

621.3 (07)
Б 902

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ядерной энергии и промышленности

П.В. Бугаева, С.В. Гайдук, В.Е. Моряков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторные работы

Часть 1

Рекомендовано

*Учебно-методическим советом института
в качестве учебно-методического пособия
для студентов направления подготовки 140400
«Электроэнергетика и электротехника»,
профиль подготовки «Электроснабжение» 140400.62-07*

Севастополь
2015

621.3 (07)
Б 902
УДК 621.3 (07)

Рецензенты: В.Г. Слюсаренко
А.В. Углов
Научный редактор В.Е. Моряков

Бугаева П.В., Гайдук С.В., Моряков В.Е.

Б 902 Теоретические основы электротехники. – Ч. 1. Лабораторные работы: учеб.-метод. пособие. – Севастополь: ФГБОУВО «СевГУ», 2015. – 72 с.: ил.

Содержатся описания лабораторных работ, выполняемых при изучении первой части курса «Теоретические основы электротехники».

Данное пособие предназначено для студентов электротехнических специальностей очной и заочной формы обучения.

© Издание ФГБОУВО «СевГУ», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Лабораторная работа № 1. Исследование передачи электрической энергии по линии постоянного тока	10
Лабораторная работа № 2. Исследование сложной линейной электрической цепи постоянного тока	19
Лабораторная работа № 3. Исследование магнитной цепи	27
Лабораторная работа № 4. Исследование процессов в RL и RC в цепях переменного тока	34
Лабораторная работа № 5. Исследование электрической цепи переменного тока при последовательном и параллельном соединении проводников	42
Лабораторная работа № 6. Исследование резонанса напряжений	52
Лабораторная работа № 7. Исследование резонанса токов	60

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные занятия имеют целью закрепить знания студентами теоретических положений курса, обучить студентов методам экспериментальных исследований, привить им навыки научного анализа и обобщения полученных результатов.

Занятия в лаборатории являются основным видом занятий, позволяющим получить практические навыки по эксплуатации электрооборудования и производству электрических измерений. Лабораторные занятия способствуют развитию у студентов творческой инициативы и самостоятельности в работе.

В пособии содержатся описания лабораторных работ по курсу, в каждом из которых указаны тема, учебные цели, программа выполнения работы и рекомендации по оформлению отчета, краткая теоретическая справка, позволяющая студентам без дополнительной литературы вспомнить физические основы работы.

Для самопроверки в конце каждого описания предлагается перечень контрольных вопросов. Кроме того, в пособии изложены необходимые сведения по технике безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

1. Методические указания по проведению лабораторных работ

При проведении лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» перед студентами электротехнических специальностей ставятся задачи.

1. Научиться собирать электрические схемы соединений элементов R , L , C , защитно-коммутационных аппаратов, регулирующих устройств, трансформаторов, измерительных приборов и т.д.

2. Углубить знания физических процессов, протекающих в электрических и магнитных цепях в стационарных и переходных режимах.

3. Изучить рабочие свойства основных элементов электрических и магнитных цепей.

4. Получить навыки по проведению измерений в электрических и магнитных цепях.

В электротехнической лаборатории для выполнения лабораторных работ студенты класса разбиваются на отдельные группы по 2–3 студента (в зависимости от числа рабочих мест) во главе со старшим. Каждая группа в соответствии с программой работы проводит исследование электрической или магнитной цепи. Чтобы добиться качественного и организованного проведения лабораторных исследований, старшие групп накануне проведения работы инструктируются преподавателем (инженером лаборатории), а каждый студент должен хорошо к ней подготовиться в часы самостоятельных занятий. Эта подготовка заключается в следующем:

- в ознакомлении с целью и программой работы;
- в повторении теоретического материала;
- в продумывании последовательности выполнения работы с учетом «Методических указаний»;
- подготовке бланка по работе.

Подготовленность студента проверяется руководителем (преподавателем) занятия путем устного опроса или на ПЭВМ в течение 10...15 мин в начале занятия. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются, по указанию руководителя приступают к изучению необходимого материала и подвергаются дополнительной проверке. Если студент не успевает выполнить весь объем работы в плановые часы, то обязан сделать это в часы самостоятельных занятий под руководством лаборанта.

Получив разрешение на работу, студенты под руководством старших групп должны, прежде всего, ознакомиться с используемыми в лабораторной работе элементами схемы, а также проверить соответствие электроизмерительных приборов ожидаемым значениям измеряемых величин и записать их номинальные **данные**.

После этого можно приступить к сборке схемы. Сборка схемы (как и вычерчивание ее на бланке отчета) выполняется в такой последовательности: сначала собирается главная цепь, то есть та, по ветвям которой проходит основной ток (трансформаторы, реостаты, катушки индуктивности, конденсаторы, амперметры, токовые обмотки ваттметров, фазометров и др.), а затем – вспомогательные цепи, сигнализации, управления, вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, фазометров и др.). При этом необходимо таким образом расположить элементы схемы, подобрать и надежно закрепить проводники требуемой длины и сечения, чтобы можно было легко проверить схему соединений и удобно выполнить работу. Схема после сборки должна быть тщательно проверена самими студентами.

Особое внимание следует обратить на то, чтобы амперметры и токовые обмотки ваттметров и фазометров включались в цепь последовательно, а не параллельно, как вольтметры или обмотки напряжения ваттметров и фазометров; движки всех реостатов должны быть передвинуты так, чтобы их сопротивления были наибольшими, а переключатели приборов должны быть поставлены на максимально возможный предел измерения. Реостаты, включенные по схеме потенциометра, ставятся в такое положение, чтобы напряжение на выходных зажимах было наименьшим. Собранная и проверенная студентами схема предъявляется старшим группы, преподавателю и лаборанту для проверки и только с их разрешения может быть включена под напряжение. В момент включения необходимо наблюдать за показаниями приборов. При неправильном или недопустимо большом отклонении стрелок приборов, схема должна быть немедленно отключена, после чего необходимо выяснить и устранить причины, вызвавшие указанные явления.

Затем следует приступить к выполнению программы работы в порядке и в соответствии с указаниями, изложенными в настоящем пособии. Каждая группа студентов при выполнении работы ведет протокол наблюдений. Особое внимание следует обратить на осмысленное, а не механическое выполнение каждой операции, стремиться понять физическую сущность происходящих в электрических цепях явлений. После выполнения задания старший группы предъявляет результаты работы преподавателю и с его разрешения дает команду разобрать схему.

Разобрав схему, студенты приводят в порядок рабочее место, после чего старший группы сдает его лаборанту. Затем все студенты приступают к оформлению отчетов.

При выполнении графической части отчета необходимо соблюдать следующие правила.

1. Выполняя построение графика функциональной зависимости между двумя переменными, значение аргумента откладывать на оси абсцисс, а значение функции – на оси **ординат**.

2. Масштабы для аргумента и функции выбирать так, чтобы в 1 см содержалось 1, 2, 5, 10 единиц или кратные этим цифрам значения.

3. На координатных осях наносить только шкалы, соответствующие выбранным масштабам. При этом буквенные обозначения величин должны быть нанесены у концов осей: аргумента – выше оси абсцисс, а функции – правее оси ординат. Числовые значения величин соответственно – ниже оси абсцисс и левее оси ординат. Если совмещаются зависимости нескольких функций от одного аргумента, то параллельно оси ординат наносится соответствующее число масштабных линий.

4. Опытные данные наносить на график в виде отчетливых точек, кружков или звездочек (для каждой кривой свои обозначения). По точкам и между точками с помощью лекал проводится плавная кривая или прямая, выражающая функциональную зависимость; не лежащие на этой линии точки чаще всего свидетельствуют о погрешности измерения, наблюдения или расчета.

5. Размер графиков не должен быть меньше 10 x 10 см². При необходимости в бланк отчета можно клеивать дополнительные листы с графиками.

В выводах по работе необходимо сделать конкретный анализ полученных результатов по каждому пункту программы. При этом следует указать, какие явления или процессы наблюдались, и каковы причины их возникновения, охарактеризовать измерительную технику, отметить особые свойства элементов схемы, дать оценку их эксплуатационным качествам.

Оформленный отчет должен быть подписан студентами и сдан преподавателю в конце данного занятия (или в другой срок, указанный преподавателем). Студенты, по каким-либо причинам не выполнившие задания, записываются в специальный журнал, находящийся в лаборатории; они обязаны выполнить лабораторную работу в часы самостоятельных занятий в срок, указанный преподавателем, но не позднее чем через неделю со дня выполнения данной работы.

2. Основные правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

Непосредственной причиной поражения человека при электротравме является электрический ток. Степень физиологического воздействия электрического тока определяется в основном его величиной, частотой, длительностью протекания и зависит от пути тока через тело человека.

Наиболее вероятные пути тока: «рука-рука», «рука-ноги», «нога-нога». При этом сопротивление тела на пути тока колеблется в широких пределах и зависит от многих факторов, в том числе от влажности и чистоты кожи, от общего состояния человека, от величины поверхности соприкосновения и плотности контакта **и пр.**

Принято считать, что сопротивление тела человека в среднем равняется 1 000 Ом. В качестве допустимого безопасного синусоидального тока промышленной частоты 50 Гц при длительном воздействии принимается величина 30 мА.

В лаборатории напряжение сети имеет величину до 380 В, оно является безусловно опасным для жизни, а при определенных условиях может оказаться смертельным. Поэтому при выполнении лабораторных работ студенты обязаны строжайшим образом выполнять следующие правила техники безопасности.

1. Запрещается включать схему под напряжение без разрешения преподавателя или лаборанта.

2. При включении схемы под напряжение убедиться, что никто не касается токоведущих элементов схемы, и предупредить находящихся вблизи командой «ВКЛЮЧАЮ!».

3. Нельзя касаться руками голых токоведущих частей (оголенных проводов и контактов), обмоток проволоочных реостатов и т.д., когда цепь находится под напряжением.

4. Категорически запрещается делать какое бы то ни было переключение или изменение в схеме, когда она находится под напряжением.

5. Включение цепи, переключения проводов и выключателей, перемещение движков реостатов производить одной рукой, не касаясь другой металлических и плохо изолированных частей.

6. При работе с открытыми пускорегулировочными реостатами, переключателями, приборами и т.п., а также вблизи распределительных щитков следует соблюдать осторожность, чтобы не замкнуть контакты бляхой поясного ремня и другими металлическими предметами.

7. При работе с электрическими цепями, содержащими катушки индуктивности и конденсаторы, следует помнить, что при резонансах напряжения и токи на отдельных участках таких цепей могут значительно превысить номинальные значения, и что конденсаторы длительное время сохраняют заряд.

8. При возникновении каких-либо ненормальностей в лабораторной установке, а также при исчезновении напряжения немедленно отключить схему и доложить преподавателю или лаборанту.

9. Категорически запрещается производить какие-либо включения и переключения на щитках и установках, не входящих в комплект оборудования выполняемой лабораторной работы.

10. На рабочем месте не должно быть никаких посторонних предметов.

11. Запрещается выполнять лабораторную работу сидя и облокотившись на используемое оборудование и элементы лабораторной установки.

Студенты, изучившие правила техники безопасности, расписываются в специальном журнале у инженера лаборатории и только после этого допускаются к выполнению лабораторных работ.

При попадании человека под напряжение необходимо:

- если пострадавший находится в сознании, обеспечить ему полный покой;
- вызвать врача;
- при отсутствии у пострадавшего сознания, но при сохранившемся дыхании создать приток свежего воздуха, дать ему понюхать нашатырный спирт, обрызгать водой;
- при отсутствии у пострадавшего сознания, дыхания и пульса **НЕ-МЕДЛЕННО** начать делать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца и продолжать их непрерывно до прибытия врача.

3. Указания лаборантскому составу

Весь инженерно-технический персонал лаборатории: заведующий лабораторией (кабинета), инженеры, старшие лаборанты – участвуют в подготовке и проведении лабораторных занятий и несут ответственность за качество подготовки материальной части.

Лаборантский состав обязан знать все лабораторные работы, должен лично проделать каждую работу в объеме данного руководства. При опросе студентов преподавателем должны присутствовать все лаборанты, участвующие в проведении той или иной работы. В процессе проведения работ лаборанты должны следить за соблюдением техники безопасности и строгого порядка в лаборатории. При проверке схем лаборант обязан указать, правильно или неправильно собрана электрическая схема. Если схема собрана неправильно, следует дать возможность самим студентам найти неправильное соединение и устранить их. Если схема собрана правильно, но небрежно, следует указать, как лучше собрать схему, и потребовать выполнения указаний. Включение схем под напряжение производится под личным наблюдением лаборанта. Лаборанты должны следить за правильностью выполнения работы, помогать студентам советами и указаниями, однако, во всех случаях запрещается выполнение работы за студентов.

По окончании занятий лаборанты обязаны принять от старших групп рабочие места, проверить исправность оборудования лабораторной установки и при наличии замечаний доложить преподавателю. На подведение итогов должны присутствовать все лаборанты, участвовавшие в проведении занят**ий**.

Лабораторная работа № 1

Тема. Исследование передачи электрической энергии по линии постоянного тока

1.1. Цель работы

1. Ознакомление студентов с основными правилами сборки схем, выполнения эксперимента, ведения протокола наблюдений и составление отчета о проделанной работе.

2. Исследование основных закономерностей передачи электрической энергии по двухпроводной линии постоянного тока от источника к приемнику электрической энергии.

1.2. Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.1

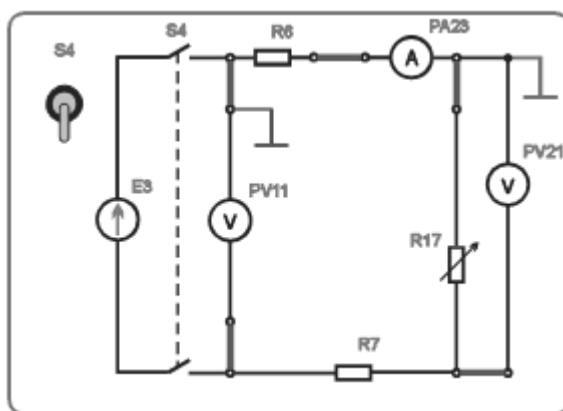


Рис. 1.1

Основными элементами схемы являются резисторы R_6 и R_7 , представляющие собой эквивалент сопротивления линии электропередачи; резистор R_{17} величина его сопротивления изменяется с помощью галетного переключателя и является приемником электрической энергии. Источником электрической энергии (активный двухполюсник) служит E_3 . Для измерения напряжения на источнике E_3 служит вольтметр PV11, а падения напряжения на приемнике R_{17} служит вольтметр PV21. Для измерения тока в цепи служит амперметр PA23. Измерение напряжений PV11, PV21 и тока PA23 производится с помощью измерительного комплекса, который включает в себя персональный компьютер. Значения измеряемых величин считываются с монитора компьютера. Тумблеры S4, S1, S45 предназначены для коммутации в электрической цепи и подачи питания на лабораторную установку.

Тумблер S1 (см. рис. 1.2) предназначен для подачи напряжения 380 В на лабораторную установку. При включении тумблера S1 загораются индикаторные лампы А, В, С, указывающие на наличие напряжения на всех трех фазах установки.



Рис. 1.2



Рис. 1.3

С помощью тумблера S45 питающее напряжение подается на лабораторный автотрансформатор ЛАТР (см. рис. 1.3), позволяющий изменять напряжение в цепях лабораторной установки от 0 до 220 В с шагом 1 В.

Переключатель S42 позволяет коммутировать диапазон изменения выходного напряжения ЛАТР, при этом в положении переключателя вниз (100 В ← 0В) напряжение регулируется в пределах 0 – 110 В, в положении переключателя вверх (110 В → 210 В) напряжение регулируется в пределах 110 В – 210 В.

Внимание! Перед включением тумблера S45 убедитесь в том, что переключатель S42 установлен в положение 100 В ← 0 В (вниз), а галетные переключатели, регулирующие выходное напряжение ЛАТР, установлены в **положение 0**.

1.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал, указанный в списке литературы. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, вычерчивает схему лабораторной установки.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачу.

Таблица 1.1

№ варианта	$U_1, В$	$R_{л}, Ом$	$R_{н}, Ом$
1	6,4	6	0...16
2	6,4	9	0...16
3	6,4	6,6	0...16
4	6,4	4,6	0...16
5	6,4	12,2	0...70
6	6,4	11,8	0...70
7	6,4	14,0	0...70
8	6,4	21	0...70
9	6,4	6	0...80
10	6,4	9	0...80
11	6,4	6,6	0...80
12	6,4	4,6	0...80
13	6,4	12,2	0...80
14	6,4	11,8	0...80
15	6,4	14,0	0...80
16	6,4	21	0...80
17	6,4	6	0...100
18	6,4	9	0...100
19	6,4	6,6	0...100
20	6,4	4,6	0...100
21	6,4	12,2	0...100
22	6,4	11,8	0...100
23	6,4	14,0	0...100
24	6,4	21	0...100

З а д а ч а

Источник напряжения постоянного тока U_1 через двухпроводную линию, сопротивление которой $R_{л}$, нагружен на сопротивление R (рис. 1.4). Определить ток I в цепи, мощность на нагрузке $P_{н}$, мощность источника P_0 и его КПД при следующих значениях:

$$R_{н} = 0; \quad 0,25 \cdot R_{н}; \quad 0,5 \cdot R_{н}; \quad 1 \cdot R_{н}; \quad 2 \cdot R_{н}; \quad 5 \cdot R_{н}.$$

По найденным значениям построить графики зависимости тока (I), мощности нагрузки (P_H), мощности источника (P_0), КПД линии ($\eta = \frac{P_H}{P_0} \cdot 100\%$), напряжения на нагрузке (U_2) от отношения R/R_L .

Определить при каком соотношении R_H и R_L на нагрузке выделяется максимальная мощность. Чему равен КПД в этом режиме?

Исходные данные U_1 , R_L , R_H берутся из табл. 1.1 в соответствии с вариантом.

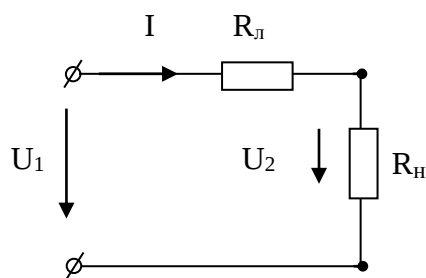


Рис. 1.4

1.3.2. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Собрать схему изображенную на рис. 1.1 и предъявить для проверки преподавателю.

2. Включить тумблер S1 “Сеть” (положение тумблера «вверх»).

3. Включить тумблер S4 (положение тумблера «вверх»).

4. Включить тумблер S45 “ЛАТР” (положение тумблера «ВКЛ»).

5. По вольтметру PV11 выставить ЭДС источника, заданное преподавателем.

6. Начиная с режима **короткого замыкания** (когда сопротивление резистора $R_{17} = 0$), переключать галетник с шагом равным 10 Ом до 100 Ом.

7. Показания вольтметров PV11 (U_1), PV21 (U_2) и амперметра PA23 (I) заносим в табл. 1.2 после каждого шага галетного переключателя.

8. Тумблер S4 перевести в положение «вниз».

