

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО “УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА

Кафедра теплоэнергетики

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ЧАСТЬ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ



Ижевск
2021

УДК 621.3 (075.8) + 621.38 (075.8)

ББК 31.2я73 + 32.85я73-5

Э45

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ

Рецензент: к.т.н, доцент кафедры Электротехника ИжГТУ А.А. Штин

Э45 Электротехника и электроника. Лабораторный практикум. Часть I. Электрические цепи. // Авторы-составители: Мезрин В.В., Зиновьев В.В. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2021. – 72 с.

Методическое пособие для выполнения лабораторных работ по дисциплине “Электротехника и электроника” состоит из трех частей согласно основным разделам курса.

В первой части достаточно подробно представлены методические указания по проведению лабораторных работ по основным разделам электротехники, в частности, электрическим цепям постоянного и переменного синусоидального тока, трехфазным цепям, переходным процессам. Кратко изложены теоретические сведения изучаемого раздела электротехники, представлены схемы и порядок проведения экспериментов, состав оборудования и средств измерения, даны рекомендации по обработке результатов измерений.

Лабораторные работы проводятся на стендах “Квазар-02”. Очень важно, что для проведения лабораторных работ студенты самостоятельно собирают электрическую схему эксперимента из деталей, узлов и измерительных приборов, расположенных в блоках стенда.

Лабораторные работы предназначены для использования в лабораторном практикуме по электротехническим дисциплинам студентами различных инженерных неэлектротехнических специальностей и направлений.

Методические указания разработаны в соответствии с действующим федеральным государственным образовательным стандартом по направлениям подготовки 13.03.02 – “Электроэнергетика и электротехника” и 13.03.01 – “Теплоэнергетика и теплотехника”.

© В.В. Мезрин, В.В. Зиновьев,
авт- сост., 2021

© ФГБОУ ВО “Удмуртский
государственный университет”, 2021

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время установки преобразования и передачи электрической энергии получили столь широкое распространение, что знакомство с их работой и знание основных законов электротехники обязательны для специалистов широкого профиля любой специальности. Только достаточно высокий уровень электротехнической подготовки позволит специалисту решать задачи по созданию современных экономически выгодных электротехнических устройств и находить пути повышения их энергетической эффективности.

Лабораторные исследования позволяют более глубоко понимать основные законы электротехники, принципы работы электроустановок и их отдельных узлов. Большинство лабораторных работ выполняется на стендах “Квазар-02” модульного типа, позволяющих собрать из отдельных элементов схему для исследования того или иного явления. В основе методических указаний лежит учебное пособие [1], разработанное коллективом авторов Уфимского государственного авиационного технического университета, существенно переработанное, исправленное и дополненное.

Выполнение лабораторных работ на стендах позволяет студентам ознакомиться с приборами и методами измерения электротехнических величин, методиками проведения экспериментов, представлять структуру технологических устройств преобразования и передачи электрической энергии.

По результатам работы составляется отчет. Отчет по лабораторной работе должен содержать название и цель работы, электрические схемы экспериментов, таблицы с измеренными и вычисленными величинами, причем для одного из вариантов вычисления следует подробно показать со всеми формулами и подставленными значениями величин. Также отчет должен содержать необходимые графики, векторные диаграммы, сравнение полученных результатов с теоретическими формулами, анализ возможного отклонения от теоретических формул и графиков. В заключении необходимо сделать выводы о проделанной работе.

В содержание лабораторных работ включены контрольные вопросы для самоподготовки, задачи, которые нужно уметь решать.

Основные правила техники безопасности и проведения работ в электротехнической лаборатории

Перед началом выполнения лабораторных работ проводится инструктаж по технике безопасного проведения работ.

Основные правила техники безопасности при проведении лабораторных работ:

- а) не загромождать рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе и посторонними предметами;
- б) перед сборкой электрической цепи убедиться, что питание стенда отключено;
- в) для сборки использовать провода с исправными клеммами и неповрежденной изоляцией;
- г) не прикасаться к выводам отключенных конденсаторов, разрядить конденсатор до сборки электрической цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко;
- д) после сборки цепи пригласить преподавателя для проверки правильности сборки и получить разрешение на включение стенда;
- е) все изменения в схемах проводить при отключенном стенде;
- ж) немедленно отключить стенд при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции, при срабатывании устройств защиты;
- з) при поражении электрическим током, отключить стенд, сообщить преподавателю и оказать первую помощь пострадавшему.

Правила сборки электрической цепи:

- 1) при сборке электрической цепи в первую очередь собирается последовательная цепь, а затем подключаются параллельные ветви; вольтметры, параллельные обмотки ваттметров, фазометров подсоединяются в последнюю очередь;
- 2) при подключении какого бы-то ни было элемента, не имеющего обозначения полярности, входной клеммой считается левая (верхняя), а выходной – правая (нижняя);
- 3) перед включением стенда регуляторы напряжения устанавливаются в положение, обеспечивающее минимальный ток, делители напряжения – на минимум напряжения на выходе, сопротивления реостатов увеличиваются до максимума;
- 4) исследуемая цепь включается только после ее проверки преподавателем;
- 5) вносить изменения в электрическую цепь, разбирать ее можно только с разрешения преподавателя после отключения всех источников питания;
- 6) по окончании работ собрать соединительные провода по типоразмерам и сложить их на нижнюю полку стола.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование элементов электрической цепи постоянного тока

1. Цели и задачи работы

Цель: снятие вольт-амперных характеристик элементов электрической цепи постоянного тока и изучение метода эквивалентных преобразований.

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы должны: *знать* элементы электрической цепи постоянного тока и их характеристики, способы их соединения и эквивалентные преобразования;

уметь выполнять расчеты электрических цепей с одним источником энергии;

получить навыки проведения экспериментов с электрическими цепями, выбора измерительных приборов и оценки получаемых результатов.

2. Теоретическая часть

2.1. Характеристики источников и приемников

Совокупность соединенных друг с другом источников и приемников электрической энергии называют электрической цепью. Изображение электрической цепи с помощью условных знаков – электрической схемой.

Основная характеристика любого элемента цепи – зависимость напряжения на элементе от тока, протекающего по нему (или зависимость тока от напряжения) – **вольт-амперная характеристика**. По виду вольт-амперной характеристики все элементы можно разделить на линейные и нелинейные. Электрическая цепь называется линейной, если состоит только из линейных элементов. Если имеется хотя бы один нелинейный элемент, электрическая цепь будет нелинейной.

Пассивные элементы (приемники электрической энергии) имеют вольт-амперную характеристику, проходящую через начало координат (см., напр., рис. 1.2 и 1.3). Для линейного элемента отношение $\frac{U}{I} = R$ остается постоянным и не зависит от тока. Для нелинейного элемента вводятся понятия статического $R_{ст} = \frac{U}{I}$ и дифференциального $R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ сопротивлений, которые зависят от тока (напряжения).

Вольт-амперная характеристика линейного источника электрической энергии имеет вид, показанный на рис. 1.1.

Из уравнения вольт-амперной характеристики линейного источника электрической энергии

$$U = E - IR_0 \quad (1.1)$$

следует, что источник электрической энергии характеризуется двумя величинами: эдс E и внутренним сопротивлением R_0 . Если реальный потребля-

емый нагрузкой ток I и напряжение U зависят от сопротивления нагрузки R_H , то эдс E в схеме замещения не зависит от тока.

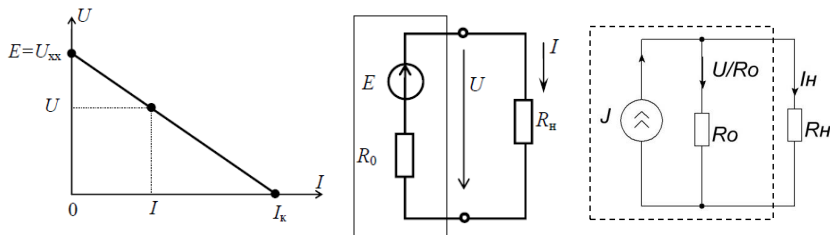


Рис.1.1.1. Вольт-амперная характеристика и схемы замещения линейного источника.

Вольт-амперная характеристика источника еще называется внешней характеристикой.

Другая запись уравнения вольт-амперной характеристики

$$I = J - \frac{U}{R_0} = J - U g_0 \quad (1.2)$$

позволяет представить источник электрической энергии в виде источника постоянного тока $J = I_K = \frac{E}{R_0}$, равному току короткого замыкания, и включенной параллельно с ним внутренней проводимости $g_0 = \frac{1}{R_0}$. Обе схемы замещение эквивалентны. Выбор той или иной схемы замещения зависит от поставленной задачи.

Расчет линейной электрической цепи чаще всего производится аналитически, а нелинейной – графически.

2.2. Соединение пассивных элементов и эквивалентные преобразования.

Элементы в электрической цепи могут быть соединены последовательно, параллельно, а также звездой и треугольником.

Эквивалентным называется такое преобразование участка электрической цепи, при котором все токи и напряжения в остальной цепи не изменяются.

