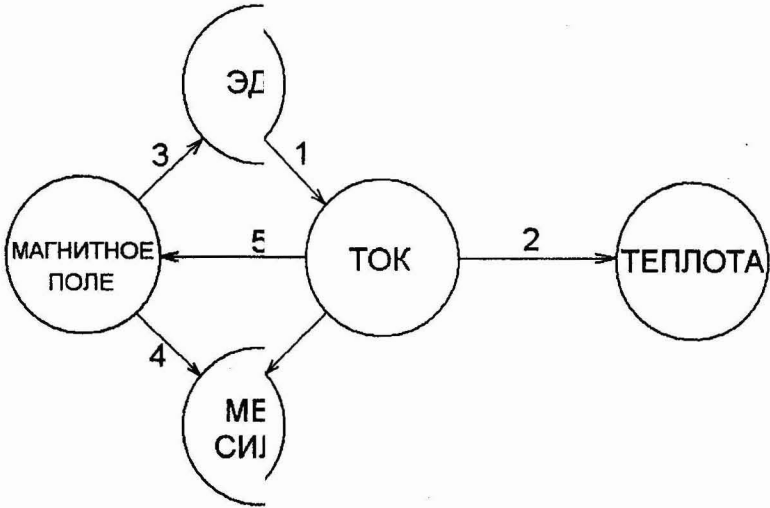
1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи/ Л.А. Бессонов. — М.: Гардарики, 1999. — 317 с.
2. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
3. Теоретические основы электротехники: в 3 т. /Ж.С. Демирчян [и др.].— СПб: Питер, 2004.
Т. 1. — 463 с. — Содерж.: Основные понятия и законы теории электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей. Теория линейных электрических цепей.
Т. 2. — 576 с. — Содерж.: Теория линейных электрических цепей. Теория электрических и магнитных цепей.
Т. 3. — 377 с. — Содерж.: Теория электромагнитного поля.
4. Теоретические основы электротехники. Курс лекций. Линейные электрические цепи. Часть 1. — Минск: БГАТУ, 2002. — 170 с.
5. Теоретические основы электротехники. Методические указания к практическим занятиям. Часть 1. — Минск: БГАТУ, 2003. — 137 с.

Основные законы электротехники	
Закон Ома	$i = \frac{u}{R}$
Первый закон Кирхгофа	$\sum i = 0$
Второй закон Кирхгофа	$\sum e = \sum u$
Закон Джоуля–Ленца	$p = i^2 R$
Закон электромагнитной индукции	$e = -\frac{d\Phi}{dt}$
Закон Ампера	$\vec{F} = i[d\vec{\ell} \vec{B}]$
Закон Кулона	$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{R}_0}{4\pi\epsilon_0 R^2}$
Закон полного тока	$\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \sum i$

Основные формулы и уравнения электротехники	
Мощность	$p = ui$
Энергия	$w = \int u i dt$
Энергия магнитного поля катушки	$w_{\text{маг}} = \frac{Li^2}{2}$
Энергия электрического поля конденсатора	$w_{\text{эл}} = \frac{Cu^2}{2}$
Теорема Гаусса	$\oint \vec{D} d\vec{S} = \sum q_{\text{св}}$
Первое уравнение Максвелла	$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Второе уравнение Максвелла	$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Теорема Умова–Пойнтинга	$-\oint \vec{\Pi} d\vec{S} = \int_V \gamma E^2 dv + \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t}$














Соотношения между током и напряжением на элементах электрической цепи				
Элемент цепи	Вид тока			
	Переменный ток, мгновенное значение	Синусоидальный ток, комплексное значение	Синусоидальный ток, действующее значение	Постоянный ток
R	$u = iR$ $i = \frac{u}{R}$	$\dot{U} = \dot{I} R$ $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R}$	$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$	$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$
L	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$	$\dot{U} = j\omega L \dot{I}$ $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{j\omega L}$	$U = \omega L I$ $I = \frac{U}{\omega L}$	Индуктивность не оказывает сопротивления постоянному току
C	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{du_C}{dt}$	$\dot{U} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$ $\dot{I} = j\omega C \dot{U}$	$U = \frac{1}{\omega C} I$ $I = \omega C U$	Ёмкость представляет собой разрыв цепи для постоянного тока
Закон Ома в комплексной форме для цепи синусоидального тока				
$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}; \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}$				

Связи электрических величин
(причины и следствия)



1.	Закон	$i = \frac{u}{R}$
2.	Закон Джоуля-Ленца	$p = i^2 R$
3.	Закон электромагнитной индукции	$e = -\frac{d\Phi}{dt}$
4.	Закон Ампера	$\vec{F} = i[d\vec{l} \times \vec{B}]$
5.	Закон полного тока	$\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma i$

Графические и буквенные условные обозначения в электрических схемах

Наименование	Графическое обозначение	Буквенное обозначение
1	2	3
Постоянный ток	—	
Полярность постоянного тока положительная	+	
Полярность постоянного тока отрицательная	—	
Переменный ток	~	
Переменный ток частотой 50 Гц	~50 Гц	
Трехфазный ток частотой 50 Гц, напряжением 220 В	3~50 Гц 220 В	
Трехфазный ток, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	3N~50 Гц 220/380 В	
Резистор постоянный		R
Резистор постоянный с дополнительными отводами		R
Шунт измерительный		R
Резистор переменный		R
Терморезистор		RK
Варистор		RU
Потенциометр		R
Конденсатор постоянной ёмкости		C
Конденсатор постоянной ёмкости электролитический		C
Конденсатор переменной ёмкости		C
Вариконд		C
Катушка индуктивности*		L
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом*		L

1	2	3
Трансформатор однофазный двухобмоточный с ферромагнитным сердечником*		TV
Автотрансформатор с ферромагнитным сердечником*		TV
Измерительный трансформатор тока*		TA
Трансформатор трехфазный с ферромагнитным магнитопроводом двухобмоточный с соединением обмоток звезда-звезда с выведенной нейтральной точкой*		TV
Генератор постоянного тока со смешанным возбуждением		G
Синхронный генератор трехфазный с обмотками, соединенными в звезду с невыведенной нейтральной		G
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением		M
Асинхронный двигатель трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором		M
Амперметр		PA
Вольтметр		PV
Ваттметр		PW
Счетчик активной энергии		PI
Частотомер		PF
Фазометр		
Омметр		PR
Гальванометр		
Осциллограф		

1	2	3
Контакт замыкающий коммутационного устройства		QS
Контакт размыкающий коммутационного устройства		QS
Контакт переключающий с нейтральным центральным положением		SA
Разъединитель трехполюсный		QS
Контакт выключателя замыкающий трехполюсный с автоматическим срабатыванием максимального тока		QF
Переключатель однополюсный шестипозиционный		SA
Предохранитель плавкий		FU

* Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливается.

Отпечатано с оригиналов заказчика 1.10.2007. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная, 70 г/м². Тираж 200 экз. Заказ 518.

Издательско-полиграфический центр.
Белорусский государственный аграрный технический университет
ЛИ № 02330/0133465 от 09.02.05. ЛП № 02330/0131507 от 02.02.05.
220023, г. Минск, пр. Независимости, 99, к. 2