9. Тумблер S45 перевести в положение «вниз».

10. Тумблером S1 отключить лабораторный стенд от трехфазной сети переменного тока (положение тумблера «вниз»)

11. Результаты эксперимента предъявить преподавателю и по его указанию либо повторно произвести некоторые опыты, либо приступить к разборке схемы.

12. Составить отчет о выполненной лабораторной работе и в указанные сроки сдать ее преподавателю.

Таблица 1.2

Исследование режимов передачи энергии от источника к нагрузке

Измерено				Рассчитано							
E, (E ₃)	I, (PA23)	U ₁ , (PV11)	U ₂ , (PV21)	ΔU	$R_6 + R_7$	R_{17}	$\frac{R_{17}}{R_6 + R_7}$	P_1	P_2	ΔP	η
В	А	В	В	В	Ом	Ом		Вт	Вт	Вт	
...											

1.4. Основные теоретические положения

Передача электрической энергии от источника к приемнику является одной из важнейших задач теоретической и практической электротехники.

Основные вопросы и закономерности, связанные с этой задачей, весьма наглядно иллюстрируются на простейшем примере передачи энергии постоянным током по двухпроводной линии при условии, что напряжение U_1 на входных зажимах линии поддерживается постоянным, а сопротивление R приемника изменяется.

Эквивалентная схема передачи электрической энергии от источника к приемнику изображена на рис. 1.4. Так как все приемники электрической энергии изготавливаются для работы при определенном напряжении и для каждого типа приемников устанавливаются границы допустимого понижения напряжения на его зажимах, то при передаче энергии очень важен вопрос о падении (потере) напряжения в линии и о напряжении U_2 на зажимах приемника. Под падением напряжения (или потерей напряжения) принято понимать разность между напряжением U_1 в начале линии (напряжением на зажимах источника) и напряжением U_2 в конце линии (напряжением на зажимах приемника), т.е.

$$\Delta U = U_1 - U_2 = I \cdot R_{\text{л}} = I \frac{2\ell}{\gamma S}, \quad (1.1)$$

где I – ток в линии;

$R_{\text{л}}$ – омическое сопротивление обоих проводов линии;

ℓ – длина одного провода линии;

S – площадь поперечного сечения провода;

γ – удельная проводимость материала провода.

Под омическим сопротивлением следует понимать сопротивление, оказываемое проводником постоянному току в установившемся режиме.

Выражение (1.1) показывает, что падение напряжения пропорционально току и сопротивлению линии. Напряжение в конце линии меньше напряжения в начале линии на величину падения напряжения в ней

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - I \cdot R_{\text{л}}. \quad (1.2)$$

Если напряжение U_1 в начале линии поддерживается постоянным при любой нагрузке, то напряжение в конце линии линейно связано с током в линии. Ток в линии зависит от величины сопротивлений линии $R_{\text{л}}$, приемника R и напряжений U_1 или U_2

$$I = \frac{U_1}{R_{\text{л}} + R} = \frac{U_2}{R} = \frac{U_1 - U_2}{R_{\text{л}}}. \quad (1.3)$$

При холостом ходе, когда линия разомкнута ($R = \infty$), ток в линии равен нулю. При уменьшении сопротивления приемника R , ток в линии будет увеличиваться, а напряжение U_2 – уменьшаться по линейному закону.

При коротком замыкании линии, т.е. когда $R=0$, ток в ней будет наибольшим

$$I_k = \frac{U_1}{R_{\text{л}}}, \quad (1.4)$$

а напряжение U_2 на зажимах приемника будет равно нулю.

Другим важным вопросом исследования передачи энергии является вопрос о мощности P_2 , получаемой приемником. Потеря мощности ΔP в линии, обусловленная преобразованием электрической энергии в тепловую в сопротивлении линии, пропорциональна сопротивлению линии и квадрату тока в ней

$$\Delta P = I^2 \cdot R_{\text{л}}. \quad (1.5)$$

Входная мощность линии P_1 в начале линии (источника)

$$P_1 = U_1 \cdot I = \frac{U_1^2}{R_{\text{л}} + R} = I^2(R_{\text{л}} + R). \quad (1.6)$$

Мощность P_2 в конце линии (приемника)

$$P_2 = U_2 \cdot I = I^2 R = \frac{U_1^2 R}{(R_{\text{л}} + R)^2}. \quad (1.7)$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{U_1 I - I^2 R_{\text{л}}}{U_1 I} = 1 - \frac{I \cdot R_{\text{л}}}{U_1} = 1 - \frac{I}{I_k}, \quad (1.8)$$

где $I_k = \frac{U_1}{R_{\text{л}}}$ - ток короткого замыкания линии.

При холостом ходе потеря мощности в линии равна нулю и КПД $\eta = 1$. При увеличении тока КПД η будет уменьшаться по линейному закону, а мощность приемника P_2 будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, что объясняется различным изменением параметров I и R ($P_2 = I^2 R$). При коротком замыкании линии ($P_2 = 0$) мощность приемника P_2 и КПД линии η будут равны нулю. Это свидетельствует о том, что электрическая энергия, поступающая в линию, полностью преобразуется в тепловую в самой же **линии**.

Для определения условия, при котором передаваемая приемнику мощность P_2 имеет наибольшее значение, необходимо исследовать выражение для мощности P_2 на максимум

$$\frac{dP_2}{dR} = \frac{U_1^2 \left[(R + R_{\text{л}})^2 - 2R(R + R_{\text{л}}) \right]}{(R + R_{\text{л}})^4} = 0, \quad (1.9)$$

откуда $R = R_{\text{л}}$.

Следовательно, мощность, потребляемая приемником, будет иметь наибольшее значение, если сопротивление приемника и линии равны между собой. При этом мощность приемника

$$P_{2\max} = \frac{U_1^2}{4R_{\text{л}}} = \frac{U_1^2}{4R}. \quad (1.10)$$

Напряжение U_2 в конце линии

$$U_2 = I \cdot R = \frac{U_1 R}{R + R_{\text{л}}} = \frac{U_1}{2}. \quad (1.11)$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_1}{2U_1} = 0,5. \quad (1.12)$$

Из выражения (1.12) следует, что половина всей энергии, поступающей в линию от источника, преобразуется в тепло в проводах самой линии. На практике КПД передачи энергии обычно бывает порядка 0,95, что соответствует потерям 5 %.

При передаче энергии постоянным током относительное падение напряжения и относительная потеря мощности численно равны

$$\frac{\Delta U}{U_1} = \frac{I \cdot R_{\text{л}}}{U_1} = \frac{\Delta P}{P_1} \quad (1.13)$$

поэтому безразлично, как производить расчет проводов линии передачи: на потерю мощности или на падение напряжения.

Кривые, показывающие характер изменения U_2 , P_2 , ΔU , P_1 , η при изменении тока линии I , представлены на рис. 1.5. Так как U_2 , η , P_1 связаны с током линейно, для построения их зависимостей от тока достаточно знать координаты двух точек.

Таковыми могут быть точки, соответствующие режимам холостого хода и короткого замыкания (или какие-то **промежуточные**).

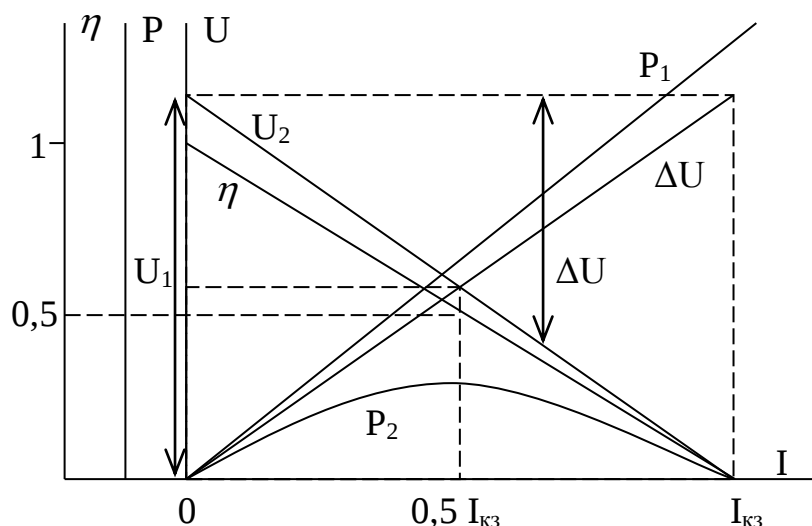


Рис. 1.5

1.5. Примерный план отчета по лабораторной работе

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется в журнале для лабораторных работ.

На первом этапе, при подготовке к лабораторной работе в журнал отчета заносится то, что указано в пункте 1.3.1.

На втором этапе, при проведении лабораторной работы, студенты записывают в табл. 1.2 измеренные и вычисленные физические величины.

По данным табл. 1.2 построить графики зависимости

$$U_2 = f\left(\frac{R_{17}}{R_6 + R_7}\right), P_1 = f\left(\frac{R_{17}}{R_6 + R_7}\right), P_2 = f\left(\frac{R_{17}}{R_6 + R_7}\right), \eta = f\left(\frac{R_{17}}{R_6 + R_7}\right)$$

(построение выполнить в одной системе координат с единым масштабом для мощностей).

На третьем этапе проанализировать построенные графики. Сформулировать выводы о результатах проведенной работы, в которых отразить:

- 1) при каком соотношении между R_{17} и $R_6 + R_7$ в нагрузке выделяется максимальная мощность;
- 2) чему равен КПД линии при этом соотношении;
- 3) целесообразно ли использовать режим максимальной мощности:
 - в силовых электроэнергетических системах;
 - в телефонии, средствах связи и системах автоматики.

1.6. Контрольные вопросы

1. Что называется падением напряжения?
2. Дайте определение КПД **линии**.

3. Что необходимо сделать, чтобы линия находилась в режиме холостого хода, короткого замыкания?
4. Чему равен ток в линии, потери мощности и КПД линии при холостом ходе?
5. Куда расходуется электроэнергия при коротком замыкании нагрузки?
6. При каком соотношении R_{17} и $R_6 + R_7$ мощность, потребляемая нагрузкой, будет максимальна?
7. Закон Ома для участка цепи без ЭДС.
8. Запишите выражение для мощности источника и мощности нагрузки.

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – 6-е изд. / Бессонов Л.А. – М.: Высшая школа, 1973. – С. 41 – 43.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 59 – 61.
3. Моряков В.Е. Постоянный ток / В.Е. Моряков. – Севастополь: СКУЭиП, 2013. – С. 17 – 28.
4. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 2

Тема. Исследование сложной линейной электрической цепи постоянного тока

2.1. Цель работы

1. Экспериментальная проверка первого закона Кирхгофа.
2. Экспериментальная проверка второго закона Кирхгофа.
3. Экспериментальная проверка метода наложения.

2.2. Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.1.

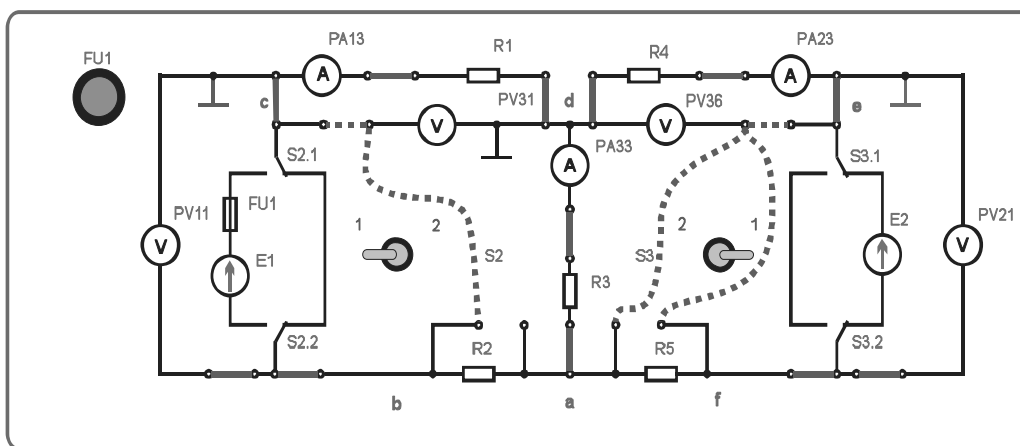


Рис. 2.1

Блок содержит два источника ЭДС E1 и E2. Значение ЭДС источника E1 фиксировано и составляет порядка 40 В. Значение ЭДС источника E2 может регулироваться с помощью ЛАТРа в диапазоне 0 В...100 В с шагом 1 В.

Тумблеры S2 и S3 предназначены для коммутации источников ЭДС E1 и E2. Переключение тумблера в положение “1” позволяет подключить соответствующий источник ЭДС к исследуемой цепи. Переключение тумблера в положение “2” позволяет отключить источник ЭДС, при этом вместо отключенного источника ЭДС в исследуемую цепь вводится перемычка. В качестве источника измерительной информации в лабораторном стенде используется измерительный комплекс на базе персонального компьютера.

Вольтметры PV11 и PV21 измерительного комплекса предназначены для измерения ЭДС источников E1 и E2. Вольтметры PV31 и PV36 предназначены для измерения потенциалов точек a, b, c, e, f относительно узла d. Амперметры PA13, PA23, PA33 используются для измерения силы **тока в**

ветвях исследуемой цепи. Значения измеряемых величин выводятся на монитор персонального компьютера.

2.3. Порядок выполнения лабораторной работы

2.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал по литературе, указанной в списке литературы. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, изображает схему лабораторной установки, таблицы для фиксации полученных экспериментальных данных.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачу.

Таблица 2.1

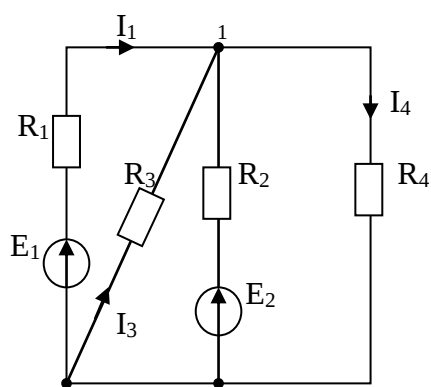
№ варианта	Номер схемы	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$
1	а	2,4	3,6	0	470	1000	200	62	0	0
2	б	3,6	0	2,4	470	-	200	750	1000	1500
3	б	1,2	2,4	2,4	470	1000	200	750	-	1500
4	б	1,2	2,4	2,4	470	1000	200	750	62	-
5	б	2,4	3,6	0	470	1000	-	750	62	200
6	в	2,4	2,4	1,2	1000	100	470	62	-	-
7	в	3,6	2,4	0	1000	100	-	62	200	-
8	в	2,4	2,4	1,2	200	100	470	62	750	-
9	г	2,4	2,4	1,2	750	1000	470	200	100	62
10	г	2,4	2,4	1,2	750	1000	470	200	100	-
11	г	3,6	2,4	0	750	1000	-	200	100	470
12	г	2,4	2,4	1,2	750	-	470	200	100	-
13	б	0	3,6	2,4	-	470	200	750	100	1000
14	г	0	2,4	3,6	750	-	470	200	100	62

Примечание. Если вместо значения сопротивления указан пробел (-), то следует считать сопротивление равным бесконечности, т.е. имеет место обрыв в цепи.

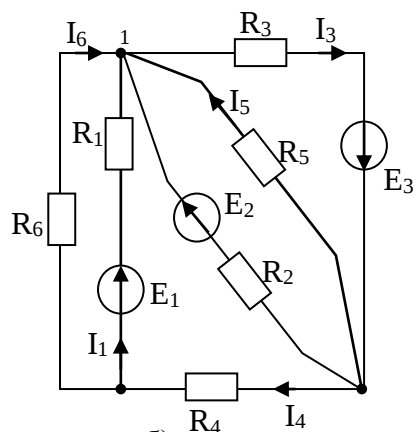
З а д а ч а 1

Определить токи в ветвях схемы (см. рис. 2.2) используя первый и второй законы Кирхгофа.

Изобразить схему согласно заданному варианту и записать составленные по первому и второму законам Кирхгофа уравнения для расчета токов в ветвях в журнале лабораторных работ. На схеме должны быть изображены сплошными линиями принятые в расчете направления токов в **ветвях**.

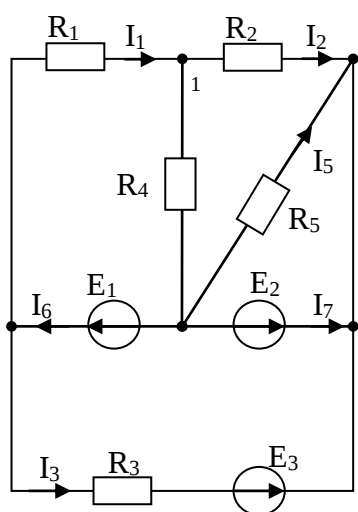


а)

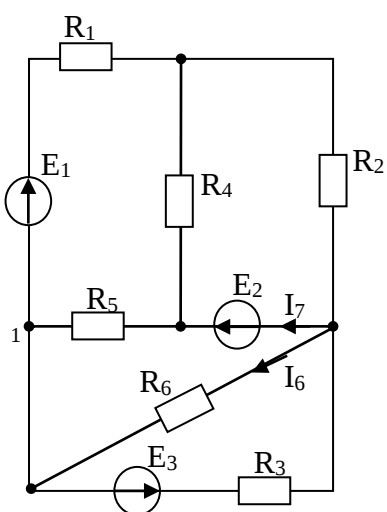


б)

Рис. 2.2



в)



г)

Рис. 2.2

2.3.2. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Измерить ЭДС источников электрической энергии.

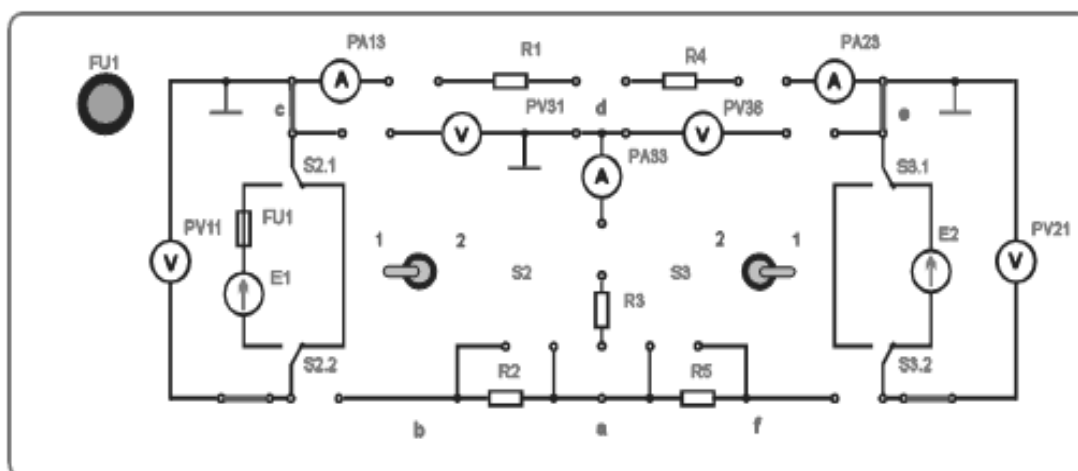


Рис. 2.3

Собрать схему изображенную на рис. 2.3. Предъявить для проверки преподавателю.