При **последовательном** соединении по всем элементам протекает один и тот же ток, поэтому такой участок цепи можно заменить одним эквивалентным элементом. Для линейных элементов эквивалентное сопротивление такого участка

$$R_{\text{эkv}} = \sum R_k \quad (1.3)$$

При последовательном соединении нелинейных (и линейных) элементов их вольт-амперные характеристики складываются по напряжению (рис.1.2).

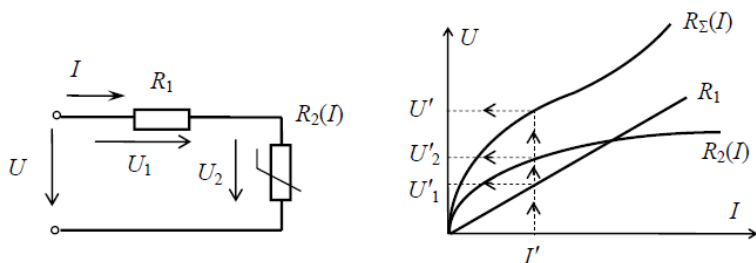


Рис.1.2. Схема и вольт-амперные характеристики при соединении приемников последовательно.

Параллельным соединением называется такое, при котором ко всем элементам приложено одно и то же напряжение. Эквивалентная проводимость такого участка цепи равна сумме проводимостей ветвей. Для линейных элементов

$$g_{\text{экв}} = \sum g_k \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_{\text{экв}}} = \sum \frac{1}{R_k} \quad (1.4)$$

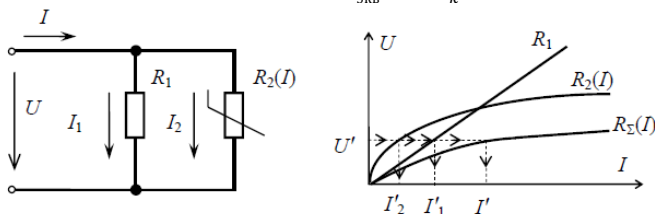


Рис.1.3. Параллельное соединение линейного и нелинейного сопротивления и получение эквивалентной характеристики.

При параллельном соединении нелинейных элементов эквивалентную характеристику можно получить сложением характеристик отдельных элементов по току (рис.1.3).

Также в электрической цепи возможны соединения треугольником и звездой, когда к трем узлам подсоединены три элемента (рис.1.4). Если между тремя узлами включены линейные пассивные элементы, то соединение звездой можно эквивалентно преобразовать в соединение треугольником и наоборот (рис.1.4).

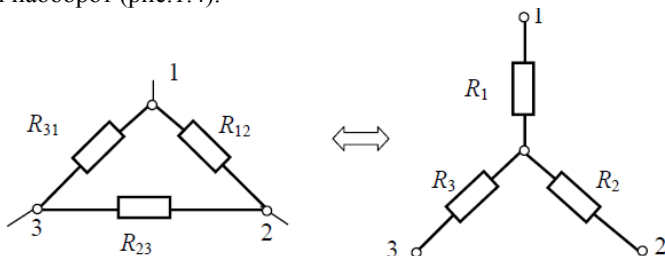


Рис.1.4. Соединение приемников треугольником и звездой.

Формулы эквивалентных преобразований:

$$\text{преобразование } \Delta \rightarrow Y \quad \begin{cases} R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 = \frac{R_{21} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{32}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\text{преобразование } Y \rightarrow \Delta \quad \begin{cases} R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\ R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \\ R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \end{cases} \quad (1.6)$$

Преобразования звезды и треугольника полезны тем, что в результате появляются последовательные и параллельные соединения.

2.3. Метод пересечения характеристик

Исследование электрических цепей с нелинейными элементами методом эквивалентных преобразований – достаточно трудоемкий процесс. Для схемы, содержащей один нелинейный элемент, более эффективен метод пересечения характеристик, при котором не требуется графически складывать характеристики. Для схемы рис.1.2 можно записать уравнение по 2-му закону Кирхгофа $U = I \cdot R_1 + U_{н.э.}$. Выразим из этого уравнения ток в цепи

$$I = \frac{U - U_{н.э.}}{R_1} \quad (1.7)$$

В одних координатах построим характеристику нелинейного элемента $I_{н.э.} = f(U_{н.э.})$ и прямую по уравнению (1.7) $I = f(U_{н.э.})$. Эта прямая, называемая нагрузочной прямой, строится по двум точкам, например, при $U_{н.э.} = U$ ток $I = 0$ и при $U_{н.э.} = 0$ ток $I = \frac{U}{R_1}$. Поскольку в этой схеме ток нелинейного элемента и ток в цепи – один и тот же ток, точка пересечения этих графиков и будет решением задачи.

Этот метод хорош еще тем, что он позволяет легко находить решение при изменении параметров схемы. Так, если напряжение на входе цепи изменяется, то нагрузочная прямая переносится параллельно себе, при изменении величины линейного резистора, нагрузочная прямая поворачивается относительно оси абсцисс.

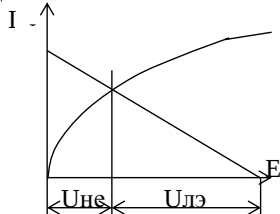


Рис.1.5. Иллюстрация к методу пересечения характеристик.

3. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения $0 \div 250$ В, со встроенным вольтметром, расположенным в “Блоке включения”;

2) мостовой выпрямитель, расположенный в “Блоке включения”, используемый в качестве источника электрической энергии для цепи постоянного тока;

3) переменный резистор сопротивлением 220 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве нагрузки для исследования работы источника электрической энергии;

4) постоянный резистор сопротивлением 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве балластного сопротивления при исследовании работы источника электрической энергии;

5) постоянный линейный резистор сопротивлением $R_{\text{лз}} = 470$ Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве линейного сопротивления при исследовании работы приемников электрической энергии;

6) блок ламповых реостатов (нелинейные сопротивления $R_{\text{нэ}}$ – лампы накаливания), расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве нелинейного сопротивления при исследовании работы приемников электрической энергии;

7) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

а) pA – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Исследование работы источника электрической энергии

В качестве источника постоянного тока используется мостовой выпрямитель.

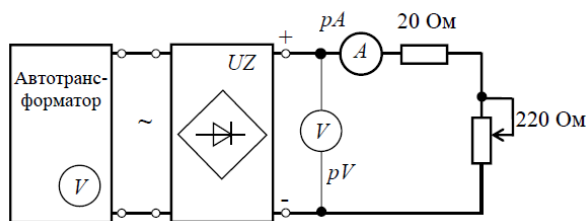


Рис.1.6. Схема для изучения источника постоянного тока.

Соберите электрическую цепь, рис.1.6.

Включите стенд и с помощью автотрансформатора установите напряжение источника электрической энергии порядка $30 \div 50$ В. Ручку реостата при этом установите в одном из крайних положений, при котором ток в цепи будет минимальным.

Изменяя сопротивление переменного резистора, снимите внешнюю характеристику источника, результаты занесите в табл.1.1. Следите, чтобы ток в цепи не превышал 0,45 А.

Таблица 1.1

Внешняя характеристика источника постоянного тока

I, A								
U, B								

По результатам эксперимента постройте внешнюю характеристику источника, используя метод наименьших квадратов по данным табл.1.1 напишите уравнение внешней характеристики и определите эдс E и внутреннее сопротивление R_0 источника.

4.2. Исследование вольт-амперных характеристик пассивных элементов и их соединений.

Для эксперимента соберите цепь, показанную на рис.7. В качестве нагрузки подсоединяя линейный резистор, нелинейный элемент (лампу накаливания) и их комбинации.

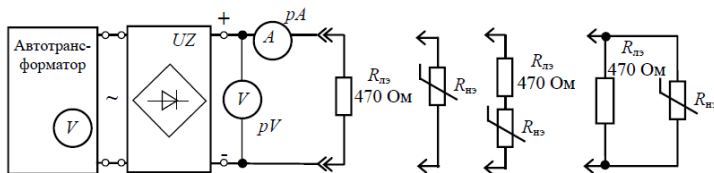


Рис.1.7. Схемы для снятия вольт-амперных характеристик.

Изменяя напряжение источника в пределах $0 \div 100$ В, снимите вольт-амперные характеристики элементов и их комбинаций. Результаты измерений занесите в табл.1.2.

Таблица 1.2

Вольт-амперные характеристики пассивных элементов

	U, B	0	20	40	60	80	100
Линейный элемент	I, A						
Нелинейный элемент	I, A						
Последовательное соединение	I, A						
Параллельное соединение	I, A						

По результатам опытов следует построить экспериментальные вольт-амперные характеристики. Отдельно постройте теоретические суммарные характеристики при последовательном и параллельном соединении эле-

ментов (примеры показаны на рис.1.2 и 1.3). Сравните экспериментальные и теоретические характеристики.

4.3. Изучение метода пересечения характеристик.

Составьте схему рис.1.7 с последовательно включенными нелинейным элементом и резистором. Изменяя напряжение на входе цепи, измерьте ток и напряжения на отдельных элементах, результаты занести в табл.1.3.