Включить тумблер S1 “Сеть”.

Переключить тумблер S2 и S3 в положение “1”.

Включить ЛАТР тумблером S45. **Установить величину ЭДС источника E2 равной величине ЭДС источника E1.**

Для этого с помощью ЛАТРа выставить напряжение на вольтметре PV21 равное величине напряжения на вольтметре PV11.

- Показания вольтметров PV11 и PV21 занести в табл. 2.2

- Тумблеры S2 и S3 перевести в положение “2”.

2. Выполнить экспериментальную проверку первого и второго законов Кирхгофа.

1) Собрать схему изображенную на рис. 2.1. Предъявить для проверки преподавателю.

2) Измерить токи в ветвях.

Для этого:

- тумблеры S2 и S3 перевести в положение “1”;

- показания амперметров PA13, PA23, PA33 занести в табл. 2.2;

- тумблеры S2 и S3 перевести в положение “2”.

3) Измерить потенциалы в точках “а”, “б”, “с”, “е”, “f” относительно точки “d”. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Для этого:

- установить перемычку, выделенную на схеме 2.1 пунктирной линией, соединяющую точку “с” с вольтметром PV31;

- включить тумблеры S2 и S3 в положение “1”;

- измерить потенциал точки “с” относительно точки “d” с помощью вольтметра PV31;

- переместить перемычку в точку “б” (обозначена пунктирной линией на схеме 2.1);

- измерить потенциал точки “б” относительно точки “d” с помощью вольтметра PV31;

- перевести тумблеры S2 и S3 в положение “2”;

- убрать перемычку, соединяющую вольтметр PV 31 с точкой “б”;

- **установить перемычку**, соединяющую вольтметр PV36 с точкой “е” (пунктирная линия на схеме 2.1);

- включить тумблеры S2 и S3 в положение “1”;

- с помощью вольтметра PV36 измерить потенциал в точке “е” относительно точки “d”;

- последовательно перемещая перемычку в точки “а” и “f”, зафиксировать по показаниям вольтметра PV36 потенциалы точек “а” и “f”;

- перевести тумблеры S2 и S3 в положение “2”;

- убрать перемычку, соединяющую вольтметр PV36 с **точкой “f”**.

Таблица 2.2

Измерено													
E1, (PV11)	E2, (PV21)	φe, (PV36)	φf, (PV36)	φa, (PV36)	φb, (PV31)	φc, (PV31)	I1, (PA13)	I2, (PA23)	I3, (PA33)				
B	B	B	B	B	B	B	A	A	A				
Рассчитано													
Uab	Ubc	Ucd	Ude	Uef	Ufa	Uda	R2	Rbc	R1	R4	Ref	R5	R3
B	B	B	B	B	B	B	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

4) Используя полученные экспериментальным путем данные выполнить расчет:

- напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{cd} , U_{de} , U_{ef} , U_{fa} , U_{da} на участках цепи;
- сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 в ветвях цепи;
- внутренних сопротивлений источников напряжения R_{bc} , R_{ef} .

Полученные расчетные данные занести в табл. 2.2.

5) Руководствуясь расчетной схемой экспериментальной установки изображенной на рис. 2.4, используя данные табл. 2.2, проверить справедливость первого и второго законов Кирхгофа. Для этого:

- в расчетной схеме указать положительные направления токов I_1 , I_2 , I_3 , составить уравнение по первому закону Кирхгофа для узла "d", подставить полученные опытным путем значения токов I_1 , I_2 , I_3 в составленное уравнение. Полученный результат занести в табл. 2.3.

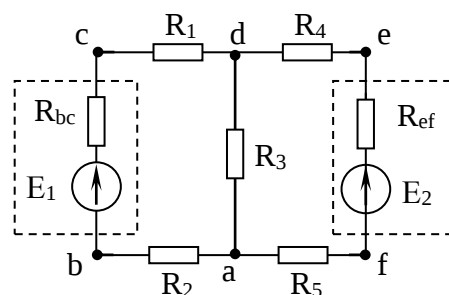


Рис. 2.4

Таблица 2.3

I закон Кирхгофа для узла "d"	II закон Кирхгофа		
	Контур a-b-c-d	Контур a-d-e-f	Контур a-b-c-d-e-f
$\sum I$, А	$\sum U$, В	$\sum U$, В	$\sum U$, В

- руководствуясь расчетной схемой составить уравнения по II закону Кирхгофа для контуров «a-b-c-d», «a-d-e-f», «a-b-c-d-e-f»;
- подставить в уравнения значения напряжений на участках исследуемой цепи из табл. 2.2. Результаты вычислений занести в табл. 2.3;
- построить потенциальную диаграмму для контура «a-b-c-d-e-f».

3. Экспериментальная проверка метода наложения.

- 1) Исследовать схему при использовании только источника ЭДС E1:
 - включить источник E1. Для этого: тумблер S2 перевести в положение “1”, а тумблер S3 оставить в положении “2”;
 - показания амперметров PA13, PA23, PA33 и вольтметра PV11 занести в табл. 2.4.
- 2) Исследовать схему при использовании только источника ЭДС E2.
 - Включить источник E2. Для этого: тумблер S2 перевести в положение “2”, а тумблер S3 в положение “1”;
 - показания амперметров PA13, PA23, PA33 и вольтметра PV21 занести в табл. 2.4;
 - тумблер S3 перевести в положение “2”;
 - тумблер S45 “ЛАТР” перевести в положение “ВЫКЛ”;
 - тумблером S1 “Сеть” отключить лабораторный стенд от трехфазной сети.

Таблица 2.4

Измерено								Рассчитано		
E1	I'1	I'2	I'3	E2	I''1	I''2	I''3	I1	I3	I2
В	А	А	А	В	А	А	А	А	А	А
Рассчитано								Измерено ранее		

3) Используя полученные опытным путем данные рассчитать токи в исходной цепи. Результаты расчетов занести в табл. 2.4 и сравнить с токами, полученными опытным путем при проверке первого закона Кирхгофа.

4) Выполнить аналитическим путем расчет цепи по методу наложения. Исходные данные для сопротивлений и ЭДС взять из табл. 2.2. Сравнить полученные расчетным и экспериментальным путем значения токов в цепи.

2.4. Основные теоретические положения

Энергетическое состояние любой, сколь угодно сложной, электрической цепи постоянного тока полностью характеризуется двумя законами Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа относится к узловым точкам электрической цепи, выражает принцип непрерывности электрического тока и формулируется так: *алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю.*

Второй закон Кирхгофа устанавливает связь между электродвижущими силами и падениями напряжений в контуре электрической **цепи**.

Он формулируется так: *алгебраическая сумма электродвижущих сил в контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на участках этого контура.*

Законы Кирхгофа лежат в основе всех методов расчета электрических цепей. Наиболее простым и понятным является расчет электрической цепи, основанный на непосредственном применении этих законов. Расчет цепи состоит в определении токов на отдельных участках цепи. Ясно, что эту задачу можно решить, если известны сопротивления всех приемников, электродвижущие силы источников электрической энергии и их внутренние сопротивления.

Составив для заданной схемы по законам Кирхгофа систему уравнений (по числу неизвестных) и решив ее, можно найти действительные токи в каждой из ветвей схемы. Однако, ту же задачу можно решить другими методами, в частности, методом наложения. Суть метода наложения состоит в том, что при линейной зависимости токов в электрической цепи от действующих ЭДС ток на любом участке цепи можно рассматривать как алгебраическую сумму токов, создаваемых независимым действием отдельных ЭДС. Иными словами, для определения токов в ветвях необходимо в схеме электрической цепи поочередно оставлять по одной электродвижущей силе и определять токи в каждой из ветвей от каждой ЭДС.

Действительные токи в ветвях равны алгебраической сумме токов, вызванных в них каждой ЭДС в отдельности. Необходимо помнить, что внутренние сопротивления источников электрической энергии, ЭДС которых приравнивается нулю, в расчетных схемах остаются.

Следует также иметь в виду, что метод применим только к линейным цепям, поэтому мощности нельзя определять по методу наложения, так как они являются квадратичными функциями тока.

2.5. Примерный план отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе выполняется в журнале для лабораторных работ.

На первом этапе, при подготовке к лабораторной работе в журнал заносится то, что указано в пункте 2.3.1.

На втором этапе, при проведении лабораторной работы, студенты заполняют табл. 2.2, 2.3, 2.4, занося в них экспериментальные и расчетные данные, строят потенциальную диаграмму внешнего контура исследуемой цепи (a-b-c-d-e-f).

На третьем этапе производится анализ полученных результатов и формулируются выводы по проделанной работе.

В выводе необходимо отразить:

а) подтверждены ли экспериментальными данными первый и второй законы **Кирхгофа**;

б) подтверждена ли экспериментальными данными возможность расчета линейных электрических цепей методом наложения.

2.6. Контрольные вопросы

1. Что называют узлом, ветвью, контуром?
2. Запишите закон Ома для участка цепи без ЭДС, для участка цепи с ЭДС.
3. Запишите и сформулируйте законы Кирхгофа.
4. Каков порядок расчета сложных линейных электрических цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа?
5. Какие электрические цепи называются линейными?
6. Как проверить правильность расчета токов в сложной электрической цепи?
7. Какие источники электрической энергии называют идеальными? Охарактеризуйте их.

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973. – С. 8 – 13.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 14 - 21.
3. Моряков В.Е. Постоянный ток / В.Е. Моряков. – Севастополь: СМУЯЭиП, 2013. – С. 17 – 28.
4. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 3

Тема. Исследование магнитной цепи

3.1. Цель работы

Исследование зависимостей магнитного потока от намагничивающего тока и от величины воздушного зазора.

3.2. Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.1.

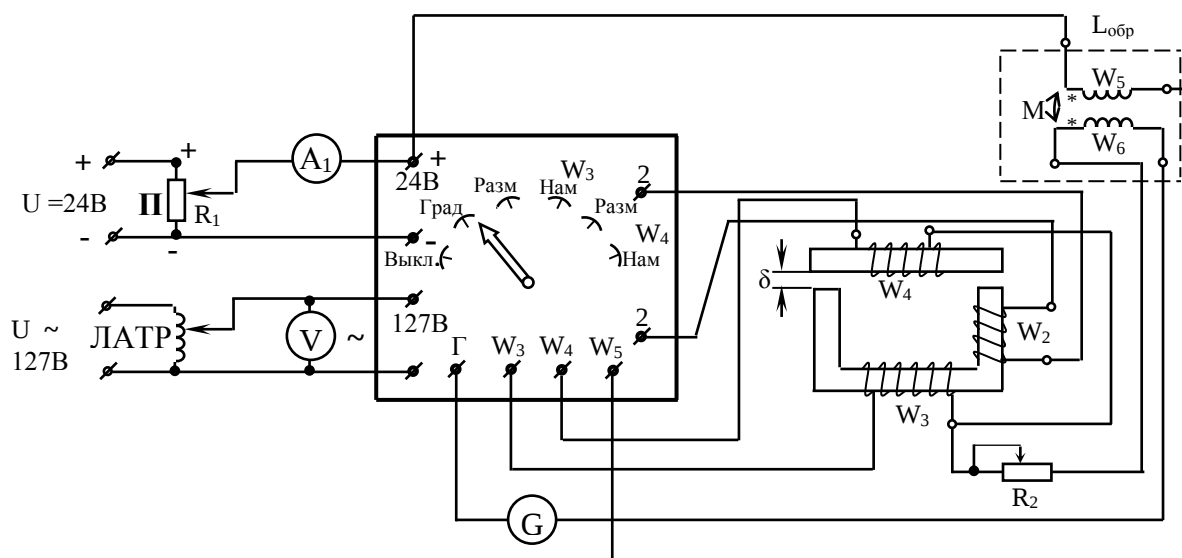


Рис. 3.1

Таблица 3.1

Номер отсчета	Измерено						Вычислено			
	W_3 $\alpha_0/\text{дел}$	W_4 $\alpha_{\text{я}}/\text{дел}$	градуир.		I, A	δ , мм	Φ_0 , б	$\Phi_{\text{я}}$, б	L_2 , Гн	K_S
			ΔI , A	α						
Опыт 1										
1										
2										
3										
4										
5										
6										
Опыт 2										
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Исследуемая магнитная цепь состоит из П-образного неподвижного сердечника и подвижного якоря. Сердечник и якорь собраны из листовой электротехнической стали.

Величина воздушного зазора между сердечником и якорем может изменяться с помощью специального устройства.

На сердечнике находятся намагничивающая обмотка W_2 , она же и размагничивающая W_2 и измерительная обмотка W_3 . На якоре имеется измерительная обмотка W_4 . Катушки индуктивности W_5 и W_6 , взаимная индуктивность M между которыми известна, предназначены для градуировки установки. Сопротивление R_1 работающее в режиме потенциометра и R_2 позволяют регулировать величины токов в соответствующих цепях.

Пульт обеспечивает необходимую коммутацию цепей установки. Установка имеет питание от двух источников постоянного (напряжение 24 В) и переменного (напряжение 127 В) тока.

В схему включены электроизмерительные приборы: А – амперметр, V – вольтметр, G – гальванометр.

3.1. Порядок выполнения лабораторной работы

3.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал по литературе, указанной в списке литературы. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, изображает схему лабораторной установки, таблицы для фиксации полученных экспериментальных данных.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачу.

З а д а ч а

На рис. 3.2 изображен магнитопровод, выполненный из электротехнической стали 1511 (кривая намагничивания табл. 3.2).

Определить значение намагничивающего тока I , если даны сечения участков S_1, S_2, S_3 , длины участков ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 и количество витков обмотки W и магнитный поток Φ (значения в табл. 3.3 по номеру варианта).

Таблица 3.2

B, Тл	0,14	0,35	0,55	0,62	0,76	0,88	0,98	1,03	1,09	1,17	1,23	1,3
H, А/м	20	40	60	80	100	140	180	240	500	600	800	1000

Таблица 3.3

№ варианта	$\ell_1, \text{м}$	$\ell_2, \text{м}$	$\ell_3, \text{м}$	$S_1, \text{м}^2$	$S_2, \text{м}^2$	$S_3, \text{м}^2$	W	$\Phi, \text{Вб}$
1	0,6	0,2	0,1	0,007	0,002	0,007	10	$1,0 \cdot 10^{-3}$
2	0,7	0,3	0,2	0,008	0,003	0,008	15	$1,2 \cdot 10^{-3}$
3	0,8	0,4	0,3	0,009	0,004	0,009	10	$1,3 \cdot 10^{-3}$
4	0,9	0,5	0,1	0,01	0,002	0,01	15	$1,4 \cdot 10^{-3}$
5	1,0	0,6	0,2	0,015	0,003	0,015	10	$1,5 \cdot 10^{-3}$
6	0,6	0,2	0,3	0,007	0,004	0,007	15	$1,0 \cdot 10^{-3}$
7	0,7	0,3	0,1	0,008	0,002	0,008	10	$1,2 \cdot 10^{-3}$
8	0,8	0,4	0,2	0,009	0,003	0,009	15	$1,3 \cdot 10^{-3}$
9	0,9	0,5	0,3	0,01	0,004	0,01	10	$1,4 \cdot 10^{-3}$
10	1,0	0,6	0,1	0,015	0,002	0,015	15	$1,5 \cdot 10^{-3}$
11	0,2	0,6	0,1	0,002	0,007	0,007	10	$1,0 \cdot 10^{-3}$
12	0,3	0,7	0,2	0,003	0,008	0,008	15	$1,2 \cdot 10^{-3}$
13	0,4	0,8	0,3	0,004	0,009	0,009	10	$1,3 \cdot 10^{-3}$
14	0,5	0,9	0,1	0,002	0,01	0,01	15	$1,4 \cdot 10^{-3}$
15	0,6	1,0	0,2	0,003	0,015	0,015	10	$1,5 \cdot 10^{-3}$
16	0,2	0,6	0,3	0,004	0,007	0,007	15	$1,0 \cdot 10^{-3}$
17	0,3	0,7	0,1	0,002	0,008	0,008	10	$1,2 \cdot 10^{-3}$
18	0,4	0,8	0,2	0,003	0,009	0,009	15	$1,3 \cdot 10^{-3}$
19	0,5	0,9	0,3	0,004	0,01	0,01	10	$1,4 \cdot 10^{-3}$
20	0,6	1,0	0,1	0,002	0,015	0,015	15	$1,5 \cdot 10^{-3}$

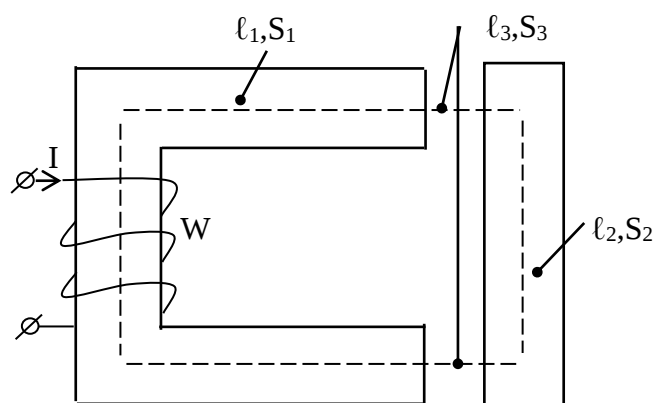


Рис. 3.2

3.3.2. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Произвести градуировку установки, схема которой изображена на рис. 3.1.

2. Снять зависимости $\Phi_0 = f_1(I \cdot W_1)$ и $\Phi_{\text{я}} = f_2(I \cdot W_1)$ при $\delta = \text{const}$, где Φ_0 - полный магнитный поток;

$\Phi_{\text{я}}$ - основной магнитный поток;

$I \cdot W_1$ - намагничивающая сила;

δ - величина воздушного зазора магнитопровода.

3. Снять зависимости $\Phi_0 = f_3(\delta)$ и $\Phi_{\text{я}} = f_4(\delta)$ при $I = \text{const}$.

4. Построить кривые зависимости коэффициента рассеяния от величины воздушного зазора.

5. Построить графики зависимостей $L_2 = f_5(I)$ при $\delta = \text{const}$ и $L_2 = f_6(\delta)$ при $I = \text{const}$.

Работа начинается с градуировки, то есть с определения постоянной k для данной установки. Для этой цели в схеме предусмотрены катушки индуктивности W_5 и W_6 , взаимная индуктивность M между которыми известна. Катушка W_5 включается в цепь постоянного тока, W_6 – в цепь гальванометра. При изменении тока в обмотке W_5 на величину ΔI потокосцепление обмотки W_6 изменится на величину

$$\Delta \Psi = M \cdot \Delta I = k \cdot \alpha, \text{ откуда } k = \frac{M \cdot \Delta I}{\alpha}.$$

Изменение тока в обмотке W_5 производим следующим образом:

- переключатель пульта устанавливаем в положение «Градуировка». При помощи потенциометра Π изменяем ток I_1 , делаем 3–4 измерения тока ΔI и α (отклонение гальванометра). Показания приборов заносим в таблицу – графа «Градуировка». При этом ток в обмотке W_5 изменится от 0 до I , то есть на величину $\Delta I = I$, а потокосцепление обмотки W_6 – от 0 до Ψ , то есть на величину $\Delta \Psi = \Psi$. Как видно из схемы рис. 3.1, сопротивление цепи гальванометра R , от которого зависит постоянная k , остается неизменным, как при градуировке, так и при измерении потоков исследуемой магнитной цепи. Постоянная k определяется как среднее арифметическое величин, полученных при нескольких различных значениях ΔI .

По второму пункту программы необходимо измерить магнитные потоки Φ_0 и Φ_γ при разных величинах зазоров и разных токах в намагничивающей обмотке. Для того, чтобы получить изменение магнитного потока от нуля до какого-либо значения Φ , соответствующего току I , необходимо произвести измерение при включении тока I в намагничивающую обмотку предварительно размагниченной магнитной цепи.

Производить измерения при отключении тока нельзя, так как вследствие гистерезиса при отключении поток изменился бы от начального значения Φ не до нуля, а до некоторого значения, обусловленного остаточной индукцией. Перед каждым измерением необходимо производить размагничивание магнитной цепи. Для этой цели служит обмотка W_2 , через которую пропускают переменный ток частоты 50 Гц. Плавно перемещая ручку ЛАТРа, переменный ток в обмотке W_2 уменьшают от некоторого максимального значения до нуля.

Для снятия кривых $\Phi_0 = f_1(I \cdot W_1)$ и $\Phi_\gamma = f_2(I \cdot W_1)$ при постоянной величине воздушного зазора δ следует перевести переключатель пульта в положение «намагничивание» W_3 и потенциометром Π установить **необ-**

ходимую величину тока, при этом постоянный ток подается на намагничивающую обмотку W_2 в измерительной обмотке W_3 индуцируется ЭДС, которое фиксирует гальванометр.

Показания приборов: амперметр $A(I)$; гальванометр $\Gamma (\alpha_0)$, величина зазора δ , занести в таблицу. Затем необходимо размагнитить сердечник катушки и якорь переменным током. Для этого перевести переключатель пульта в положение «размагничивание».

Для каждого значения тока I записать величины отклонения гальванометра α_0 и $\alpha_{\text{я}}$ показания заносим в таблицу. Перед каждым включением переключателя в положение «намагнич. W_3 » и «намагнич. W_4 » произвести размагничивание сердечника.

Снятие кривых $\Phi_0 = f_3(\delta)$ и $\Phi_{\text{я}} = f_4(\delta)$ по п.3 производится аналогично. Устанавливаем определенную величину тока I и изменяем величину воздушного зазора δ . Для каждого значения величины отклонения гальванометра α_0 и $\alpha_{\text{я}}$ заносим в таблицу. Разница состоит в том, что в при неизменном зазоре изменяется намагничивающий ток, а при неизменном намагничивающем токе I изменяется воздушный зазор δ . Графики зависимостей $\Phi_0 = f_3(\delta)$ и $\Phi_{\text{я}} = f_4(\delta)$ необходимо построить на одном рисунке, после чего можно рассчитать и построить зависимость коэффициента рассеяния от величины воздушного зазора. По результатам проделанных измерений рассчитать и построить зависимость индуктивности L_2 намагничивающей обмотки от намагничивающего тока $L_2 = f_5(I)$ при постоянной величине воздушного зазора, а также зависимость $L_2 = f_6(\delta)$ при неизменном намагничивающем токе. Индуктивность определяется из хорошо известного соотношения

$$L = \frac{\Psi}{I}.$$

3.2. Основные теоретические положения

Величина полного магнитного потока Φ_0 , создаваемого намагничивающим током I , протекающим по обмотке W_2 , зависит от тока I , магнитных свойств материала сердечника и от величины воздушного зазора между якорем и сердечником. Такой вывод легко сделать, если написать закон Ома для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{\frac{\ell}{\mu_a S}},$$

где $\mu_a = \mu_0 \mu$ - абсолютная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная проницаемость;

μ - относительная магнитная **проницаемость**.

Полный магнитный поток Φ_0 частично проходит через якорь, образуя магнитный поток якоря $\Phi_{\text{я}}$, а частично замыкается через воздух (минуя якорь), образуя поток рассеяния Φ_s . Таким образом, полный магнитный поток равен

$$\Phi_0 = \Phi_{\text{я}} + \Phi_s.$$

На рис. 3.3 изображена типичная зависимость полного потока Φ_0 от намагничивающей силы $I \cdot W$, при различных величинах воздушного зазора δ . Как видно из рисунка, при $\delta = 0$ сердечник быстро насыщается. При значительных зазорах, например при $\delta = \delta_3$ насыщение практически трудно достижимо.

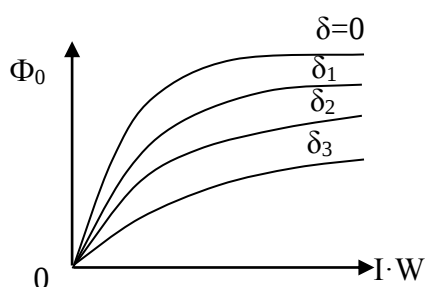


Рис. 3.3

Это объясняется тем, что с увеличением воздушного зазора δ растет магнитное сопротивление для основного магнитного потока, в результате чего последний уменьшается. С другой стороны, с увеличением воздушного зазора растет поток рассеяния.

Магнитный поток рассеяния, так же как и полный поток, является функцией величины воздушного зазора δ , намагничивающей силы $I \cdot W$ и магнитных свойств материала, из которого изготовлены сердечник и якорь.

Соотношение между полным магнитным потоком Φ_0 и магнитным потоком рассеяния Φ_s характеризуется коэффициентом рассеяния

$$k_s = \frac{\Phi_0 - \Phi_{\text{я}}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_s}{\Phi_0}.$$

Измерение магнитных потоков представляет большие трудности. В данной работе измерение магнитных потоков осуществляется баллистическим методом, впервые предложенным академиком Э.Х. Ленцем.

Для измерения полного магнитного потока Φ_0 в установке предусмотрена обмотка W_3 , для измерения основного магнитного потока $\Phi_{\text{я}}$ в якоре – обмотка W_4 . Каждая из этих обмоток имеет по 20 витков.

При изменении тока в обмотке W_2 в измерительных обмотках W_3 и W_4 индуцируется ЭДС. Количество электричества Q , прошедшее через гальванометр, пропорционально изменению потокоцепления обмотки, подключенной к гальванометру

$$Q = W \frac{\Delta \Phi}{R},$$

где W – число витков измерительной обмотки;

R – сопротивление цепи **гальванометра**.

Так как $Q = \alpha \cdot \Gamma_{\delta}$, где α – первое наибольшее по величине отклонение зайчика (светового указателя н) гальванометра, а Γ_{δ} – баллистическая постоянная гальванометра, то

$$W \cdot \Delta\Phi = \Gamma_{\delta} \cdot R \cdot \alpha = k \cdot \alpha.$$

Таким образом, для определения изменения потока следует постоянную $k = \Gamma_{\delta} \cdot R$ умножить на α и разделить на W .

$$\Phi = \frac{k \cdot \alpha}{W}.$$

3.3. Примерный план отчета по лабораторной работе

В отчет по лабораторной работе необходимо включить.

1. Графики зависимости $\Phi_0 = f_1(I \cdot W_1)$ и $\Phi_{\text{я}} = f_2(I \cdot W_1)$ при $\delta = \text{const}$;
2. Графики зависимости $\Phi_0 = f_3(\delta)$ и $\Phi_{\text{я}} = f_4(\delta)$ при $I = \text{const}$;
3. Кривые зависимости коэффициента рассеяния от величины воздушного зазора;
4. Графики зависимостей $L_2 = f_5(I)$ при $\delta = \text{const}$ и $L_2 = f_6(\delta)$ при $I = \text{const}$;
5. Выводы по лабораторной работе, которые необходимо отразить влияние намагничивающей силы и величины воздушного зазора на величину магнитных потоков.

3.4. Контрольные вопросы

1. Дать определение магнитной цепи.
2. Нарисовать типовую кривую намагничивания ферромагнитного материала.
3. Сформулировать основной закон магнитной цепи.
4. Сформулировать первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.
5. Сформулировать второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.
6. Что понимают под основной кривой намагничивания стали?

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1982. – С. 64 - 70.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - С. 418 – 419, С. 421 – 426.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 4

Тема. Исследование процессов в RL и RC цепях переменного тока

4.1. Цель работы

1. Исследование свойств RL и RC цепей при действии синусоидальных напряжений.
2. Экспериментальное определение параметров RL и RC цепей переменного тока.

4.2. Схема лабораторной установки

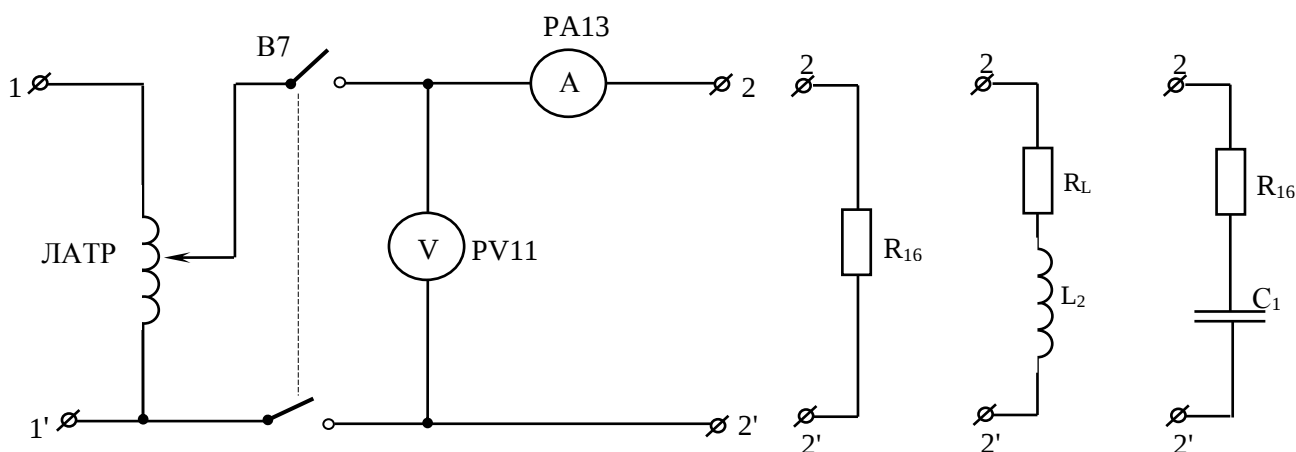


Рис. 4.1

Схема лабораторной установки состоит из измерительной цепи и трех пассивных двухполюсников первый из которых состоит из активного сопротивления R_{16} , второй из индуктивности L_2 (сопротивление R_L изображено условно и учитывает активную составляющую сопротивления катушки индуктивности L_2), третий двухполюсник представляет собой последовательное соединение емкости C_1 и активного сопротивления R_{16} .

Для проведения экспериментов двухполюсники поочередно подключаются к зажимам 2 - 2' измерительной цепи. Напряжение в исследуемой цепи регулируется с помощью автотрансформатора ЛАТР.

Для измерения величин тока и напряжения, а также наблюдения сигналов в цепи используется осциллограф на базе персонального компьютера. Измерительные каналы осциллографа, служащие для измерения действующего значения тока и напряжения, обозначены на схеме как амперметры и вольтметр и предназначены для:

PV11 – вольтметр для измерения напряжения, подаваемого на вход цепи;

PA 13 – амперметр для измерения тока исследуемой **цепи**.

Измеряемые величины тока и напряжения высвечиваются в соответствующих окнах на экране монитора. Кроме того, на экране монитора в окне PW высвечивается величина активной мощности, потребляемой исследуемой цепью.

Измерительная информация о напряжении и токе подается на соответствующие шлейфы осциллографа и служит для наблюдения на экране монитора формы кривых напряжения и токов, а также для оценки сдвига фаз между напряжением и током.

4.3. Порядок проведения работы

4.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, вычерчивает схему лабораторной установки.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачу.

Задача 1. По данным варианта табл. 4.1 определить комплекс действующего значения тока в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных сопротивления R и конденсатора C , при подаче на вход цепи напряжения U с частотой 50 Гц. Построить векторную диаграмму тока и напряжения.

Таблица 4.1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R , Ом	1000	330	900	450	470	680	100	100	120	150	600	300	900
C , мкФ	4,7	6,8	5,0	9,0	10,0	20,0	47,0	67,0	55,0	68,0	21,0	7,0	5,0
U , В	12	27	30	36	36	54	70	70	100	100	110	120	130

Задача 2. По данным варианта табл. 4.2 определить комплекс действующего значения тока в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных сопротивления R и индуктивности L , при подаче на вход цепи напряжения U с частотой 50 Гц. Построить векторную диаграмму тока и напряжения.

Таблица 4.2

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R , Ом	1	3,3	4,7	15	20,0	25,0	10	30	40	45	50	55	40
L , мГн	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0	50,0	10,0	30,0	60,0	70,0	90,0	90,0	100,0
U , В	12	27	36	54	70	100	40	50	60	70	80	90	110

Решение задач оформить в лабораторном журнале.

4.3.2. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Исследуем цепь переменного тока, содержащую активное сопротивление R_{16} .

Собрать цепь, изображенную на рис. 4.2 предъявить для проверки преподавателю, с разрешения преподавателя подать питание в исследуемую цепь для этого:

- включить тумблер «СЕТЬ» в положение вверх;
- включить тумблер S_7 и S_{45} в положение вверх;
- с помощью галетного переключателя ЛАТРа установить напряжение заданное преподавателем.

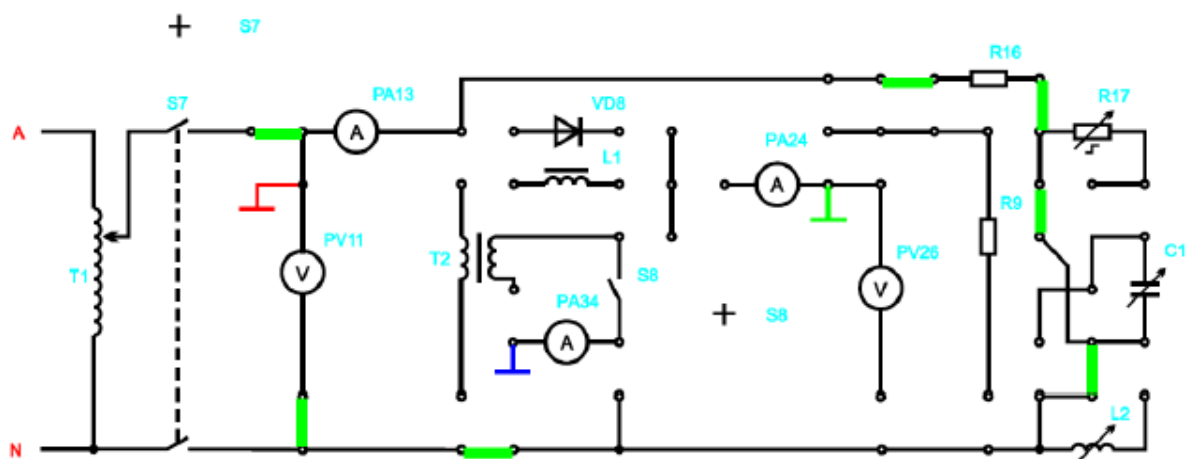


Рис. 4.2

Показания приборов $PV11(U)$; $PA13(I)$; $PW(P)$ занести в табл. 4.3. Снять осциллограммы тока и напряжения в цепи. Перевести тумблеры S_7 и S_{45} в выключенное положение. Сделать вывод о сдвиге фазы между напряжением и током. Построить векторную диаграмму.

2. Исследуем цепь переменного тока, содержащую катушку индуктивности L_2 . Собрать цепь, изображенную на рис. 4.3 предъявить для проверки преподавателю, с разрешения преподавателя подать питание в исследуемую цепь. Для этого перевести тумблеры S_7 и S_{45} в положение вверх.

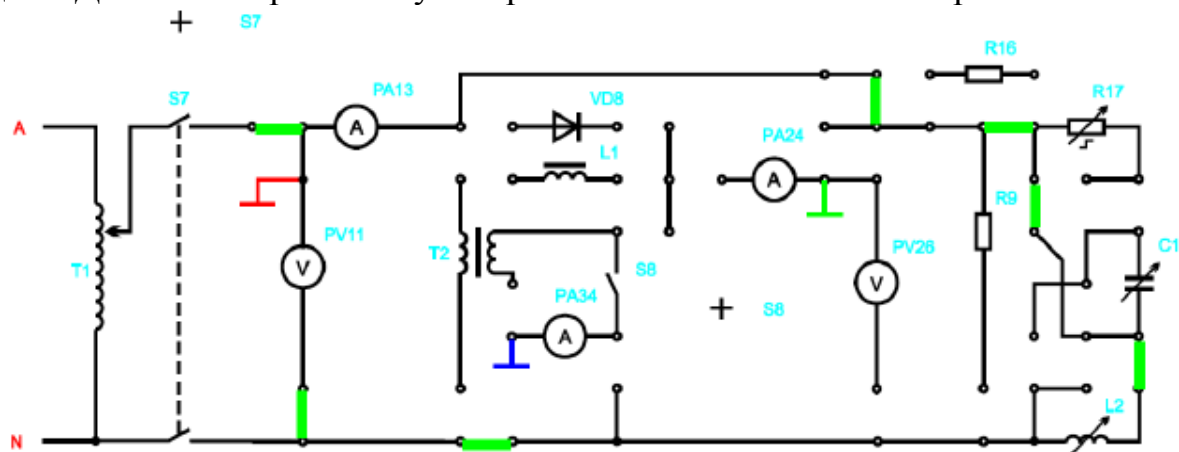


Рис. 4.3

Показания приборов PV11(U); PA13(I); PW(P) занести в соответствующую строку табл. 4.3. Снять осциллограммы тока и напряжения в цепи. Перевести тумблеры S7 и S45 в выключенное положение. Сделать вывод о сдвиге фазы между напряжением и током. Построить векторную диаграмму.

3. Исследуем цепь переменного тока, содержащую конденсатор C_1 и R_{16} . Собрать цепь, изображенную на рис. 4.4, предъявить для проверки преподавателю. Величину емкости C_1 задает преподаватель. С разрешения преподавателя подать питание в исследуемую цепь, переведя тумблеры S7 и S45 в положение вверх. Показания приборов PV11(U); PA13(I); PW(P) занести в табл. 4.3. Снять осциллограммы тока и напряжения в цепи. Перевести тумблеры S7 и S45 в выключенное положение, выключить тумблер «СЕТЬ». Сделать вывод о сдвиге фазы между напряжением и током. Построить векторную диаграмму.