Таблица 1.3

Исследование метода пересечения характеристик

Напряжение на входе цепи	U, В	10	30	50	70	90
Ток	I, А					
Напряжение нелинейного элемента	$U_{н.э.}$, В					
Напряжение резистора	$U_{н.р.}$, В					

По данным табл.1.2 постройте вольт-амперную характеристику нелинейного элемента $I=f(U_{н.э.})$. И здесь же проведите нагрузочные прямые, соответствующие приложенным напряжениям. Убедитесь, что ток в цепи и напряжения на отдельных элементах, найденные графически совпадают с измеренными значениями.

5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- таблицы измеренных величин,
- графики,
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Генератор постоянного тока бортовой сети самолета при токе 20А имеет на зажимах напряжение 200 В, а при токе 60 А – 196 В. Определите внутреннее сопротивление и ЭДС источника электрической энергии. Постройте внешнюю характеристику источника.

Задача 2. Заданы параметры элементов электрической цепи E [В], Ri [Ом]. Определите токи в ветвях (рис. 1.8).

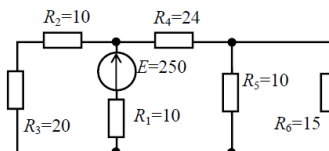


Рис.1.8.

Задача 3. По внешней характеристике источника (рис.1.9) определите эдс и внутреннее сопротивление.

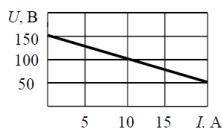


Рис.1.9

Задача 4. Определите эквивалентное сопротивление цепи, если сопротивления заданы в Омах (рис. 1.10).

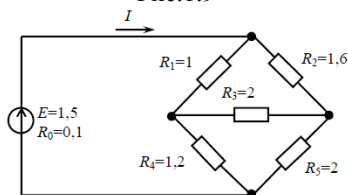


Рис. 1.10.

Задача 5. Определите эквивалентное сопротивление цепи (рис. 1.11).

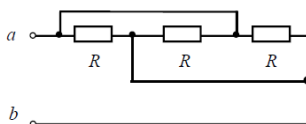


Рис.1.11

Задача 6. В схеме измерительного моста заданы параметры электрической цепи E [В], R [Ом]. Определите ток I (рис. 1.12).

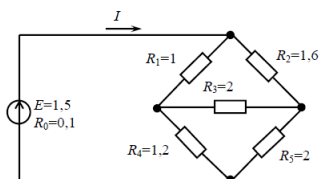


Рис.1.12

Задача 7. Определите токи в ветвях и напряжение на входе цепи, если известны сопротивления участков цепи R [Ом] и показание ваттметра pW составляет $P=320$ Вт (рис.1.13).

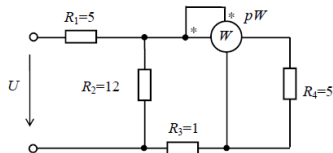


Рис.1.13

Задача 8. К цепи, состоящей из последовательно соединенных диода VD и резистора $R=150$ Ом (рис.1.14), приложено напряжение $U=5$ В. Определить ток в цепи и падение напряжения на ее элементах. Как изменится рабочий режим, если сопротивление R увеличить в два раза

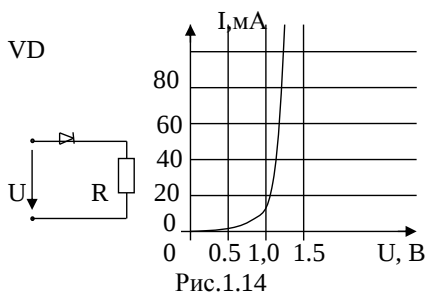


Рис.1.14

Задача 9. Линейный элемент $R=140$ Ом и нелинейный элемент, вольтамперная характеристика которого задана таблицей, соединены

последовательно и подключены к источнику питания с напряжением $U=200\text{В}$. Определить мощность, рассеиваемую на нелинейном элементе

U, В	0	20	40	60	80	100	120	160	200	240
I, А	0	0.22	0.36	0.45	0.53	0.66	0.66	0.76	0.85	0.90

Задача 10. От фотоэлектрического солнечного модуля, вольт-амперная характеристика которого представлена на рис.1.15, заряжается аккумуляторная батарея с ЭДС $E=20\text{В}$ и внутренним сопротивлением $r_{\text{вн}}=0.8\text{ Ом}$.

Определить ток зарядки и напряжение на батарее.

Начертить схему.

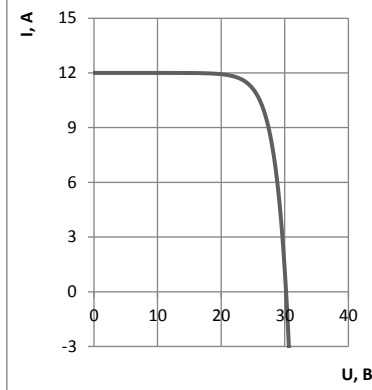


Рис.1.15

Контрольные вопросы

1. Назовите примеры линейных и нелинейных элементов.
2. Лампа накаливания – нелинейный элемент, однако при расчетах ее считают линейным. Почему?
3. Можно ли реальный источник электрической энергии представлять в виде идеального источника тока или напряжения?
4. Почему в электросетях в вечернее время часто наблюдается понижение напряжения?
5. В чем состоит суть метода эквивалентных преобразований?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Исследование линейной электрической цепи с несколькими источниками

1. Цели и задачи работы.

Цель: теоретическое и экспериментальное изучение методов анализа разветвленных линейных электрических цепей постоянного тока с двумя и более источниками электрической энергии (на основе законов Кирхгофа, метода двух узлов и метода эквивалентного генератора).

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

знать методы расчета электрических цепей;

уметь выполнять электрические расчеты цепей с двумя и более источниками электрической энергии различными методами;

получить навыки проведения экспериментов с электрическими цепями, выбора измерительных приборов и оценки получаемых результатов.

2. Теоретическая часть.

Основной задачей анализа электрических цепей является определение токов, а далее – напряжений, мощностей в ветвях электрической цепи по заданным параметрам элементов цепи. Возможна постановка задачи в виде определения других параметров при заданных токах в ветвях.

Все методы расчета основаны на законах Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся в данном узле, равна нулю*

$$\sum I_k = 0, \quad (2.1)$$

где k – порядковый номер ветви. Токи, направленные к узлу, обычно берутся со знаком “плюс”, а направленные от узла – со знаком “минус”.

Второй закон Кирхгофа гласит: *алгебраическая сумма падений напряжений вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС этого же контура*

$$\sum R_k I_k = \sum E_j \quad (2.2)$$

где k – порядковый номер ветви, j – порядковый номер ветви, содержащей источник ЭДС.

В каждую из сумм соответствующие слагаемые входят со знаком «плюс», если они совпадают с направлением обхода контура, и со знаком «минус», если они не совпадают с ним.

Для линейных цепей предложен ряд методов расчета: метод контурных токов, метод узловых потенциалов – универсальные методы, метод эквивалентных преобразований, метод пропорциональных величин, метод двух узлов – методы, применяемые для некоторых цепей. Особо стоит отметить метод эквивалентного генератора, когда необходимо найти ток в одной ветви.

2.1. Расчет цепей с применением законов Кирхгофа.

Для электрической цепи следует составить столько уравнений, сколько в цепи ветвей с неизвестными токами, то есть общее число уравнений $n = N_B - N_J$.

По первому закону Кирхгофа составляют $n_1 = N_y - 1$, по второму закону – остальные $n_2 = n - n_1$, причем следует выбрать независимые контуры, не содержащие ветви с известными токами.

Здесь N_B – общее число ветвей,

N_y – число узлов,

N_J – число ветвей с известными токами.

Алгоритм расчета по законам Кирхгофа:

- а) определяется количество ветвей и узлов в схеме;
- б) определяются общее количество уравнений и количество уравнений по первому и второму законам Кирхгофа;
- в) произвольно выбираются направления токов в ветвях;
- г) выбираются узлы, независимые контуры, а также условно положительные направления их обхода;
- д) составляются уравнения по первому и второму законам Кирхгофа, для линейной цепи получается система линейных уравнений;
- е) решается система уравнений;
- ж) проводится анализ результатов (истинное направление тока противоположно выбранному, если в результате расчета получилось его отрицательное значение);
- з) с целью проверки правильности расчета составляется уравнение баланса мощностей.

2.2. Метод двух узлов.

Этот метод применяется для схемы, содержащей только два узла.

Пусть между двумя узлами (например, а и б) включено m ветвей. Тогда напряжение между узлами $U_{ab} = \phi_a - \phi_b$ определяется в соответствии с выражением

$$U_{ab} = \frac{\pm \sum G_k E_k \pm \sum J_k}{\sum G_k}, \quad (2.3)$$

где G_k – проводимости ветвей, E_k – эдс источников, J_k – ток источников постоянного тока. В числителе выбирается знак “+”, если источники направлены к узлу a , и знак “-” в противоположном случае.

Токи в ветвях электрической цепи находятся по закону Ома для участка цепи с использованием найденного числового значения напряжения между двумя потенциальными узлами $I_k = \frac{U_{ab} \pm E_k}{R_k}$.