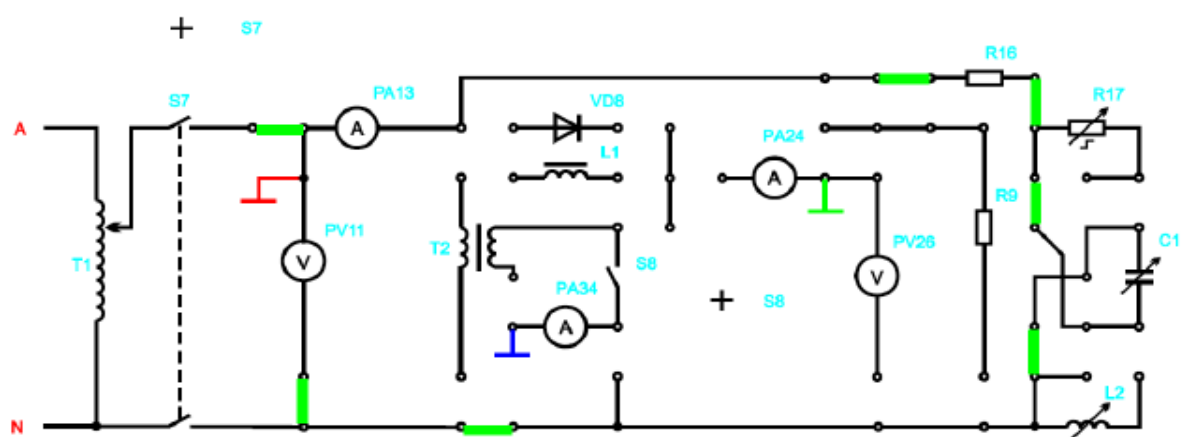


Рис. 4.4

Таблица 4.3

Вид двухполюсника	Измерено			Вычислено					
	I, A	U, B	P, Вт	R, Ом	Z, Ом	x, Ом	φ, град	L, Гн	C, мкФ
R								-	-
L									-
C								-	

4. По экспериментальным данным вычислить:

R – активное сопротивление;

Z – полное сопротивление;

x – реактивное сопротивление;

L – индуктивность катушки;

C – емкость конденсатора;

φ – угол сдвига фазы между напряжением и током.

5. Проанализировать полученные **результаты**.

4.4. Основные теоретические положения

Установившийся режим цепи с последовательным соединением пассивных элементов (рис. 4.5) описывается вторым законом Кирхгофа и законом Ома, комплексная форма записи которых имеет вид:

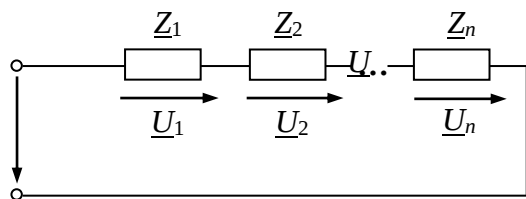


Рис. 4.5

$$\underline{U} = \sum_n \underline{U}_n; \underline{U} = \underline{Z} \underline{I}; \underline{U}_n = \underline{Z}_n \underline{I},$$

где $\underline{U}$, $\underline{I}$ - напряжение и ток на входе цепи; $\underline{U}_n$ - напряжение n -го участка цепи; $\underline{Z}$ - входное сопротивление цепи;

$\underline{Z}_n$ - входное сопротивление n -го участка цепи. Выражения для входного сопротивления цепи с последовательным соединением пассивных элементов в алгебраической и показательной формах соответственно имеют вид:

$$\underline{Z} = \sum_n \underline{Z}_n = \sum_n (R_n + jx_n) = \sum_n R_n + j \sum_n x_n; \underline{Z} = ze^{j\varphi},$$

где z - модуль входного сопротивления цепи, иначе, полное входное сопротивление; φ - аргумент входного сопротивления цепи, равный разности фаз входных напряжения и тока; R_n - активное сопротивление n -го участка; x_n - реактивное сопротивление n -го участка, равное разности индуктивного и емкостного сопротивлений данного участка, т.е.

$$x_n = x_{Ln} - x_{Cn} = \omega L_n - \frac{1}{\omega C_n}.$$

Связь между алгебраической и показательной формами входного сопротивления цепи определяется соотношениями:

$$\sum_n R_n = z \cos \varphi; \sum_n x_n = z \sin \varphi; z = \sqrt{\left(\left(\sum_n R_n \right)^2 + \left(\sum_n x_n \right)^2 \right)}; \varphi = \arctg \frac{\sum_n x_n}{\sum_n R_n}.$$

Из уравнений последовательной цепи следуют соотношения для тока и напряжений участков (закон Ома в комплексной форме):

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_n}$$

или для действующих значений

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U_n}{z_n}.$$

Из полученных соотношений следует, что при заданном по величине и фазе входном напряжении режим цепи, т.е. величины и фазы тока, а также напряжений участков, определяется только параметрами пассивных элементов цепи и частотой источника.

При этом следует иметь ввиду, что ток в цепи переменного тока с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряжением.

Ток в цепи с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на 90° . Ток в цепи с емкостью опережает по фазе напряжение на 90° . Определение параметров элементов исследуемых цепей производится следующим образом.

Активное сопротивление для цепи с R_{16} определяется исходя из закона Ома:

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

Параметры цепей с L и C определяется следующим образом.

Зная активную мощность, потребляемую цепью, вычисляют активное сопротивление по формуле

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

По известным действующим значениям тока и напряжения определим полное сопротивление цепи:

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

Далее из формулы $Z = \sqrt{R^2 + x^2}$ определяем реактивное сопротивление $x = \sqrt{Z^2 - R^2}$.

Зная реактивные сопротивления определяем индуктивности L и емкость C

$$L = \frac{x_L}{\omega}; \quad C = \frac{1}{\omega x_C}.$$

Комплексная полная мощность цепи определяется выражением:

$$\tilde{S} = \underline{U} I^* = S e^{j\varphi} = P + jQ,$$

где S , P и Q соответственно полная, активная и реактивная мощности цепи.

Таким образом,

$$S = UI; P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi; Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi,$$

а разность фаз входных напряжения и тока $\varphi = \arctg \frac{Q}{P}$.

Связь полной, активной и реактивной мощностей выражается в виде

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где для последовательной цепи $P = I^2 \sum_n R_n$; $Q = I^2 \sum_n x_n$.

Для проверки правильности выполненных расчетов делают построение векторных диаграмм.

Векторной диаграммой называют совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенных с соблюдением масштаба и правильной ориентации их относительно друг друга по фазе. Если токи в ветвях схемы рассчитаны правильно, то сумма векторов токов в ветвях цепи будет равна вектору тока в неразветвленной части цепи. По аналогии на векторной диаграмме можно проверить правильность рассчитанных напряжений на участках цепи. Если напряжения на участках цепи рассчитаны правильно, то сумма векторов напряжений на участках цепи равна вектору входного напряжения. Векторные диаграммы токов и напряжений можно построить на отдельных рисунках или вместе на одном рисунке. В последнем случае это уже будет векторная диаграмма токов и напряжений.

В электротехнике положительные углы начальной фазы φ отсчитываются против часовой стрелки, а отрицательные наоборот.

Эквивалентная схема исследуемой **RL** цепи и соответствующая ей векторная диаграмма показана на рис. 4.6,а и 4.6,б, а для исследуемой **RC** цепи - на рис. 4.7,а и 4.7,б. Проверка рассмотренных выше теоретических положений производится посредством эксперимента.

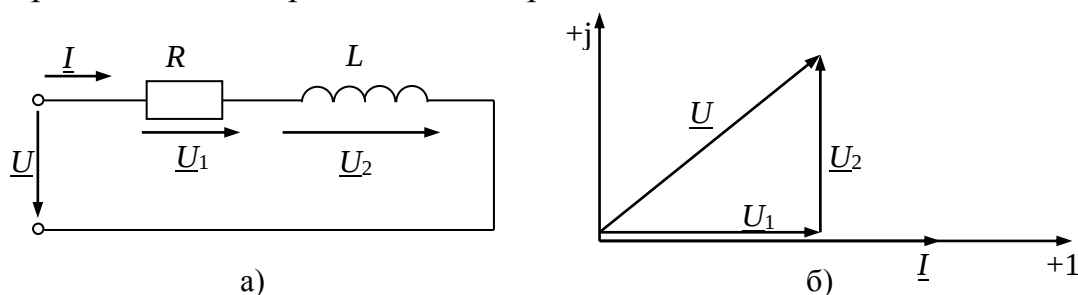


Рис. 4.6

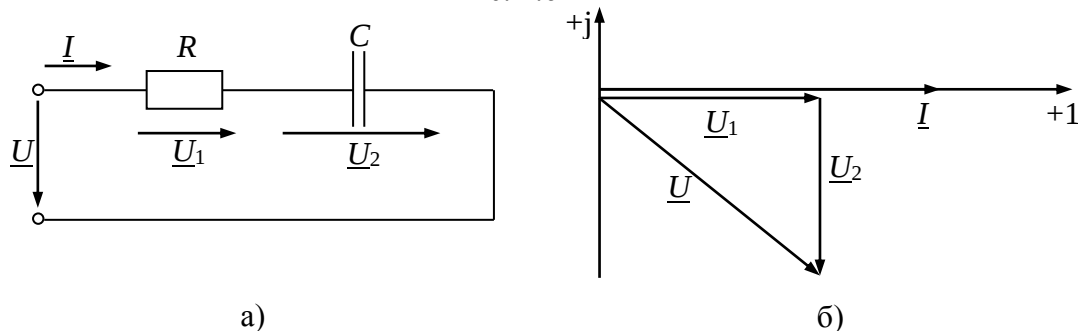


Рис. 4.7

4.5. План отчета по работе

Отчет по лабораторной работе кроме материалов, перечисленных в разделе 4.3.1 должны содержать.

1. Расчеты параметров исследуемых двухполюсников.
2. Расчеты угла сдвига между напряжением на зажимах двухполюсников и токами в цепи.
3. Осциллограммы токов и напряжений исследуемых двухполюсников.
4. Векторные диаграммы.
5. Выводы по работе, в которых должно быть указано влияние активного сопротивления, индуктивности и емкости на угол сдвига фазы между напряжением и током.

4.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение периоду синусоидального напряжения.
2. Как определяется угловая частота?
3. Как определяется индуктивное сопротивление?
4. Как влияет идеальная индуктивность на угол сдвига фаз между напряжением и током?
5. Как определяется емкостное сопротивление?
6. Как влияет емкость на угол сдвига фаз между напряжением и током?
7. Чему равно комплексное сопротивление RL цепи?
8. Чему равно комплексное сопротивление RC цепи?
9. Закон Ома для участка цепи без ЭДС в комплексной форме.
10. Закон Ома для участка цепи с ЭДС в комплексной форме.
11. Закон Ома для контура в комплексной форме.

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – 6-е изд. / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Конспект лекций

Лабораторная работа № 5

Тема. Исследование электрической цепи переменного тока при последовательном и параллельном соединении приемников

5.1. Цель работы

1. Проверить выполнение законов Кирхгофа в цепях переменного тока.
2. Ознакомиться с основными методами определения параметров цепей переменного тока при различных способах соединения приемников.

5.2. Схема лабораторной установки

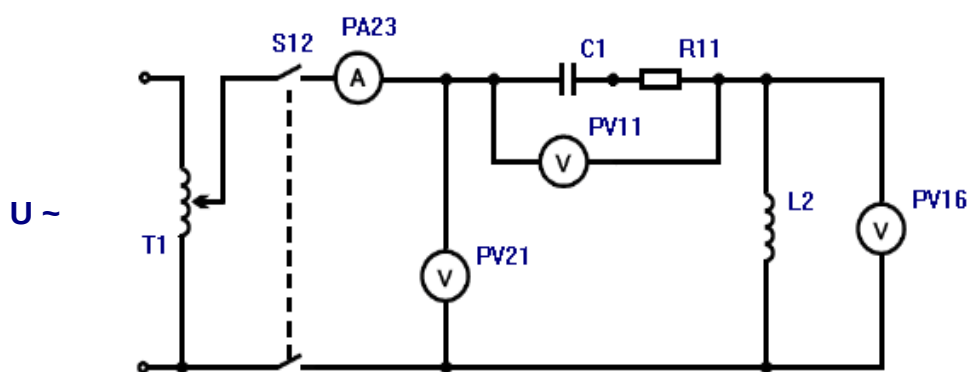


Рис. 5.1

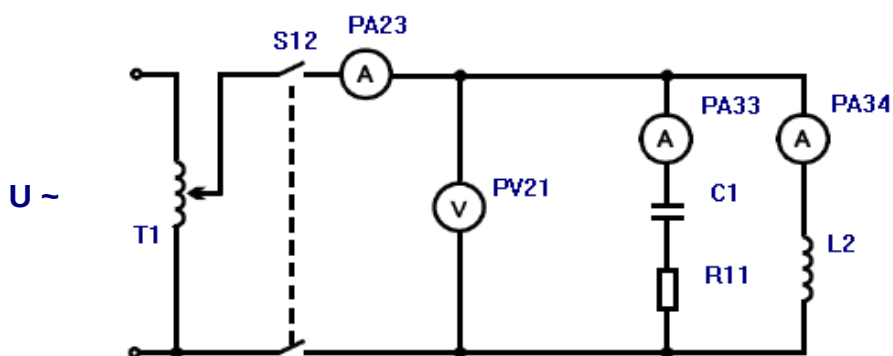


Рис. 5.2

Лабораторная установка содержит емкость $C1$, катушку индуктивности $L2$, активное сопротивление $R11$.

Активное сопротивление $R11$ включается последовательно с емкостью $C1$ и используется в качестве балластного для ограничения тока в исследуемой цепи при параллельном и последовательном соединении катушки индуктивности $L2$ и емкости $C1$. Все элементы исследуемых цепей размещены на стенде и соединяются в соответствии со схемами 5.1 (последовательное соединение элементов) и 5.2 (параллельное соединение элементов), с помощью **перемычек**.

Величина индуктивности L_2 фиксирована, а величина емкости C_1 устанавливается с помощью тумблеров батареи конденсаторов.

Для выполнения измерений и наблюдения формы напряжений и токов используется измерительный комплекс на базе персонального компьютера.

Вольтметры PV11, PV16, PV21 и амперметры PA23, PA33, PA34 используются для измерения действующих значений напряжений и токов в исследуемых цепях, измерительная информация о напряжениях и токах выводится в соответствующих окнах на экране монитора. Кроме того, измерительная информация с вольтметров и амперметров выводится на соответствующие шлейфы осциллографа измерительного комплекса для наблюдения формы кривых и оценки сдвига фаз между напряжениями и токами. Измерительная информация с вольтметра PV21 и амперметра PA23 используется для определения активной мощности потребляемой исследуемыми цепями. Величина активной мощности индицируется в окне PW на экране монитора.

5.3. Порядок проведения лабораторной работы

5.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал, указанный в списке литературы. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, вычерчивает схему лабораторной установки.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачи.

Таблица 5.1

№ варианта	$U, В$	$\underline{Z}_1, Ом$	$\underline{Z}_2, Ом$
1	2	3	4
1	127	30	j40
2	127	30	-j40
3	220	j40	30
4	220	-j40	30
5	127	$15 + j15$	20
6	127	20	$15 + j15$
7	220	$15 - j15$	20
8	127	20	$15 - j15$
9	220	$15 + j15$	j20
10	127	-j20	$15 - j15$
11	127	j40	30
12	127	-j40	30
13	220	30	j40
14	220	30	-j40

1	2	3	4
15	127	20	$15 + j15$
16	127	$15 + j15$	20
17	220	20	$15 - j15$
18	127	$15 - j15$	20
19	220	$j20$	$15 + j15$
20	127	$15 - j15$	$-j20$
21	127	20	$15 + j15$
22	127	$15 - j15$	20
23	220	20	$15 - j15$
24	220	$15 + j15$	$j20$
25	127	$-j20$	$15 - j15$

З а д а ч а 1

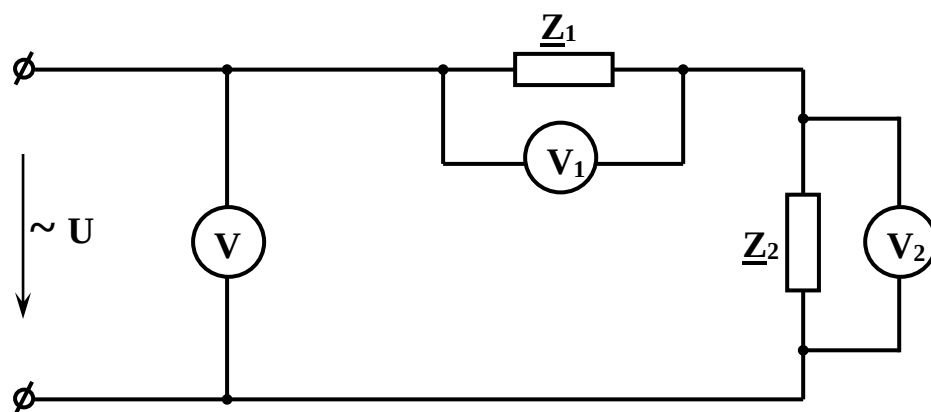


Рис. 5.3,а

В схему включены три вольтметра (см. рис. 5.3,а), измеряющие действующие значения напряжения. Определить показания вольтметров V_1 и V_2 при показаниях вольтметра V . Значения приложенного напряжения и сопротивлений цепи в табл. 5.1 по номеру варианта. Построить векторную диаграмму напряжений и тока.

З а д а ч а 2

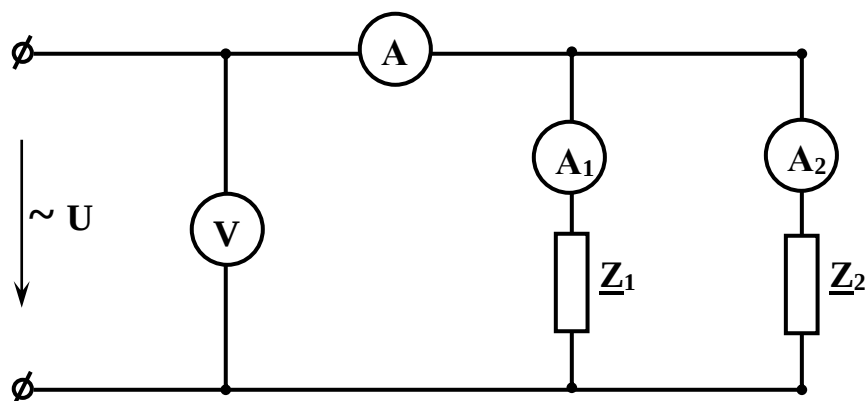


Рис. 5.3,б

В схему включены три амперметра, измеряющие действующие значения тока (см. рис. 5.3,б). Определить показания амперметров при показаниях вольтметра. Значения приложенного напряжения и сопротивлений цепи в табл. 5.1 по номеру варианта. Построить векторную диаграмму напряжения и токов.