Алгоритм расчета по методу двух узлов:

- а) определяется межузловое напряжение U_{ab} ;
- б) определяются токи в ветвях по закону Ома для активного или пассивного участка цепи;

в) проводится проверка составлением уравнений по первому закону Кирхгофа и составлением баланса мощностей.

2.3. Метод эквивалентного генератора.

Метод эквивалентного генератора применяется для анализа электрических цепей в случае, когда требуется определить ток в одной ветви.

Согласно методу эквивалентного генератора (активного двухполюсника), любая сложная цепь, содержащая источники питания, по отношению к исследуемой ветви может быть заменена эквивалентным генератором с эдс $E_{\text{экв}}$, равной напряжению холостого хода активного двухполюсника и внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$, равным входному сопротивлению такого же двухполюсника, но пассивного.

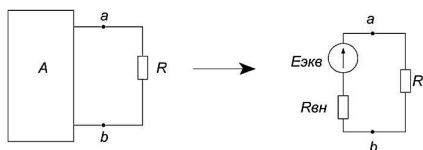


Рис.2.1. Иллюстрация к методу эквивалентного генератора.

Искомый ток тогда равен

$$I = \frac{E_{\text{экв}}}{R_{\text{вн}} + R} \quad (2.4)$$

Эквивалентную эдс и входное сопротивление двухполюсника можно определить как расчетным путем, так и экспериментально. Для этого достаточно провести опыты холостого хода и короткого замыкания.

Алгоритм расчета по методу эквивалентного генератора:

а) составляется схема активного двухполюсника без исследуемой ветви;

б) определяется эдс активного двухполюсника $E_{\text{экв}} = U_{\text{хх}}$, для этого следует произвести полный расчет полученной схемы любым методом;

в) определяется входное сопротивление $R_{\text{экв}}$ пассивного двухполюсника методом эквивалентных преобразований, при этом источники эдс закорачиваются, а ветви с источниками тока размыкаются;

г) определяется ток в исследуемой ветви по закону Ома (2.4) для активного или пассивного участка цепи;

2.4. Составление уравнения баланса мощностей.

Одним из методов проверки правильности расчетов будет составление уравнения баланса мощностей

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{пр}}, \quad (2.5)$$

где мощность, генерируемая источниками $\sum P_{\text{ист}} = \sum \pm E_i I_i$, произведение берется со знаком “+”, если направления тока и эдс совпадают, и

со знаком “-”, если их направления противоположны; мощность потребляемая приемниками $\sum P_{\text{пр}} = \sum I_i^2 R_i$.

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке электрической цепи используется следующее оборудование:

1) источник постоянного напряжения БП-15 со встроенным электронным вольтметром, расположенный в “Блоке источников постоянного тока”, используемый в исследуемой цепи в качестве источника ЭДС E_1 ;

Примечание: при подключении данного источника используются клеммы «плюс» и «земля».

2) источник постоянного напряжения БП-30 со встроенными электронным вольтметром и амперметром, расположенный в “Блоке источников постоянного тока”, используемый в исследуемой цепи в качестве источника ЭДС E_3 ;

3) резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве нагрузки в одной из ветвей цепи;

4) резисторы с сопротивлением 30 Ом, расположенные в “Блоке трансформаторов”, используемые в качестве нагрузок в ветвях цепи;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”

а) pA – амперметры с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) pV – вольтметры с верхним пределом измерения 250 В;

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка стенда к работе.

Соберите электрическую цепь (рис.2.2) из выше перечисленных элементов.

В качестве амперметра РА3 используется встроенный в источник питания амперметр. Звездочки у приборов показывают выбранное положение направления тока.

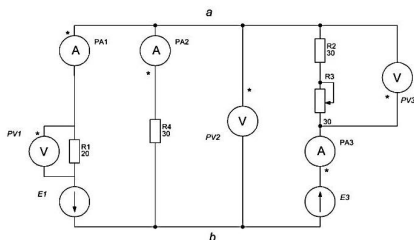


Рис.2.2. Схема эксперимента.

Перед проведением экспериментов правильность схемы проверяет преподавателем.

4.2. Проверка законов Кирхгофа.

Включите источники постоянного тока и установите на источнике БП-15 напряжение порядка 10В, а на источнике БП-30 – порядка 25В.

Проведите измерения токов в ветвях и напряжений на элементах в трех режимах работы цепи: в крайних или близких к крайним положениям движка реостата R_3 и в среднем положении. В последующих опытах напряжения, выставленные на источниках питания, и положение движка реостата оставляйте неизменными. Результаты измерений занести в табл.2.1.

Таблица 2.1

Проверка законов Кирхгофа и баланса мощностей

Измерено								Вычислено					
E_1 , В	E_3 , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	U_{R1} , В	U_{R2} , В	U_{R3} , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_{31} , Ом	ΣI_k , А	$\Sigma I^2 R$, Вт	ΣEI , Вт

По измеренным значениям токов и напряжений рассчитать сопротивления в ветвях, проверить выполнение первого закона Кирхгофа и баланс мощностей, результаты занести в табл.2.1. Также для одного из контуров составить уравнение по второму закону Кирхгофа и построить потенциальную диаграмму.

4.3. Экспериментальная проверка метода двух узлов.

По измеренному напряжению между узлами $U_{ab}=U_2$ и значениями ЭДС и сопротивлений рассчитайте токи в ветвях по закону Ома для участка цепи. Полученные значения токов сравните с измеренными (табл.2.1).

4.4. Экспериментальное определение тока I_2 методом эквивалентного генератора.

Проведите опыты холостого хода и короткого замыкания для ветви с резистором R_2 .

Для опыта холостого хода отсоедините резистор R_2 и измерьте напряжение $U_{abxx}=E_{эkv}$.

Для опыта короткого замыкания замкните накоротко резистор R_2 и измерьте ток в этой ветви $I_{кз}$.

Определите внутреннее сопротивление эквивалентного генератора $R_{вн} = \frac{E_{эkv}}{I_{кз}}$.

Рассчитайте по формуле (2.4) ток в этой ветви и сравните значение с измеренным в первом опыте.

Таблица 2.2

Проверка метода эквивалентного генератора

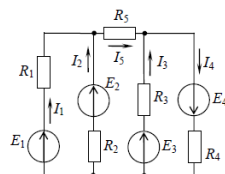
Измерено		Вычислено	
$E_{экв}, \text{В}$	$I_{кз}, \text{А}$	$R_{вн}, \text{Ом}$	$I_2, \text{А}$

5. Содержание отчета;

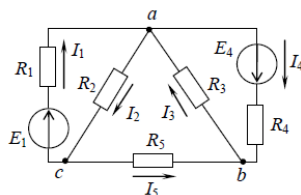
- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- потенциальная диаграмма,
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

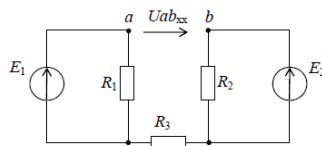
Задача 1. Определите ток I_4 , если токи в ветвях $I_1=1\text{А}$, $I_2=2\text{А}$, $I_3=2\text{А}$.



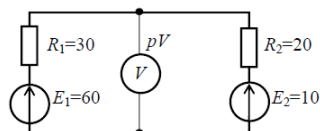
Задача 2. Составить уравнения по второму закону Кирхгофа для контура, содержащего ветви с R_1 , R_4 , R_5 .



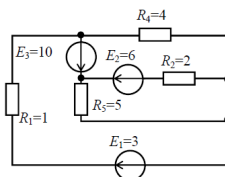
Задача 3. Определить напряжение U_{abxx} , если $E_1=20\text{В}$, $E_2=50\text{В}$, $R_1=R_2=10\text{Ом}$, $R_3=20\text{Ом}$.



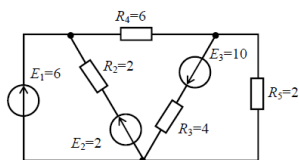
Задача 4. Определите показание вольтметра и укажите, в каких режимах работают источники ЭДС ($R [\text{Ом}]$, $E [\text{В}]$).



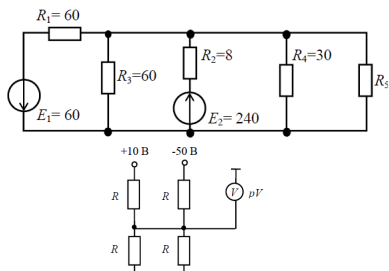
Задача 5. Рассчитать токи в ветвях схемы с помощью законов Кирхгофа. Составить уравнение баланса мощностей, ($R [\text{Ом}]$, $E [\text{В}]$)



Задача 6. Рассчитать токи в ветвях схемы с помощью законов Кирхгофа. Составить уравнение баланса мощностей, (R [Ом], E [В])

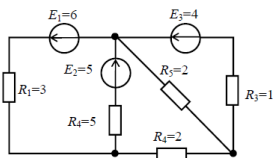


Задача 7. Определить токи в ветвях электрической цепи. (R [Ом], E [В]).

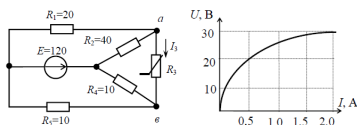


Задача 8. Определить показание вольтметра в электрической цепи.

Задача 9. Для электрической цепи определить ток в ветви с резистором R_4 . (R [Ом], E [В])



Задача 10. В электрической цепи определить ток в ветви с нелинейным элементом R_3 . Вольтамперная характеристика которого приведена. (R [Ом], E [В]).



Контрольные вопросы

1. Сколько уравнений составляется по первому и по второму законам Кирхгофа?
2. Как выбираются направления токов в ветвях?
3. Как выбираются независимые контуры?
4. Можно ли применять метод эквивалентных преобразований для нелинейной цепи?
5. Перечислите методы расчета, которые можно использовать только в линейных цепях.
6. Почему метод эквивалентного генератора удобно применять при расчете нелинейных цепей?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Исследование свойств линейной электрической цепи

1. Цели и задачи работы.

Цель: теоретическое и экспериментальное изучение свойств линейных электрических цепей на примере цепи постоянного тока с двумя источниками

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

изучить методы расчета линейных электрических цепей;

уметь выполнять электрические расчеты цепей с двумя и более источниками электрической энергии различными методами;

иметь навыки проведения экспериментов с электрическими цепями, выбора измерительных приборов и оценки получаемых результатов.

2. Теоретическая часть.

Основной задачей анализа электрических цепей является определение токов, а далее - напряжений, мощностей в ветвях электрической цепи по заданным параметрам элементов цепи. Возможна постановка задачи в виде определения других параметров при заданных токах в ветвях.

Все методы расчета основаны на законах Кирхгофа. Но использование специфических свойств линейных цепей позволяет значительно упростить расчет цепи.

Основные свойства линейных цепей:

Принцип пропорциональности: В любой линейной электрической цепи при изменении одной из величин (I , U , E , R) ток любой ветви или напряжение на любом участке электрической цепи линейно зависит от тока или напряжения другой ветви.

Следствие: если в цепи один источник с эдс E_k в ветви k , тогда ток в ветви m $I_m = g_{mk} \cdot E_k$. g_{mk} – взаимная проводимость ветвей ($k \neq m$).

Применение: на принципе пропорциональности основан **метод пропорциональных величин**, который применяется для простой цепи с одним источником. Алгоритм расчета:

- выбирается самая дальняя от источника ветвь, ток в которой принимается равным 1А и рассчитывается напряжение на входе цепи $\bar{U}_{вх}$,

- определяется коэффициент пропорциональности $k = U_{вх} / \bar{U}_{вх}$,

- находят фактические токи в ветвях $I_n = k \cdot \bar{I}_n$.

Принцип суперпозиции: токи (напряжения) в линейной цепи, содержащей несколько источников, равны алгебраической сумме токов (напряжений) для такой же цепи с отдельными источниками $I_m = \sum g_{mk} \cdot E_k$.

Применение: метод **контурных токов** позволяет уменьшить число уравнений по законам Кирхгофа, исключив уравнения по I закону, состоит в следующем:

- выбираются в цепи независимые контуры и полагают, что в них текут так называемые (фиктивные) контурные токи,
- составляется и решается система уравнений по второму закону Кирхгофа для контурных токов,
- фактические токи в ветвях находят как алгебраическую сумму контурных токов, проходящих по соответствующим ветвям.
- **метод наложения** применяется в линейной цепи с несколькими источниками, алгоритм расчета:
 - из исходной схемы составляются схемы, содержащие только один источник; при этом остальные источники с эдс закорачиваются накоротко, а ветви с источниками токов разрываются,
 - рассчитываются токи от каждого источника в отдельности,
 - фактические токи в ветвях равны алгебраической сумме токов от отдельных источников $I_k = \sum I_{kn}$, k – номер ветви, n – номер источника.

Принцип компенсации: Любой пассивный участок линейной цепи с известным напряжением может быть замещен источником с такой же эдс $E = U$, а любая ветвь с известным током может быть замещена на источник с тем же током $J = I$.

Применение: если в линейной цепи известны какие-либо токи или напряжения на отдельных участках, то эти элементы можно заменить идеальными источниками, что значительно упрощает расчет схемы.

Принцип взаимности: если эдс E ветви k вызывает ток I_m в ветви m ($I_m = g_{mk} \cdot E$), то та же самая эдс E , включенная в ветвь m вызывает в ветви k ток I_k , равный I_m ($I_k = g_{km} \cdot E$), следовательно взаимные проводимости ветвей $g_{mk} = g_{km}$ равны.

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке электрической цепи используется следующее оборудование:

1) источник постоянного напряжения БП-30 со встроенным электронным вольтметром, расположенным в “Блоке источников постоянного тока”, используемый в исследуемой цепи в качестве источника ЭДС E_1 ;

2) источник постоянного напряжения БП-15 со встроенными электронными вольтметром и амперметром, расположенный в “Блоке источников постоянного тока”, используемый в исследуемой цепи в качестве источника ЭДС E_2 ;

Примечание: при подключении данного источника используются клеммы “плюс” и “земля”.

3) резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве нагрузки в одной из ветвей цепи;

4) переменный резистор сопротивлением 220 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”;

5) резисторы с сопротивлением 30 Ом, расположенные в “Блоке трансформаторов”, используемые в качестве нагрузок в ветвях цепи;

6) резистор сопротивлением 43 Ома, расположенный в “Блоке аналоговых устройств”

7) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”

а) рА – амперметры с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) рV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В;

8) переключатели, расположенные в “Блоке коммутации”

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка стенда к работе.

Соберите электрическую цепь (рис.3.1) из элементов, перечисленных выше.

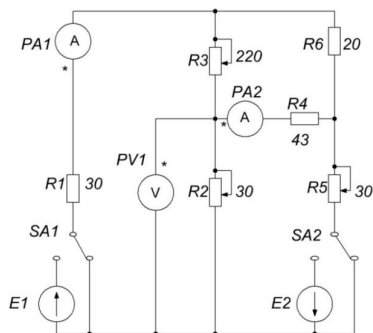


Рис. 3.1. Схема эксперимента.

Вольтметр в схеме рис.3.1 подключен к резистору R2, в эксперименте вольтметр можно подсоединить к любому резистору, указав это на схеме, приводимой в отчете.

4.2. Экспериментальная проверка принципа пропорциональности.

Подключите переключателями SA1 и SA2 оба источника в электрическую цепь и установите заданные значения ЭДС источников в следующих пределах: $E1 \approx 8 \div 10\text{В}$, $E2 \approx 10 \div 15\text{В}$.

Изменяя сопротивление одного из переменных резисторов, зафиксируйте, как изменяются показания приборов.

Повторите подобные измерения, изменяя величину эдс E1.

Результаты занесите в табл.3.1.

По результатам опытов постройте графики $I_1(U_2)$, $I_1(I_4)$, $I_4(U_2)$, $I_4(I_1)$, $U_2(I_1)$ или $U_2(I_4)$. Какие из графиков следует построить персонально каждому студенту задает преподаватель.

Таблица 3.1

Проверка принципа пропорциональности									
Изменение сопротивления в ветви									
$U_2, В$									
$I_1, А$									
$I_4, А$									
Изменение эдс источника									
$E_1, В$									
$U_2, В$									
$I_1, А$									
$I_4, А$									

4.3. Экспериментальная проверка принципа суперпозиции

Установите движки переменных резисторов в средние положения.

Снимите показания приборов в цепи при включенных источниках E_1 и E_2 .

Отключите источник E_2 и запишите показания приборов. Отключите источник E_1 , а источник E_2 включите в цепь, и снова проведите измерения. Данные измерений занесите в табл.2. В последнюю строчку таблицы занесите суммарное значение токов и напряжений от отдельных источников и сравните полученные значения со значениями для схемы с обоими источниками (первая строчка табл.3.2).

Таблица 3.2

Проверка принципа суперпозиции.			
включены источники	$I_1, А$	$I_4, А$	$U_2, В$
E_1, E_2			
E_1			
E_2			
сумма			

Сделайте вывод из сравнения результатов измерения.

4.4. Экспериментальная проверка принципа компенсации

Отключите источник E_2 полностью, а источник E_1 включите в цепь. Схема эксперимента примет вид рис. 2а. Показания приборов занесите в табл.3.3.

Отсоедините вольтметр и резистор R_2 , вместо них подсоедините источник E_2 , установив на нем напряжение, равное измеренному вольтметром (схема рис.3.2б). Проведите измерения остальных приборов.

Подсоедините вольтметр и резистор R_2 обратно, а источник E_2 включите вместо ветви с резистором R_4 и амперметром PA_2 (схема рис.3.2в). Установите на источнике такое напряжение, чтобы его ток был равен исходному схемы рис.3.2а и проведите измерения остальных приборов.

Результаты всех измерений занесите в табл.3.3.