5.3.2. Задание на выполнение работы

1. Исследуем цепь переменного тока, содержащую один элемент:

- а) Цепь содержит катушку индуктивности L ;
- собрать схему изображенную на рис. 5.4. Предъявить для проверки преподавателю;

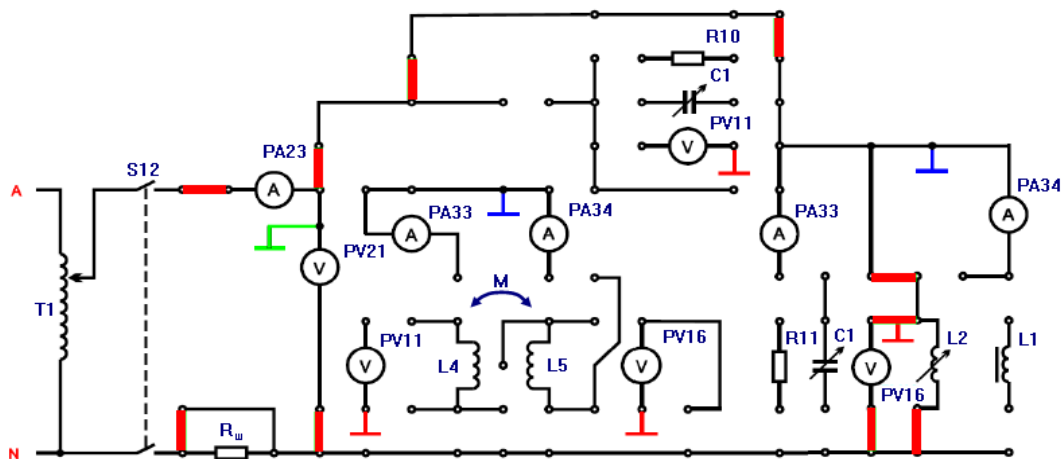


Рис. 5.4

- включить тумблер «Сеть» – положение тумблера вверх;
 - галетником ЛАТРа установить напряжение $U_{\text{вх}} \approx 24 \text{ В}$ (PV 21);
 - включить тумблеры S12 и S45 – положение тумблеров вверх;
 - показания приборов PV21 (U), PV16 (U_2), PA23 (I), PW (P) занести в табл. 5.2;
 - тумблеры S12 и S45 перевести в положение вниз;
 - рассчитать сопротивление катушки индуктивности, Z_L , R_L , X_L , записать комплексное сопротивление катушки;
- б) цепь содержит элемент емкость C :
- собрать схему изображенную на рис. 5.5. Предъявить для проверки преподавателю;
 - с помощью тумблеров батарей конденсаторов установить величину емкости заданную преподавателем;
 - включить тумблер на батарее конденсаторов C1 в положение вверх;
 - включить тумблеры S12 и S45 – положение тумблеров вверх;
 - показания приборов PV21 (U), PV11 (U_1), PA23 (I), PW (P) занести в табл. 5.2;
 - тумблеры S12 и S45 перевести в положение **вниз**;

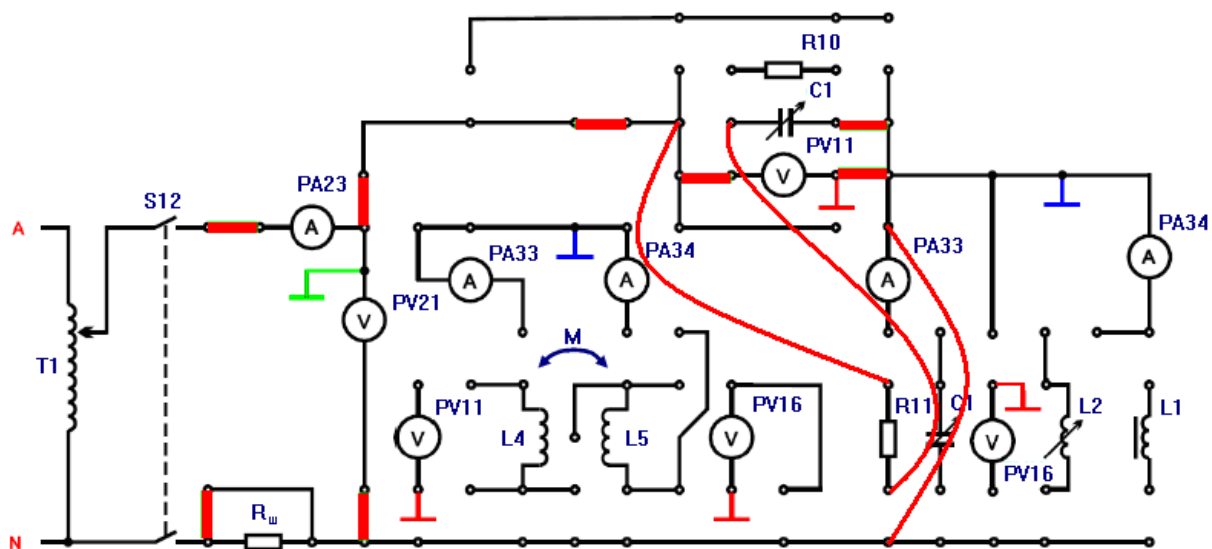


Рис. 5.5

- рассчитать сопротивление Z_C , R_C , X_C цепи (см. рис. 5.5), записать комплексное сопротивление исследуемой цепи.

2. Исследуем цепь переменного тока с последовательно соединенными элементами - катушкой индуктивности L и емкостью C :

- собрать схему изображенную на рис. 5.6. Предъявить преподавателю для проверки;

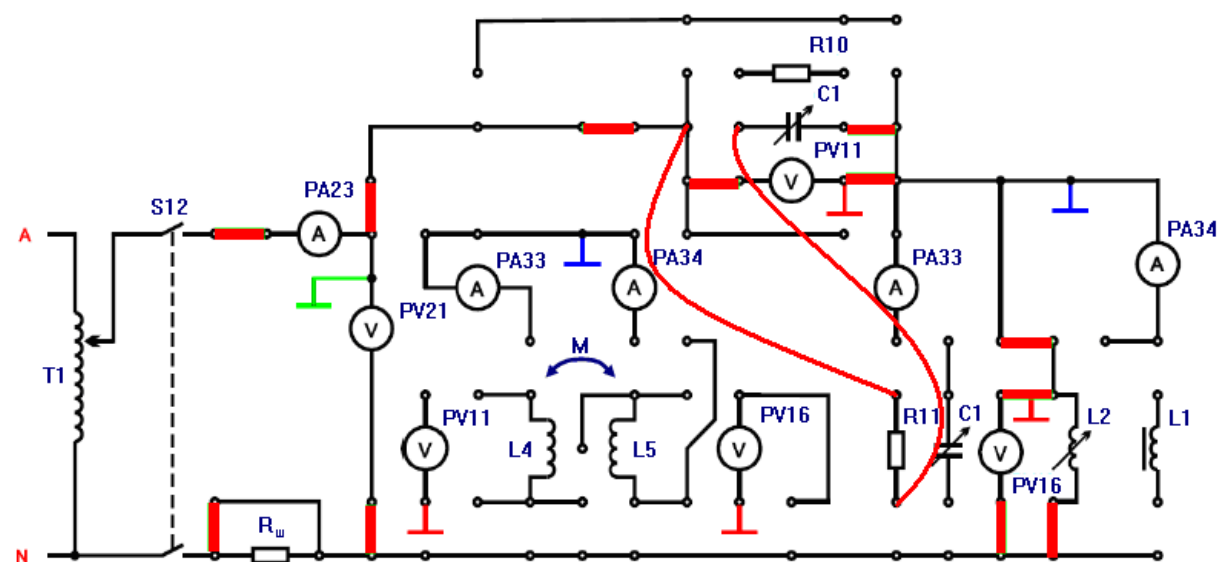


Рис. 5.6

- включить тумблер S12 – положение тумблера вверх;
- включить тумблер S45 «ЛАТР» - положение тумблера «ВКЛ»;
- включить тумблеры батареи конденсаторов C1;
- показания приборов PV21 (U), PV11 (U_1), PV16 (U_2), PA23 (I), PW (P) записать в табл. 5.2;
- перевести тумблеры S12 и S45 в положение вниз;
- тумблер на батарее конденсаторов C1 перевести в положение **вниз**;

- рассчитать сопротивление цепи Z_1 , R_1 , X_1 при последовательном соединении элементов.

3. Исследуем цепь переменного тока с параллельным соединением элементов катушки индуктивности L и емкости C :

- собрать схему изображенную на рис. 5.7. Предъявить преподавателю для проверки;

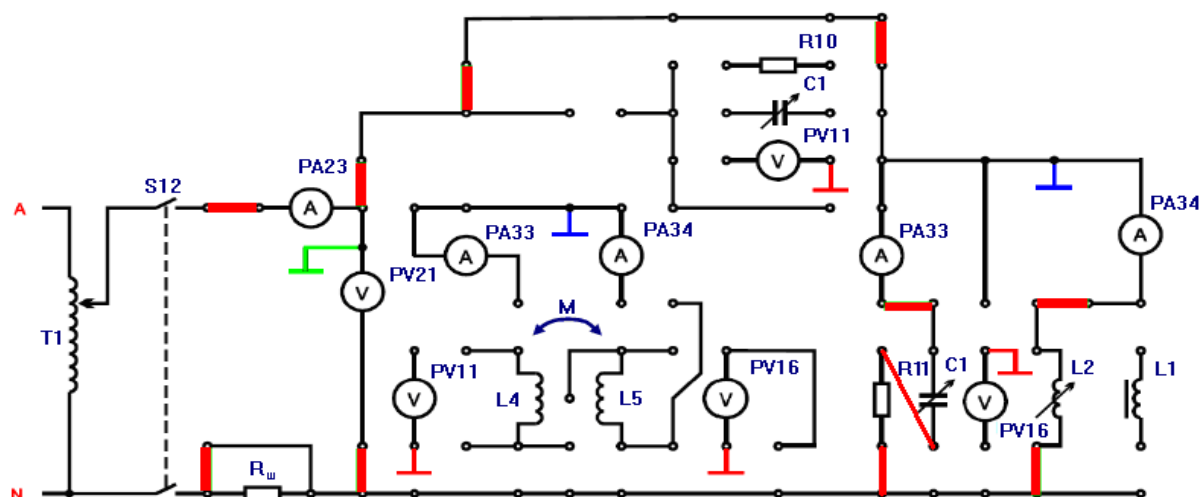


Рис. 5.7

- тумблеры S1, S12 и S45 перевести в положение вверх;
- показания приборов PV21 (U), PA23 (I), PA33 (I_1), PA34 (I_2), PW (P) записать в табл. 5.2;

- перевести тумблеры S12, S45 и тумблер S1 на батарею конденсаторов в положение вниз;

- тумблером «Сеть» отключить стенд от сети – положение тумблера вниз. Таблицы с показаниями предъявить преподавателю;

- рассчитать сопротивление цепи Z_2 , R_2 , X_2 при параллельном соединении элементов.

Таблица 5.2

	Измерено				Вычислено		
	U , (В) PV21	U_L , (В) PV16	I , (А) PA23	P , (Вт) PW	Z_L , Ом	R_L , Ом	x_L , Ом
Цепь с индуктивностью L							

	Измерено				Вычислено		
	U , (В) PV21	U_C , (В) PV11	I , (А) PA23	P , (Вт) PW	Z_C , Ом	R_C , Ом	x_C , Ом
Цепь с емкостью C							

Последовательно соединены L и C	Измерено					Вычислено		
	U, (В) PV21	U _L , (В) PV16	U _C , (В) PV11	I, (А) PA23	P, (Вт) PW	Z ₁ , Ом	R ₁ , Ом	x ₁ , Ом

Параллельно соединены L и C	Измерено					Вычислено		
	U, (В) PV21	I, (А) PA23	I _L , (А) PA34	I _C , (А) PA33	P, (Вт) PW	Z ₂ , Ом	R ₂ , Ом	x ₂ , Ом

4. По результатам расчетов п.п. 5.3.2 (1), 5.3.2 (2), 5.3.2 (3) определить, как в цепях переменного тока рассчитывается результирующее сопротивление цепи по известным сопротивлениям приемников.

5. Построить треугольники сопротивлений для цепи, изображенной на рис. 5.1.

6. Построить треугольники проводимостей для цепи, изображенной на рис. 5.2.

7. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для цепей, изображенных на рис. 5.1 и 5.2.

8. По результатам построений определить, для каких значений токов и напряжений (действующих, комплекс действующих значений, комплекс амплитуд) в цепи переменного тока выполняются первый и второй законы Кирхгофа.

5.4. Основные теоретические положения

Если n приемников соединены последовательно и к зажимам всей цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то ток в линейной электрической цепи также будет синусоидальным

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i),$$

где амплитуда тока I_m связана с амплитудой напряжения U_m законом Ома

$$I_m = \frac{U_m}{Z}, \text{ а действующее значение тока } I = \frac{U}{Z}.$$

Угол сдвига фаз тока i напряжения u равен

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i = \arccos \frac{R}{Z} = \arcsin \frac{x}{Z} = \operatorname{arctg} \frac{x}{R},$$

где Z – полное сопротивление цепи;

R – активное сопротивление цепи;

x – реактивное сопротивление **цепи**.

Следовательно, для определения тока в цепи нужно уметь определять эквивалентные параметры цепи по параметрам отдельных ее элементов.

При последовательном соединении приемников активное сопротивление цепи равно сумме активных сопротивлений приемников, а реактивное – алгебраической сумме реактивных сопротивлений приемников.

$$R = \sum_{k=1}^n R_k; \quad x = \sum_{k=1}^n x_k, \quad \text{где } x_k = x_{Lk} - x_{Ck}.$$

При этом эквивалентное полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2} = \frac{U}{I}.$$

При параллельном соединении приемников активная проводимость цепи равна сумме активных проводимостей приемников, а реактивная – алгебраической сумме реактивных проводимостей приемников

$$g = \sum_{k=1}^n g_k; \quad b = \sum_{k=1}^n b_k,$$

где $b_k = b_{Lk} - b_{Ck}$.

При этом эквивалентная полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{I}{U}.$$

Здесь I – ток в неразветвленной части цепи;

U – напряжение на входе цепи.

При расчете простой электрической цепи комплексным методом токи, напряжения, ЭДС, сопротивления и проводимости должны входить в уравнения электрического состояния в виде комплексов.

Соответствующие комплексы равны:

1) комплексный ток $\underline{I} = I e^{j\psi_i}$;

2) комплексное напряжение $\underline{U} = U e^{j\psi_u}$;

3) комплексное сопротивление $\underline{Z} = \frac{U}{I} = Z e^{j\varphi} = R + jx = \frac{1}{\underline{Y}}$;

где $\varphi = \arctg \frac{x}{R}$;

4) комплексная проводимость $\underline{Y} = \frac{I}{U} = y e^{-j\varphi} = g - jb = \frac{1}{\underline{Z}}$;

где $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$;

5) комплексная мощность $\tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ = Se^{j\varphi}$,
 где $P = U \cdot I \cos \varphi = I^2 \cdot Z \cos \varphi = I^2 R$ - активная мощность;
 $Q = U \cdot I \sin \varphi = I^2 \cdot Z \sin \varphi = I^2 X$ - реактивная мощность;
 $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$ - полная мощность.
 Выражение $\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \underline{Y} \underline{U}$ представляет собой закон Ома для цепи переменного тока в комплексном виде.

Таким образом, для вычисления комплексного тока $\underline{I}$ необходимо уметь вычислять комплексное сопротивление и комплексную проводимость цепи.

Комплексное сопротивление цепи равно сумме комплексных сопротивлений последовательно соединенных приемников $\underline{Z} = \sum_{k=1}^n \underline{Z}_k$, а комплексная проводимость цепи равна сумме комплексных проводимостей параллельно соединенных приемников

$$\underline{Y} = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_k.$$

Комплексная мощность цепи равна сумме комплексных мощностей отдельных ветвей

$$\tilde{S}_{\text{цепи}} = \sum_{k=1}^n \tilde{S}_k.$$

5.5. План отчета по лабораторной работе

В отчет по лабораторной работе кроме пунктов, указанных в п.п.5.3.1, необходимо включить.

1. Треугольники сопротивлений и проводимостей.
2. Векторные диаграммы токов и напряжений для электрических цепей, изображенных на схемах 5.1 и 5.2
3. Выводы по лабораторной работе, которые должны содержать ответы на вопросы:

а) как определяется результирующее сопротивление цепи по известным сопротивлениям элементов;

б) для каких значений токов и напряжений в цепях переменного тока выполняются первый и второй законы Кирхгофа.

Выводы должны быть подтверждены количественными **расчетами**.

5.6. Контрольные вопросы

1. Закон Ома для цепи переменного тока.
2. Как определить полное сопротивление и полную проводимость цепи переменного тока?
3. Как определить комплексное сопротивление и комплексную проводимость приемника?
4. Как определить активное сопротивление и активную проводимость цепи переменного тока?
5. Как определить реактивное сопротивление и реактивную проводимость цепи переменного тока?
6. Как определить активную мощность цепи переменного тока?
7. Как определить реактивную мощность цепи переменного тока?
8. Как определить полную мощность цепи переменного тока?
9. Как определить комплексную мощность цепи переменного тока?
10. Первый закон Кирхгофа для цепи переменного тока.
11. Второй закон Кирхгофа для цепи переменного тока.
12. Для каких цепей выполняется закон Ома для мгновенных значений?

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. - М.: Высшая школа, 1982. - С. 116 – 126.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - С. 71 - 79, С. 92 – 99.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 6

Исследование резонанса напряжений

6.1. Цель работы

1. Определение экспериментальным путем условия резонанса напряжений для заданной катушки индуктивности.
2. Исследование влияния изменения емкости на величины тока, напряжений на участках цепи и сдвига фазы между приложенным напряжением и током в последовательной цепи.

6.2. Схема лабораторной установки

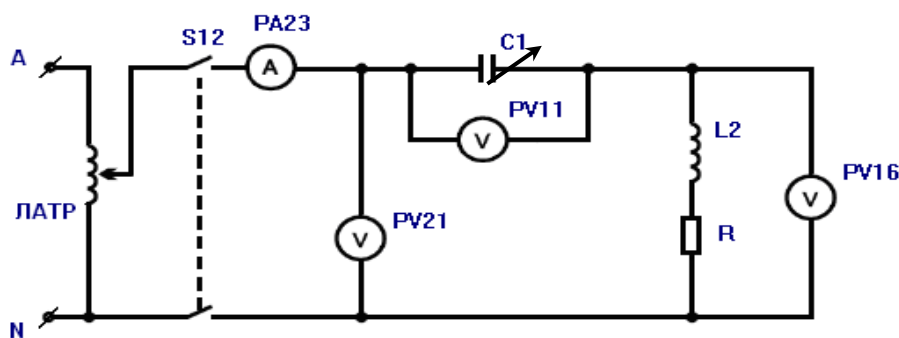


Рис. 6.1

Схема лабораторной установки содержит последовательно соединенные катушку индуктивности $L2$ (сопротивление R изображено условно и учитывает активную составляющую сопротивления катушки индуктивности $L2$) и переменную емкость $C1$ в виде батареи конденсаторов.

Напряжение в исследуемой цепи регулируется с помощью автотрансформатора ЛАТР. Для измерения величин тока и падения напряжения, а также наблюдения сигналов в цепи используется осциллограф на базе персонального компьютера. Измерительные каналы осциллографа, служащие для измерения действующего значения напряжения и тока, обозначены на схеме как вольтметры и амперметр и предназначены для:

- PV21 – вольтметр для измерения напряжения, подаваемого на вход цепи;
- PV11 – вольтметр для измерения напряжения на емкости;
- PV16 – вольтметр для измерения напряжения на катушке индуктивности;
- PA23 – амперметр для измерения тока в цепи.