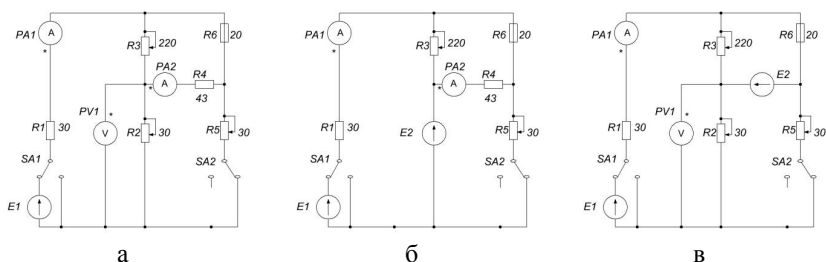


Рис.3.2. Схемы для проверки принципа компенсации

ВНИМАНИЕ: все изменения в схеме следует производить при отключенных источниках. Напряжение источника E_1 во всех опытах должно быть одинаковым. Полярность включения источника E_2 в схемах 3.2б и 3.2в должна соответствовать фактическому направлению тока в заштрихованных ветвях.

Таблица 3. 3

Проверка принципа компенсации

	I_1, A	I_4, A	U_2, B
Исходная схема (рис 3.2а)			
Замещение резистора R2 (рис.3.2б)			-
Замещение ветви с резистором R4 (рис.3.2в)		-	

Сравнить полученные результаты и сделать вывод.

5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- графики по измерениям п.4.2,
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. В схеме рис.3.3 $R_1=2 \text{ Ом}$, $R_2=12 \text{ Ом}$, $R_3=4 \text{ Ом}$, $R_4=6 \text{ Ом}$, $R_5=3 \text{ Ом}$, $U_{ab}=10 \text{ В}$. Используя метод пропорциональных величин, найти токи в ветвях схемы.

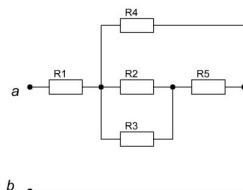


Рис.3.3

Задача 2. В схеме рис.3.4 $R_1=3\text{Ом}$, $R_2=3\text{Ом}$, $R_3=4\text{Ом}$, $R_4=12\text{Ом}$, $R_5=6\text{Ом}$, $R_6=12\text{Ом}$, $U_{ab}=20\text{В}$. Рассчитать токи в ветвях методом пропорциональных величин

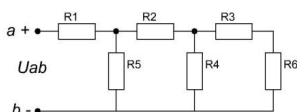


Рис.3.4

Задача 3. Определить токи в ветвях электрической цепи (рис.3.5), используя метод наложения. (R [Ом], E [В]).

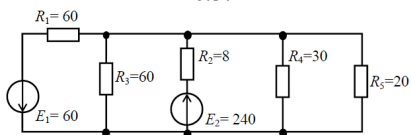


Рис.3.5

Задача 4. Для электрической цепи (рис. 3.6) определить ток в ветви с резистором R_4 методом наложения. Проверить расчет, используя метод эквивалентного генератора. (R [Ом], E [В])

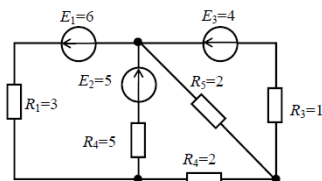


Рис.3.6

Задача 5. Рассчитать все токи в схеме рис.3.7 методом контурных токов. Значения сопротивлений указаны в Омах, а эдс – в Вольтах.

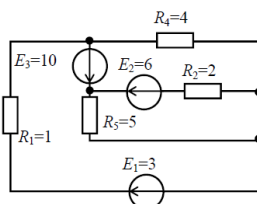


Рис.3.7

Задача 6. Рассчитать все токи в схеме рис.3.8 методом контурных токов. Значения сопротивлений указаны в Омах, а эдс – в Вольтах. Проверить решение, составив баланс мощностей.

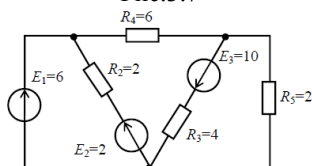


Рис.3.8

Задача 7. Определить, какое напряжение нужно подать на вход схемы рис.3.9, чтобы ток через резистор R_5 был 0.2А. Значения сопротивлений $R_1=150\text{Ом}$, $R_2=100\text{Ом}$, $R_3=40\text{Ом}$, $R_4=100\text{Ом}$, $R_5=60\text{Ом}$, $E_1=10\text{В}$, $E_2=20\text{В}$.

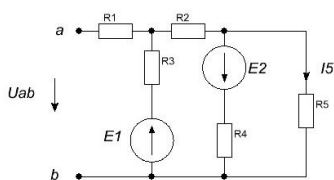


Рис.3.9

Задача 8. Определить показание вольтметра в схеме рис.3.10.

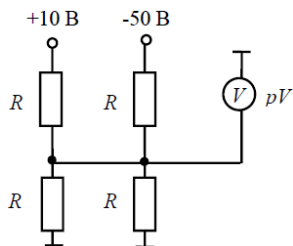


Рис.3.10

Контрольные вопросы

1. Сколько уравнений составляется по первому и по второму законам Кирхгофа?
2. В каком случае следует использовать метод контурных токов?
3. В каких схемах можно применять метод пропорциональных величин?
4. Для предложенной схемы составьте уравнения по методу контурных токов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Исследование неразветвленной цепи переменного тока. Резонанс напряжений

1. Цели и задачи работы.

Цель: исследование режимов работы цепи при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

знать основы расчета электрических цепей переменного тока, основные фазовые соотношения для неразветвленных цепей, а также основные признаки и условия возникновения резонанса напряжений;

уметь выполнять электрические расчеты для последовательных цепей переменного тока, строить векторные диаграммы;

иметь навыки сборки электрических цепей, выбора средств и методов электрических измерений в неразветвленных цепях и обработки результатов эксперимента.

2. Теоретическая часть.

2.1. Последовательное соединение реактивных элементов.

Для последовательного соединения элементов в электрической цепи переменного (синусоидального) тока (рис.4.1) можно написать уравнение по второму закону Кирхгофа

$$U = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \quad (4.1)$$

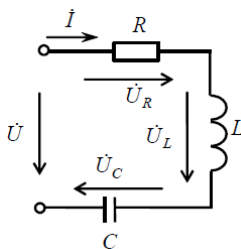


Рис.4.1

или
$$\dot{U} = \dot{I} \cdot R + \dot{I} \cdot jx_L + \dot{I} \cdot (-jx_C) = \dot{I} (R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}) = \dot{I} \cdot \underline{Z}. \quad (4.2)$$

Здесь $\underline{Z} = R + jx = ze^{j\varphi}$ - полное комплексное сопротивление цепи. Модуль комплексного сопротивления

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}, \quad (4.3)$$

аргумент (сдвиг по фазе между током и напряжением)

$$\varphi = \arctg \frac{x_L - x_C}{R}. \quad (4.4)$$

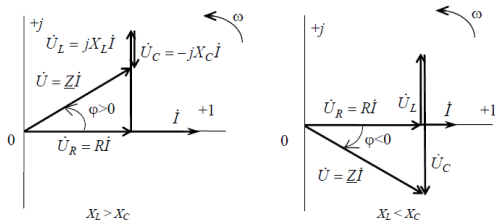


Рис.4.2. Векторные диаграммы для схемы рис.4.1.

Векторные диаграммы тока и напряжений для последовательной цепи строят в соответствии со вторым законом Кирхгофа и учетом фазовых сдвигов напряжений (рис. 4.2). Построение векторной диаграммы при последовательном соединении рекомендуется начинать с вектора тока, поскольку в этой цепи один ток протекает по всем элементам.

Построение векторных диаграмм следует производить в предварительно выбранном масштабе, угол сдвига фаз φ всегда откладывается от тока к напряжению.

2.2. Резонанс напряжений.

Резонансом в электрической цепи, содержащей индуктивные и емкостные элементы, называется такое состояние, при котором напряжение и ток на входе цепи (на каком-либо участке цепи) совпадают по фазе. Различают два вида резонанса – резонанс токов и резонанс напряжений. **Резонанс напряжений** имеет место при последовательном соединении индуктивности и емкости. Условие резонанса напряжений равенство нулю реактивного сопротивления. Для цепи рис.1 резонанс будет иметь место при $x_L - x_C = 0$, или $\omega L = 1/\omega C$. Поскольку полное сопротивление цепи в этом случае – минимально, ток в цепи достигает максимума. Частота $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ называется резонансной. При резонансе напряжений напряжения на

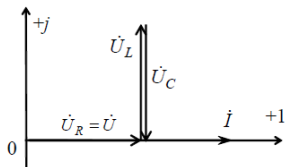


Рис. 4.3. Векторная диаграмма при резонансе напряжений реактивных элементов могут быть существенно больше напряжения на активном сопротивлении и на входе цепи: $U_L = U_C \gg U_R = U_{\text{вх}}$. Векторная диаграмма для схемы рис. 4.1 при резонансе показана на рис. 4.3.

Величина, показывающая во сколько раз напряжение на реактивных сопротивлениях ($U_{L\text{рез}}$ и $U_{C\text{рез}}$) в момент резонанса больше напряжения, приложенного к цепи, называется добротностью контура Q :

$$Q = \frac{U_{L\text{рез}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\sqrt{L}}{R} \cdot \sqrt{C}.$$

Резонанса в подобной электрической цепи можно добиться, изменяя индуктивность катушки, емкость конденсатора или частоту приложенного напряжения. Зависимость параметров цепи от емкости конденсатора показана на рис. 4.4.

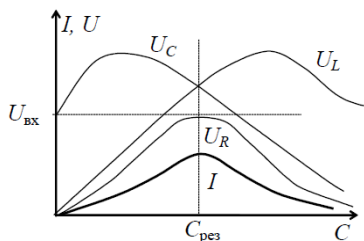


Рис.4.4. Зависимость тока и напряжений для последовательной цепи от емкости конденсатора.

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения ($0 \div 250$ В) со встроенным вольтметром, расположенным в “Блоке включения”;

2) индуктивная катушка с постоянной индуктивностью $L8$, расположенная в “Блоке индуктивностей”, при этом сердечник должен быть полностью разомкнут, для чего, необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора;

3) батарея конденсаторов от $0,5$ до 62 мкФ, расположенная в “Блоке конденсаторов”;

4) резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве резистора $R1$ исследуемой цепи;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

а) рА – амперметр с верхним пределом измерения $2,5$ А;

б) рV1 и рV2 – вольтметры с верхним пределом измерения 250 В;

в) рW – ваттметр с пределами измерений по току ($0,01 \div 1$) А и по напряжению ($5 \div 250$) В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно величину тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз на участке, к которому подключен.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора поверните против часовой стрелки до упора.

4.2. Соберите электрическую цепь (рис. 4.5).

4.3. Установите по указанию преподавателя с помощью автотрансформатора (АТ) напряжение на входе цепи ($U = 15 - 25$) В.

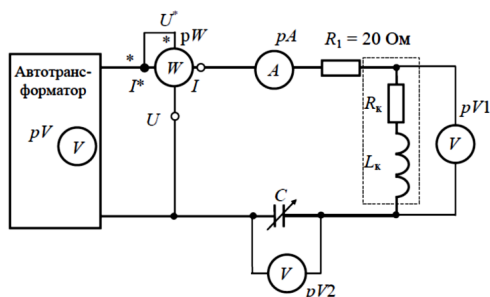


Рис.4.5. Схема эксперимента

4.4. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R), индуктивного (L) и емкостного (C) элементов при различных значениях емкости конденсатора.

Экспериментально определите резонансную емкость $C_{рез}$, используя признаки резонанса (см. п. 2.2).

Произведите измерения I , U_k , U_C , P , ϕ в цепи при различных величинах емкости конденсатора C (три, четыре значения до резонансной емкости, $C_{рез}$ и три-четыре – после резонансной) (всего 7-9 измерений).

Приложенное к входу цепи напряжение $U_{вх}$ необходимо поддерживать постоянным.

Результаты занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исследование электрической цепи при изменении емкости

№	Измерено							Вычислено								
	C мкФ	U _{вх} В	P Вт	I А	U _к В	U _C В	φ град	z Ом	R Ом	x _C Ом	z _к Ом	R _к Ом	x _L Ом	L Гн	S ВА	Q ВАр
1																
.																
.																
.																
.																
9																

Произведите соответствующие вычисления и для трех характерных режимов постройте векторные диаграммы.

4.5. Исследуйте электрическую цепь с последовательным соединением резистивного (R), индуктивного (L) и емкостного (C) элементов при различных значениях индуктивности катушки.

Измените емкость, установив $C < C_{рез}$ по указанию преподавателя. Изменяя индуктивность катушки (многооборотный регулятор индуктивности повернуть по часовой стрелке) добейтесь резонанса напряжения. Сделайте три замера при различных значениях емкости.

Запишите полученные значения в табл.4.2, аналогичную предыдущей.

Произведите вычисления. Для одного из опытов постройте векторную диаграмму.

Таблица 4.2

Получение резонансного режима изменением индуктивности

№	Измерено							Вычислено								
	C мкФ	U _{вх} В	P Вт	I А	U _к В	U _с В	φ град	z Ом	R Ом	x _с Ом	z _к Ом	R _к Ом	x _L Ом	L Гн	S ВА	Q ВАр
1																
2																
3																

Методические указания к обработке результатов эксперимента.

При вычислениях можно воспользоваться следующими формулами:

- емкостное сопротивление конденсатора можно определить по закону Ома $x_C = \frac{U_C}{I}$ или по формуле $x_C = \frac{1}{2\pi fC}$. Частота приложенного напряжения (резонансная частота) $f=50$ Гц.

- активное сопротивление цепи определяется из формулы для активной мощности $P=I^2R$.

- для определения индуктивного сопротивления катушки предварительно определите полное сопротивление катушки по закону Ома $z_K = \frac{U_K}{I}$, а затем индуктивное $x_L = \sqrt{z_K^2 - R_K^2}$, где активное сопротивление катушки $R_K = R - R_1$. Индуктивность катушки находится из формулы $x_L = 2\pi fL$.

- убедитесь, что соотношения между величинами в резонансном режиме выполняются.

Построение векторных диаграмм по уравнению (4.1)

- отложите произвольно вектор тока.
 - выберите масштаб для напряжения.
 - отложите вектор напряжения на резисторе R_1 по направлению тока.
 - прибавьте к нему вектор напряжения на конденсаторе $\dot{U}_C$ под углом 90° к вектору тока $\dot{I}$.

- к полученному вектору следует прибавить вектор напряжения на катушке таким образом, чтобы его конец совпал с концом вектора входного напряжения, построение следует проводить с помощью циркуля (см. рис.4.5).

- транспортиром измерьте угол ϕ между током и напряжением на входе цепи и сравните его с измеренным ваттметром.

Следует построить по три векторных диаграммы (до резонанса, резонансный режим, после резонанса) для каждого эксперимента.

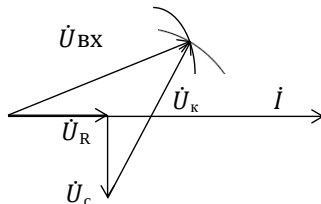


Рис.4.5. Пример построения векторной диаграммы

5. Содержание отчета.

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема эксперимента.
3. Таблицы с измеренными и вычисленными данными.
4. Векторные диаграммы.
5. Графики зависимостей измеренных величин от емкости конденсатора для п. 4.4 и от индуктивности катушки для п. 4.5.
6. Вывод по проделанной работе.

Можно также привести расчетные формулы и промежуточные вычисления.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Заданы параметры элементов электрической цепи (рис. 4.6) и приложенное напряжение $u_{\text{вх}} = 141 \sin 314t$, В.

Определите напряжение на катушке и постройте векторную диаграмму.

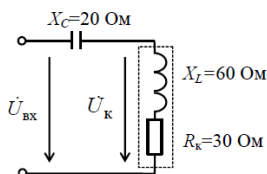


Рис. 4.6

Задача 2. Заданы параметры элементов электрической цепи (рис. 4.7 и входной напряжение $\dot{U}_{\text{вх}} = 50$ В. Определите напряжение $\dot{U}_{ab}$, потребляемые активную и полную мощности, постройте векторную диаграмму.

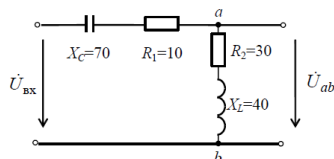


Рис. 4.7

Задача 3. Ток в цепи $i = \sqrt{2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{9} \right)$, А. Сопротивления элементов заданы в Омах (рис. 4.8). Определите, между какими точками в этой цепи будет наблюдаться наибольшее напряжение. Задачу рекомендуется решать с помощью векторной диаграммы тока и напряжений.

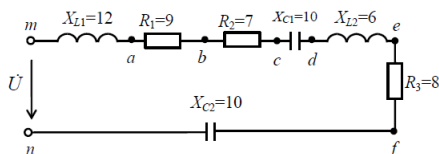


Рис. 4.8

Задача 4. В неразветвленной электрической цепи, содержащей $R = 40 \text{ Ом}$, $X_L = 7 \text{ Ом}$ и $X_C = 10 \text{ Ом}$ (рис. 4.9), к входу приложено напряжение $U = 220 \text{ В}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$.

Определите частоту f_0 , при которой возникает резонанс напряжений, ток I_0 , а также полную комплексную мощность S цепи при резонансе.

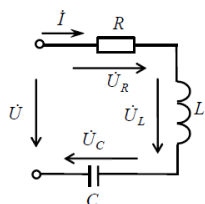


Рис. 4.9

Задача 5. Каким должно быть сопротивление X_C , чтобы при замыкании ключа SA1 (рис. 4.10) показание амперметра не изменилось?

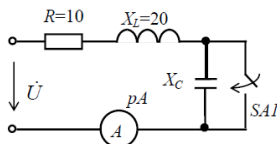


Рис. 4.10

Задача 6. Восстановите по виду векторной диаграммы тока и напряжений (рис. 4.11) электрическую цепь и определите ее параметры.

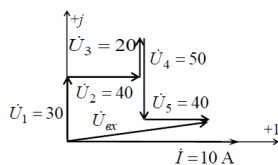


Рис. 4.11

Контрольные вопросы.