Информация об измеряемых величинах напряжений и тока высвечивается в соответствующих окнах на экране **монитора**.

Кроме того, на экране монитора в окне PW высвечивается величина активной мощности, потребляемой исследуемой цепью.

Измерительная информация о напряжениях и токе подается на соответствующие шлейфы осциллографа и служит для наблюдения на экране монитора формы кривых напряжений и тока, а также для оценки сдвига фаз между напряжениями и током.

6.3. Порядок проведения работы

6.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, вычерчивает схему лабораторной установки.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачу.

З а д а ч а

К генератору синусоидального напряжения, действующее значение которого равно U , частота $f = 50$ Гц, подключена цепь, состоящая из последовательно соединенных элементов (см. рис. 6.1), параметры которых R , L , C . Необходимо определить величину C_p , соответствующую резонансу напряжений, построить графики зависимостей $U_k = f(C)$; $U_c = f(C)$; $I = f(C)$; $\varphi = f(C)$ при неизменных значениях напряжения U и частоты f . Емкость C изменять в пределах от 0 до $2 C_p$. Определить, при каком значении C ток в цепи становится максимальным.

Таблица 6.1

Номер варианта	U , В	L , мГн	R , Ом
1	2	3	4
1	30	525	21
2	35	300	11,8
3	40	278	12,2
4	30	345	14
5	35	210	21
6	40	383	17
7	45	525	17
8	50	300	21
9	55	278	14
10	60	345	12,2
11	65	210	11,8
12	70	383	21
13	75	525	21

1	2	3	4
14	80	300	11,8
15	85	278	12,2
16	90	345	14
17	95	210	21
18	100	383	17
19	105	525	17
20	110	300	21
21	115	278	14
22	120	345	12,2
23	125	210	11,8
24	130	383	21
25	135	525	14

Решение задач оформить в лабораторном журнале.

6.3.2. Задание на выполнение работы

1. Собрать схему изображенную на рис. 6.2. Предъявить для проверки преподавателю.

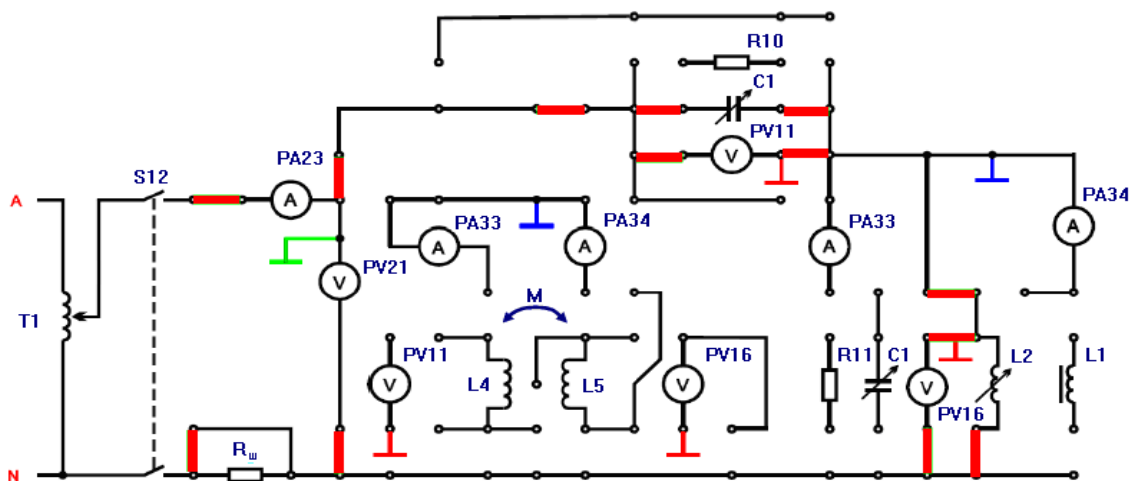


Рис. 6.2

2. Включить тумблер S1 «Сеть» - положение тумблера вверх.
3. Включить тумблер S12 в положение вверх.
4. Включить тумблер S45 «ЛАТР» в положение «ВКЛ».
5. Галетником ЛАТРа установить напряжение, по вольтметру PV21 (U), от 0 до 24 В, которое задается преподавателем.
6. Тумблерами батареи конденсаторов C1 подобрать емкость, при которой наступит резонанс (на осциллографе синусоиды тока I и напряжения U совпадают по фазе). Ток на амперметре PA23 (I) будет при этом максимальным, но не должен превысить 0,5 А. Показания приборов PA23 (I), PV21 (U), PV11 (U_1), PV16 (U_2), PW (P) занести в табл. 6.2.

7. Дискретно изменяя емкость, от резонансной емкости в сторону увеличения значений емкости, произвести три опыта. Показания приборов PA23 (I), PV21 (U), PV11 (U_1), PV16 (U_2), PW (P) записать в табл. 6.2. Оценить характер цепи по сдвигу фазы между входным напряжением и током по соответствующим кривым на экране осциллографа.

8. Затем, дискретно изменяя емкость от резонансной емкости в сторону уменьшения, произвести три опыта. Показания приборов PA23 (I), PV21 (U), PV11 (U_1), PV16 (U_2), PW (P) записать в табл. 6.2. Оценить характер цепи по сдвигу фазы между входным напряжением и током по соответствующим кривым на экране осциллографа.

9. Таблицу с показаниями предъявить преподавателю.

10. Тумблеры S12 и S45 перевести в положение вниз.

11. Тумблером S1 отключить стенд от сети – положение тумблера вниз.

Таблица 6.2

№ от-счета	Измерено						Вычислено			
	C1 C, мкФ	PV21 U, В	PV11 U_1 , В	PV16 U_2 , В	PA23 I, А	PW P, Вт	R, Ом	X, Ом	Z, Ом	ϕ , грд
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

12. По экспериментальным данным вычислить:

R – активное сопротивление цепи;

X – реактивное сопротивление цепи;

Z – полное сопротивление цепи;

ϕ – угол сдвига фаз между входным напряжением U и током в цепи I, знак угла определяется по характеру исследуемой цепи (см. п. 7 и 8 данного раздела).

13. Построить графики зависимостей на общих координатных осях:

$U_1 = f(C)$ – напряжения на конденсаторе от емкости;

$U_2 = f(C)$ – напряжения на катушке индуктивности от емкости;

$I = f(C)$ – тока в исследуемой цепи от емкости;

$\phi = f(C)$ – угла сдвига фаз между током I и входным напряжением U от емкости.

14. Проанализировать полученные результаты.

6.4. Основные теоретические положения

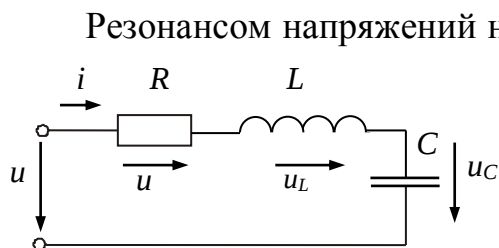


Рис. 6.3

Резонансом напряжений называют установившийся режим цепи синусоидального тока с последовательным соединением индуктивностей и емкостей, при котором входное реактивное сопротивление равно нулю (ток и напряжение совпадают по фазе $\varphi = 0$).

Входное сопротивление последовательного RLC -контура выражается в виде

$$\underline{Z} = R + jx,$$

где R и x - активное и реактивное сопротивления контура соответственно.

Условие резонанса напряжений контура выражается равенством

$$X = x_L - x_C = 0 \quad \text{или} \quad x_L = x_C, \quad \text{т.е.} \quad \omega L = 1/\omega C, \quad \varphi = 0.$$

При $x_L = x_C$ значения противоположных по фазе напряжений на индуктивности и ёмкости равны, поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называется резонансом напряжений. Полное сопротивление цепи z при $x = 0$ минимально, т.е. $z = \sqrt{R^2 + x^2} = R$, а ток в цепи I при заданном входном напряжении U достигает наибольшего значения $I_{\max} = \frac{U}{R}$.

Векторная диаграмма токов и напряжений для исследуемой цепи изображена на рис. 6.4.

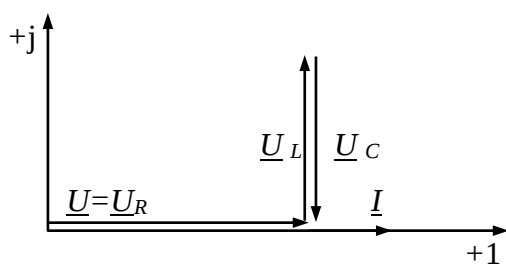


Рис. 6.4

При $R = 0$ полное сопротивление цепи в режиме резонанса равно нулю, а ток при любом конечном значении напряжения U бесконечно велик.

Из условия $\omega L = 1/\omega C$ следует, что резонанс достигается изменением частоты напряжения питания или параметров цепи. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой

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

Индуктивное и ёмкостное сопротивления при резонансе принимают значения

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \rho,$$

где ρ – характеристическое сопротивление контура, которое равно индуктивному или ёмкостному сопротивлению при **резонансе**.

Данная цепь обладает избирательными свойствами. Отношение напряжений на индуктивном или ёмкостном элементе к напряжению питания при резонансе называется **добротностью** контура или коэффициентом резонанса

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho}{R} = Q.$$

Добротность показывает во сколько раз напряжение на индуктивном или ёмкостном элементе превышает напряжение на входе схемы при резонансе. Резонансные свойства цепей оценивают их частотными характеристиками и, кроме того, зависимостями напряжений и токов, а также разности их фаз в функции какого-либо характерного параметра (частоты, ёмкости или индуктивности), изменением которого данная цепь может быть настроена в резонанс. Графические изображения этих зависимостей называют резонансными кривыми. На рис. 6.5 приведены резонансные кривые последовательного контура.

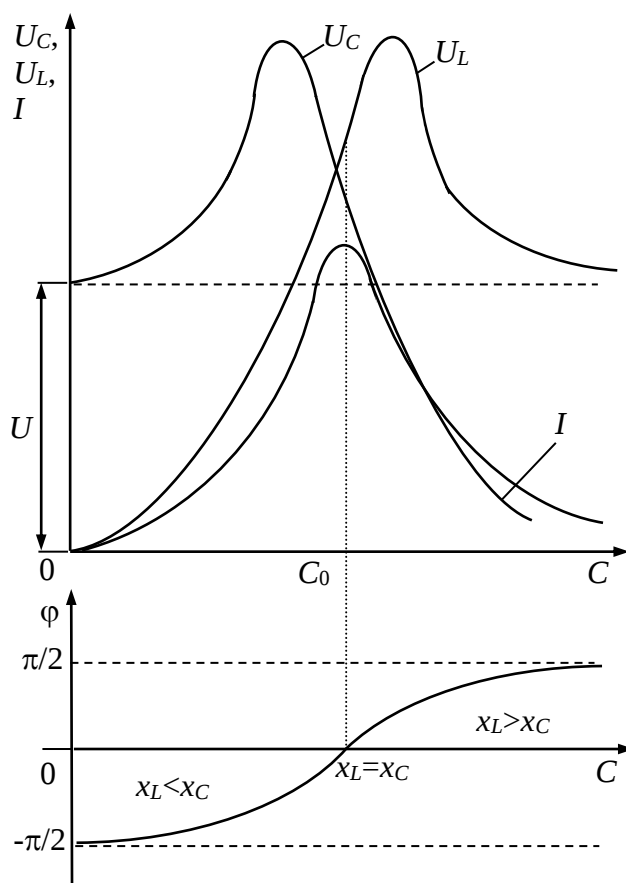


Рис. 6.5

Так как катушка индуктивности обладает активным сопротивлением, то при резонансе напряжение на катушке индуктивности (U_L) будет несколько больше напряжения на **конденсаторе**.

Изменение реактивного сопротивления приводит к изменению режима работы цепи.

При изменении значения емкости C до нуля, значение полного сопротивления будет стремиться к бесконечности.

В результате значение тока I в цепи и напряжение на индуктивности будут стремиться к нулю, а напряжение на конденсаторе - к значению напряжения U на входе цепи.

Сдвиг фаз φ будет стремиться к значению $-\frac{\pi}{2}$.

При значении $C = C_0$ (режим резонанса) значение полного сопротивления цепи будет равным активному и ток в цепи будет принимать максимальное значение $I_{max} = U/R$. Сдвиг фаз φ между током и напряжением будет равным нулю.

В технике связи и радиотехнике резонансный режим является нормальным, а в устройствах, где резонансный режим нежелателен, возникают значительные напряжения, которые являются аномальными для изоляции приборов и могут привести к выходу их из строя.

Определение параметров элементов исследуемой цепи производится следующим образом. Активное сопротивление определяется по закону Ома

$$R = \frac{U}{I_0},$$

где I_0 ток в цепи в момент резонанса.

Реактивное сопротивление x определяется по формуле

$$x = \sqrt{Z^2 - R^2},$$

где $Z = \frac{U}{I}$ - полное сопротивление цепи;

U - напряжение питания цепи;

I - ток в цепи.

Угол φ сдвига фазы между напряжением, приложенным к цепи, зависит от параметров элементов цепи и может быть вычислен по формуле

$$\varphi = \arctg \frac{x}{R}.$$

6.5. План отчета по работе

Отчет о лабораторной работе кроме материалов, перечисленных в разделе 6.3.1 должен содержать:

- расчетные формулы параметров исследуемой цепи с примерами выполнения **расчетов**;

- расчетную формулу угла сдвига фаз между напряжением U и током I с примерами расчета φ до режима резонанса и после режима резонанса;
- графики зависимостей $U_1 = f(C)$, $U_2 = f(C)$, $I = f(C)$, $\varphi = f(C)$;
- выводы по работе, в которых должно быть указано:
 - а) при каких соотношениях между индуктивным и емкостным сопротивлениями имеет место резонанс напряжений;
 - б) характер изменения графиков зависимостей $U_1 = f(C)$, $U_2 = f(C)$, $I = f(C)$, $\varphi = f(C)$ (проанализировать и объяснить);
 - в) возможные области применения данного явления в электротехнике, радиотехнике и т.п.

6.6. Контрольные вопросы

1. Чему равняется комплексное сопротивление цепи?
2. Что такое реактивное сопротивление цепи?
3. В каких случаях последовательная цепь при наличии емкости и индуктивности носит емкостной характер, индуктивный характер, активный характер?
4. Что называется резонансом напряжения?
5. Как и почему изменяется ток в цепи при изменении емкости?
6. Как и почему изменяется напряжение на катушке при изменении емкости?
7. Как и почему изменяется напряжение на емкости при изменении емкости?
8. Как и почему изменяется угол между напряжением, приложенным к цепи и током в ней при изменении емкости?
9. Чему равен угол φ при резонансе?
10. Как определить резонансную частоту?
11. Какое значение принимает ток при резонансе?
12. Когда напряжение на реактивных элементах при резонансе будет больше приложенного к цепи напряжения?

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – 6-е изд./ Л.А. Бессонов. - М.: Высшая школа, 1973.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 7

Тема. Исследование резонанса токов

7.1. Цель работы

1. Определение экспериментальным путем условия резонанса токов для заданной катушки индуктивности.

2. Исследование влияния изменения емкости на величины тока и сдвига фаз между приложенным напряжением и током неразветвленной части цепи переменного тока.

7.2. Схема лабораторной установки

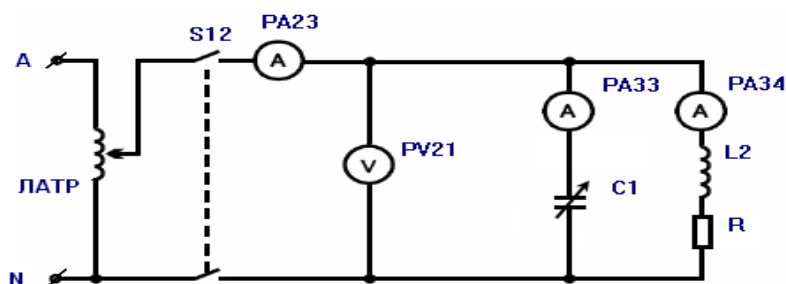


Рис. 7.1

Схема лабораторной установки содержит параллельно соединенные катушку индуктивности L_2 (сопротивление R изображено условно и учитывает активную составляющую сопротивления катушки индуктивности L_2) и переменную емкость C_1 в виде батареи конденсаторов.

Напряжение в исследуемой цепи регулируется с помощью автотрансформатора ЛАТР.

Для измерения величин тока и напряжения, а также наблюдения сигналов в цепи используется осциллограф на базе персонального компьютера. Измерительные каналы осциллографа, служащие для измерения действующего значения тока и напряжения, обозначены на схеме как амперметры и вольтметр и предназначены для:

- PV21 – вольтметр для измерения напряжения, подаваемого на вход цепи;
- РА23 – амперметр для измерения тока в неразветвленной части цепи;
- РА33 – амперметр для измерения тока в ветви, содержащей емкость C_1 ;
- РА34 – амперметр для измерения тока в ветви, содержащей катушку индуктивности L_2 .

Измеряемые величины токов и напряжения высвечиваются в соответствующих окнах на экране **монитора**.

Кроме того, на экране монитора в окне PW высвечивается величина активной мощности, потребляемой исследуемой цепью.

Измерительная информация о напряжении и токах подается на соответствующие шлейфы осциллографа и служит для наблюдения на экране монитора формы кривых напряжения и токов, а также для оценки сдвига фаз между напряжением и токами.

7.3. Порядок проведения работы

7.3.1. Задание на подготовку к работе

В часы самостоятельной подготовки студент изучает теоретический материал. Записывает в лабораторный журнал тему, цель и программу лабораторной работы, вычерчивает схему лабораторной установки.

Подготовить и знать ответы на контрольные вопросы. Перед лабораторной работой на самостоятельной подготовке решить задачу.

З а д а ч а

К генератору синусоидального напряжения, действующее значение которого равно U , частота $f = 50$ Гц, подключена цепь, состоящая из двух параллельных ветвей (см. рис. 7.1), параметры которых R_k , L_k , C . Необходимо определить величину C_p , соответствующую резонансу токов; построить кривые токов $I = f(C)$; $I_c = f(C)$; $I_L = f(C)$; $\varphi = f(C)$ при неизменных значениях напряжения U и частоты f . Емкость C изменять в пределах от 0 до $2 C_p$. Определить, при каком значении C ток в цепи становится минимальным.

Таблица 7.1

Номер варианта	U , В	L , мГн	R , Ом
1	2	3	4
1	30	525	21
2	35	300	11,8
3	40	278	12,2
4	30	345	14
5	35	210	21
6	40	383	17
7	45	525	17
8	50	300	21
9	55	278	14
10	60	345	12,2
11	65	210	11,8
12	70	383	21
13	75	525	21

1	2	3	4
14	80	300	11,8
15	85	278	12,2
16	90	345	14
17	95	210	21
18	100	383	17
19	105	525	17
20	110	300	21
21	115	278	14
22	120	345	12,2
23	125	210	11,8
24	130	383	21
25	135	525	14

Решение задачи оформить в лабораторном журнале.

7.3.2. Задание на выполнение работы

1. Собрать схему изображенную на рис. 7.2. Предъявить для проверки преподавателю.

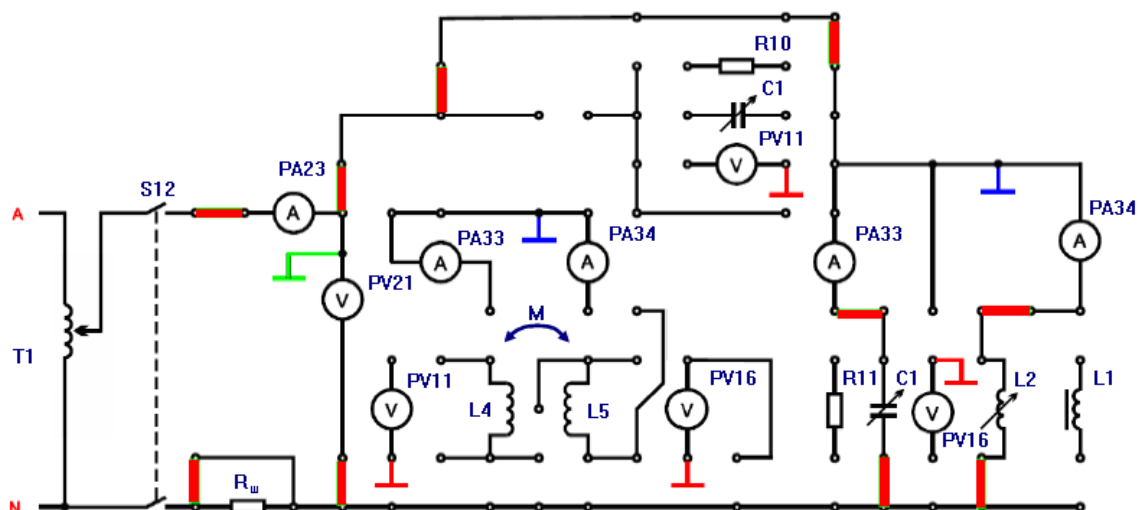


Рис. 7.2

2. Включить тумблер S1 «Сеть» - положение тумблера вверх.
3. Включить тумблер S12 в положение вверх.
4. Включить тумблер S45 «ЛАТР» в положение «ВКЛ».
5. Галетником ЛАТРа установить напряжение, по вольтметру PV21 (U), от 0 до 24 В.
6. Тумблерами батареи конденсаторов C1 подобрать емкость, при которой наступает момент резонанса тока (на осциллографе синусоиды тока I и напряжения U совпадают по **фазе**).

Общий ток на амперметре РА23 (I) будет при этом минимальным. Показания приборов РА23 (I), РА33(I₁), РА34(I₂), РВ21(U), РВ (P) занести в табл. 7.2

7. Дискретно изменяя емкость, от резонансной емкости в сторону увеличения значения емкости, но ток при этом на амперметре РА23 (I) не должен превысить 0,15 А, произвести три опыта. Показания приборов РА23(I), РА33(I₁), РА34(I₂), РВ21(U), РВ (P) записать в табл. 7.2. Оценить характер цепи по сдвигу фазы между током в неразветвленной части цепи и входным напряжением по соответствующим кривым на экране осциллографа.

8. Затем, дискретно изменяя емкость от резонансной емкости в сторону уменьшения емкости, произвести три опыта. Показания приборов РА23 (I), РА33(I₁), РА34(I₂), РВ21(U), РВ (P) записать в табл. 7.2. Оценить характер цепи по сдвигу фазы между током в неразветвленной части цепи и входным напряжением по соответствующим кривым на экране осциллографа.

9. Таблицу с показаниями предъявить преподавателю.

10. Тумблеры S12 и S45 перевести в положение вниз.

11. Тумблером S1 отключить стенд от сети – положение тумблера вниз.

Таблица 7.2

№ отсчета	Измерено						Вычислено			
	C1 C, мкФ	РА23 I, А	РА33 I ₁ , А	РА34 I ₂ , В	РВ2 1 U, В	РВ P, Вт	g, См	b, См	y, См	φ, грд
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

12. По экспериментальным данным вычислить:

g – активную проводимость цепи;

b – реактивную проводимость цепи;

y – полную проводимость цепи;

φ – угол сдвига фаз между входным напряжением U и током I в неразветвленной части цепи, знак угла определяется по характеру исследуемой цепи (см. п. 7 и 8 данного раздела).

13. Построить графики зависимостей на одних координатных осях:

$I = f(C)$ – тока в неразветвленной части цепи от емкости;

$I_1 = f(C)$ – тока в ветви содержащей конденсатор от емкости;

$I_2 = f(C)$ – тока в ветви содержащей катушку индуктивности от **емкости**;
 $\varphi = f(C)$ – угла сдвига фаз между током I в неразветвленной части цепи и входным напряжением U от емкости.

14. Проанализировать полученные результаты.

7.4. Основные теоретические положения

Резонансом токов называют установившийся режим цепи синусоидального тока с параллельным соединением индуктивностей и емкостей, при котором входная реактивная проводимость равна нулю (ток и напряжение в неразветвленной части цепи совпадают по фазе $\varphi = 0$).

В работе исследуются резонансные свойства параллельного контура с потерями в ветви с индуктивностью (рис. 7.3).

Входная проводимость контура

$$\underline{Y} = g - jb$$

определяется суммой проводимостей первой и второй ветвей:

$$\underline{Y}_1 = g_1 - jb_1 = \frac{R_1}{z_1^2} - j \frac{x_L}{z_1^2}; \quad \underline{Y}_2 = -jb_2 = \frac{j}{x_C},$$

где $x_L = \omega L$; $z_1 = \sqrt{(R^2 + x_L^2)}$; $x_C = \frac{1}{\omega C}$.

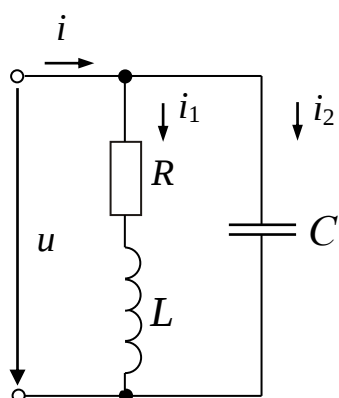


Рис. 7.3

Таким образом, $\underline{Y} = g - j(b_1 + b_2)$.

Условие резонанса токов для параллельного контура выражается в виде равенства

$$b = b_1 + b_2 = 0 \text{ или } b_1 = -b_2,$$

отсюда

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

Из последнего выражения следует, что настройка контура в режим резонанса возможна за счет изменения частоты ω источника, индуктивности L , емкости C .

Настройка контура активным сопротивлением в режим резонанса не используется.

В режиме резонанса $b = 0$, и, следовательно, входная проводимость определяется только активной составляющей, т.е. $\underline{Y} = g$.

При этом сдвиг фазы между током и напряжением φ в неразветвленной части цепи будет равен нулю $\varphi = 0$.

Резонансные значения частоты и емкости контура определяются из условия резонанса в виде:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{(L/C) - R^2}{(L/C)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{(L/C) - R^2}{(L/C)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R^2}{\rho^2}}.$$

Соотношения между входным напряжением и токами ветвей контура определяются первым законом Кирхгофа и законом Ома:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \underline{I} = \underline{Y}\underline{U} = g\underline{U} = \underline{I}_{1a};$$

$$\underline{I}_2 = \underline{Y}_2\underline{U} = -jb_2\underline{U} = \underline{I}_{2p}; \underline{I}_1 = \underline{Y}_1\underline{U} = g\underline{U} - jb_1\underline{U} = \underline{I}_{1a} + \underline{I}_{1p},$$

где $\underline{I}_{1a} = g\underline{U}$ - активная составляющая тока первой ветви, совпадающая по фазе с входным напряжением; $\underline{I}_{1p} = -jb_1\underline{U}$ и $\underline{I}_{2p} = -jb_2\underline{U}$ - реактивные составляющие токов первой и второй ветвей.

Вследствие того, что ток в ветви с емкостью является чисто реактивным, можно записать $\underline{I}_2 = \underline{I}_{2p}$.

В режиме резонанса $b_1 = -b_2$, следовательно,

$$\underline{I}_{1p} = -\underline{I}_{2p}; \underline{I} = \underline{I}_{1a}.$$

Этому результату соответствует векторная диаграмма контура в режиме резонанса на рис. 7.4.

Комплексная мощность контура в режиме резонанса равна полной мощности цепи, т.е.

$$\tilde{S} = \underline{U}\underline{I}^* = UI = S.$$

Следовательно, реактивная мощность равна нулю, а активная мощность равна полной мощности, т.е.

$$P = UI = S.$$

В вещественной форме записи полученным для режима резонанса комплексным соотношениям соответствуют равенства:

$$y = g; I = I_{1a} = gU; I_{1p} = I_{2p}.$$

Добротность параллельного контура определяют через отношение реактивных составляющих токов ветвей к входному току в режиме резонанса

$$Q = \frac{I_{1p}}{I} = \frac{I_{2p}}{I} = \frac{\omega L}{R}, \quad \text{отсюда} \quad I_{1p} = I_{2p} = QI.$$

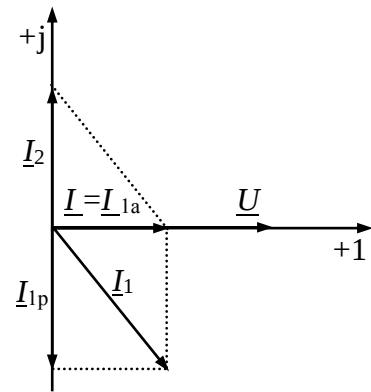


Рис. 7.4

Из последнего выражения следует, что добротность определяет кратность превышения реактивных составляющих токов ветвей над входным током контура в режиме резонанса.

Анализ режима резонанса параллельного контура с потерями в ветви с индуктивностью позволяет установить следующие его особенности:

- входная проводимость контура имеет минимальное значение, равное g ;
- входной ток контура при заданном напряжении имеет минимальное значение, равное $I = gU$;
- реактивные составляющие токов ветвей равны по величине и компенсируют друг друга, т.е. $I_{1p} = I_{2p}$;
- энергетические процессы в контуре определяются равенством полной и активной мощностей.

Примерный вид резонансных кривых $I = f_1(C)$; $I_1 = f_2(C)$; $I_2 = f_3(C)$; $\varphi = f_4(C)$ при значениях $\omega = \text{const}$; $U = \text{const}$; $L = \text{const}$; $R = \text{const}$ показан на рис. 7.5.

Резонансные кривые параллельного контура при изменении параметра C получают из анализа следующих соотношений:

$$b_2 = -\omega C; y = \sqrt{(g^2 + (b_1 + b_2)^2)}; \varphi = \arctg \frac{b_1 + b_2}{g};$$

$$I = yU; I_1 = y_1 U = \sqrt{(g^2 + b_1^2)} U; I_2 = y_2 U = b_2 U.$$

При указанных условиях параметры $b_1 = \text{const}$; $g = \text{const}$ и следовательно ток I_1 будет сохранять неизменные значения.

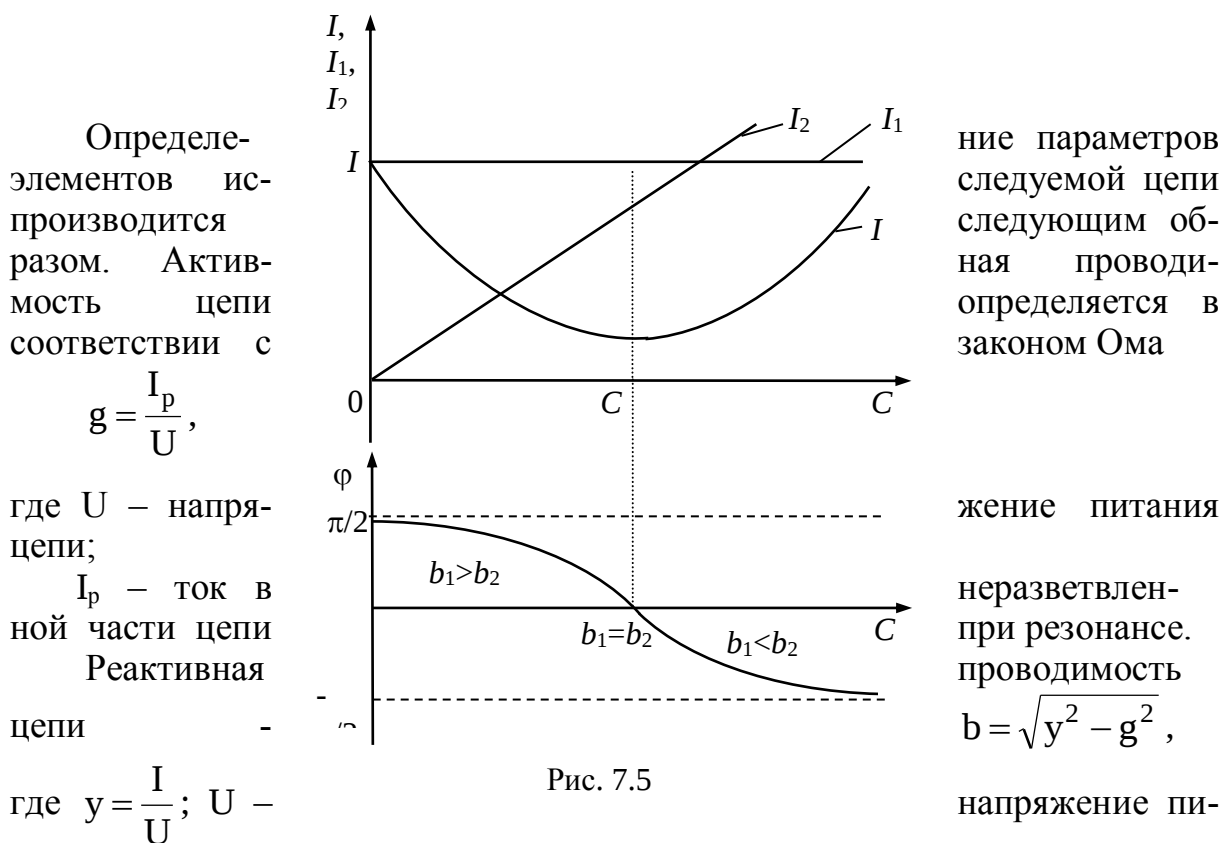
В случае изменения значения $C \rightarrow 0$, значение проводимости b_2 будет стремиться к 0, а полной проводимости y к $\sqrt{(g^2 + b_1^2)}$. При этом значение тока I в неразветвленной части цепи будет стремиться к значению $I_1 = \sqrt{(g^2 + b_1^2)} U$, а значение тока I_2 - к 0. Величина сдвига фаз φ будет принимать значение $\arctg \frac{b_1}{g} > 0$.

При значении $C = C_0$ (режим резонанса) значение проводимости b_2 примет значение $b_2 = b_1$, а полной проводимости $y = g$. При этом значение тока I в неразветвленной части цепи будет равным $I = gU$, а в цепи, содержащей емкость значение $I_2 = \omega C_0 U$.

Сдвиг фаз φ между током и напряжением в неразветвленной части цепи будет принимать значение $\varphi = 0$.

В случае изменения значения C до ∞ , значения реактивной проводимости b_2 и полной проводимости y также будет стремиться к ∞ . В результате значения тока I в неразветвленной части цепи и тока I_2 в ветви с **емко-**

стью также будет стремиться к ∞ , а сдвиг фаз φ между током и напряжением в неразветвленной части цепи будет стремиться к значению $\frac{\pi}{2}$.



тания цепи; I – ток в неразветвленной части цепи.

Угол φ сдвига фазы между напряжением, приложенным у цепи, и током в неразветвленной части цепи зависит от параметров элементов цепи и может быть вычислен по формуле

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g}.$$

7.5. План отчета по работе

Отчет о лабораторной работе кроме материалов, перечисленных в разделе 7.3.1 должен **содержать**:

- расчетные формулы параметров исследуемой цепи с примерами выполнения расчетов;
- расчетную формулу угла сдвига фаз между входным напряжением U и током I в неразветвленной части цепи с примерами расчета φ до режима резонанса и после режима резонанса;
- графики зависимостей $I = f(C)$, $I_1 = f(C)$, $I_2 = f(C)$, $\varphi = f(C)$;
- выводы по работе, в которых должно быть указано:
 - а) при каких соотношениях между индуктивной и емкостной проводимостями имеет место резонанс токов;

б) характер изменения графиков зависимостей $I = f(C)$, $I_1 = f(C)$, $I_2 = f(C)$, $\varphi = f(C)$ (проанализировать и объяснить);

в) возможные области применения или опасность данного явления для определенных режимов использования электрических цепей.

7.6. Контрольные вопросы

1. Чему равняется комплексная проводимость цепи?
2. Что такое реактивная проводимость цепи?
3. Как определяются токи в параллельной цепи?
4. В каких случаях параллельная цепь при наличии индуктивности и емкости носит индуктивный характер, емкостной характер, активный характер?
5. Что называется резонансом токов?
6. Как и почему изменяются общий ток в цепи при изменении емкости?
7. Как и почему изменяется ток в ветви с катушкой индуктивности при изменении емкости?
8. Как и почему изменяется ток в ветви с конденсатором при изменении емкости?
9. Как и почему изменяется угол между напряжением, приложенным к цепи, и общим током при изменении емкости?
10. Какое значение принимает общий ток при резонансе?
11. Какое значение принимает полная проводимость при резонансе?
12. Чему равен угол φ при резонансе?
13. Когда токи в параллельных ветвях при резонансе будут больше общего тока параллельной цепи?

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – 6-е изд. / Л.А. Бессонов. - М.: Высшая школа, 1973.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Конспект лекций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973. – 724 с.
2. *Зевеке Г.В.* Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. *Корниенко И.М.* Лабораторные работы по курсу ТОЭ / И.М. Корниенко, С.Б. Смирнов, В.Е. Моряков. – Севастополь: СВВМИУ, 1993. – 152 с.
4. *Моряков В.Е.* Сборник задач для практических занятий по курсу ТОЭ / В.Е. Моряков. – Севастополь: СВВМИУ, 1996. – 120 с.
5. *Береза Б.П.* Теоретические основы электротехники. - Ч.1: Лабораторные работы / Б.П. Береза, П.В. Бугаева, Е.Г. Малюк, В.Е. Моряков. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2011. – 80 :.
6. *Моряков В.Е.* Постоянный ток / В.Е. Моряков. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – 28 с.

**Полина Викторовна Бугаева
Светлана Владимировна Гайдук
Валентин Егорович Моряков**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Лабораторные работы

Часть 1

Литературный редактор
Р.В. Дмитриева
Технический редактор
Н.Н. Остапенко

Подписано к печати 15.05.15. Изд. № 04/15. Зак. 53/2015. Тираж 100 экз.
Объем 4,5 п. л. Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 4,41.
Формат бумаги 60 x 84 1/16

РИИЦМ ФГБОУВО «Севастопольский государственный университет»