1. При каком соотношении индуктивного и емкостного сопротивлений угол сдвига фаз между током и напряжением положительный?
2. Какой знак будет иметь угол сдвига фаз между током и напряжением, если в цепи преобладает индуктивное сопротивление?
3. По каким признакам можно судить о наступлении резонанса напряжений в цепи в процессе эксперимента?
4. В каких цепях возникает резонанс напряжений?
5. Какой физический смысл имеет добротность контура?
6. Как зависят активная P , реактивная Q , полная мощности от параметров последовательного резонансного контура?
7. Приведите примеры использования резонанса напряжений в технике.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Исследование разветвленной электрической цепи синусоидального тока. Резонанс токов

1. Цели и задачи работы.

Цель: теоретическое и экспериментальное изучение разветвленных линейных электрических цепей синусоидального тока с параллельным включением реактивных элементов.

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

знать основы расчета электрических цепей переменного тока, основные фазовые соотношения для разветвленных цепей, а также основные признаки и условия возникновения резонанса токов;

уметь выполнять электрические расчеты для разветвленных цепей переменного тока, строить векторные диаграммы;

овладеть навыками подбора емкости конденсаторов для повышения коэффициента мощности активно-индуктивных приемников.

2. Теоретическая часть.

2.1. Параллельное соединение индуктивного и емкостного элементов

Рассмотрим разветвленную электрическую цепь синусоидального тока с ветвями индуктивного и емкостного характера (рис.5.1).

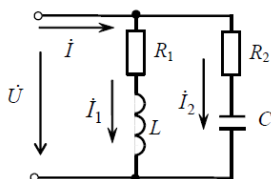


Рис.5.1. Разветвленная цепь с емкостным и индуктивным элементом

Для этой цепи по первому закону Кирхгофа $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$. Токи в вет-
вях

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{z}_1} = \frac{\dot{U}}{R_1 + jx_L} = \frac{R_1 - jx_L}{R_1^2 + x_L^2} \cdot \dot{U} = \left(\frac{R_1}{R_1^2 + x_L^2} - j \frac{x_L}{R_1^2 + x_L^2} \right) \cdot \dot{U} = (g_1 - jb_L) \cdot \dot{U}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{z}_2} = \frac{\dot{U}}{R_2 - jx_C} = \frac{R_2 + jx_C}{R_2^2 + x_C^2} \cdot \dot{U} = \left(\frac{R_2}{R_2^2 + x_C^2} + j \frac{x_C}{R_2^2 + x_C^2} \right) \cdot \dot{U} = (g_2 + jb_C) \cdot \dot{U}$$

Здесь g и b – активные и реактивные проводимости ветвей. Комплексная полная проводимость всей цепи

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}} = (g_1 + g_2) - j(b_L - b_C) = ye^{-j\varphi} \quad (5.1)$$

Ток на неразветвленном участке (на входе цепи)

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \underline{y} \cdot \dot{U} \quad (5.2)$$

На рис.2 показана векторная диаграмма схемы для случая, когда индуктивная проводимость первой ветви меньше емкостной проводимости второй ветви, а вся цепь имеет активно-емкостной характер. На этой диаграмме показаны также активные и реактивные составляющие токов ветвей.

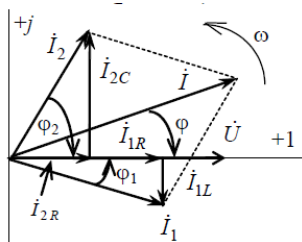


Рис.5.2. Векторная диаграмма для схемы рис.1

Если цепь содержит несколько параллельных ветвей, то ток в каждой ветви можно определить по закону Ома $I_k = \frac{\dot{U}}{z_k}$, ток на входе цепи $I = \sum I_k = \sum y_k \cdot \dot{U}$ – через проводимости ветвей.

2.2. Мощность в цепи синусоидального тока.

Комплексная мощность на любом участке цепи

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = P + jQ = \sum P_k + j \sum Q_k = S \cdot e^{j\varphi} \quad (5.3)$$

Активная и реактивная мощность отдельных приемников вычисляются по общим формулам

$$P_k = I_k^2 \cdot R_k \quad \text{и} \quad Q_k = I_k^2 \cdot x_k = I_k^2 \cdot (x_{Lk} - x_{Ck}). \quad (5.4)$$

Полная мощность

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.5)$$

Очень часто к одному источнику электрической энергии подключены несколько приемников и требуется определить потребляемый системой ток.

Конечно, можно воспользоваться формулой (5.2), но для этого нужно знать сопротивления элементов. В паспортных же данных приемников указываются номинальное напряжение U_n , потребляемая активная мощность P_n и коэффициент мощности $\cos \varphi_n$, характер (емкостной или индуктивный) реактивной нагрузки обычно известен.

Для определения потребляемого системой приемников тока достаточно подсчитать активные и реактивные мощности отдельных приемников, полную мощность всей системы и из формулы (5.5) – потребляемый ток.

2.3. Резонанс токов

Под *резонансом* в электрической цепи понимается такое состояние участка цепи, содержащего индуктивные и емкостные элементы, когда ток и напряжение на участке совпадают по фазе. Резонанс при параллельном соединении емкости и индуктивности называется *резонансом токов*.

рис.5.1

(5.6)

обнаружить резонанс токов по показаниям амперметра.

На рис.5.3 показана векторная диаграмма схемы рис.5.1...

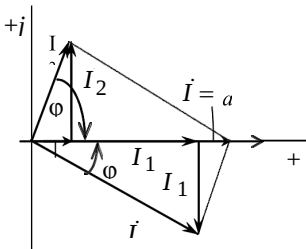


Рис.5.3. Векторная диаграмма при резонансе токов

ка, но и подбором активных сопротивлений.

ток в неразветвленной цепи.

2.4. Повышение коэффициента мощности

ционален коэффициенту мощности приемника $I = \frac{P}{U \cos \varphi}$. При низком значении коэффициента мощности потребляемый ток может быть достаточно большим. Если включить параллельно такому приемнику конденсатор, ток в неразветвленной цепи можно существенно уменьшить. Сам приемник будет по-прежнему работать в номинальном режиме, но уменьшится ток в подводящих проводах, и уменьшатся потери мощности и потери напряжения в проводах. В производственных масштабах это приводит к существенному эффекту.

Повышение $\cos\varphi$ в электроэнергетических системах является важной технико-экономической проблемой. Для повышения коэффициента мощности электроустановок до недавнего времени для предприятий нормировался минимально-допустимый $\cos\varphi$, а в настоящее время устанавливается допустимое значение реактивной мощности и нормируется

$\operatorname{tg}\varphi=Q/P$, определяемый по показаниям счетчиков реактивной и активной энергии.

Основные пути повышения $\cos\varphi$:

а) правильный подбор номинальной мощности асинхронных двигателей для привода рабочих машин и улучшение режимов работы оборудования – стараются избегать работы оборудования на холостом ходу или с недогрузкой, что резко снижает $\cos\varphi$;

б) искусственная компенсация реактивной мощности потребителей с помощью статических конденсаторов и синхронных компенсаторов, здесь повышение $\cos\varphi$ происходит вследствие взаимной компенсации потоков реактивной энергии.

Величину емкости, необходимую для повышения коэффициента мощности цепи (рис. 5.4) до заданного значения $\cos\varphi$, можно определить, воспользовавшись векторной диаграммой (рис. 5.4).

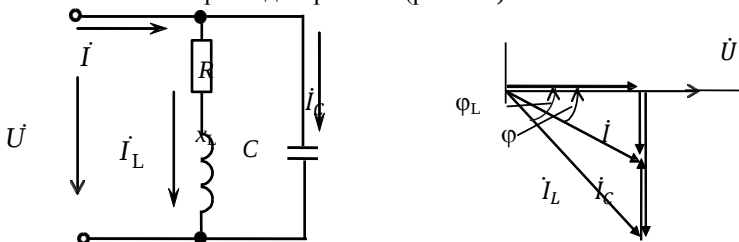


Рис.5.4.Повышение коэффициента мощности.

Из диаграммы видно, что ток через конденсатор равен разности реактивных составляющих тока двигателя и заданного тока в неразветвленной цепи

$$I_C = I_{\text{да}} - I_a = I_{\text{д}} \sin\varphi_{\text{д}} - I \sin\varphi = \frac{P}{U} (\operatorname{tg}\varphi_{\text{д}} - \operatorname{tg}\varphi)$$

С другой стороны ток конденсатора по закону Ома $U_C = U \cdot \omega C$. Следовательно для повышения коэффициента мощности с $\cos\varphi_{\text{д}}$ до заданного значения $\cos\varphi$ для приемника мощностью P требуется включить конденсатор емкостью

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg}\varphi_{\text{д}} - \operatorname{tg}\varphi) \quad (5.7)$$

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения ($0 \div 250$ В) со встроенным вольтметром, расположенным в “Блоке включения”;

2) индуктивная катушка с постоянной индуктивностью L_8 , расположенная в “Блоке индуктивностей”, при этом сердечник должен быть

полностью разомкнут, для чего необходимо многооборотный регулятор индуктивности повернуть против часовой стрелки до упора;

3) батарея конденсаторов от 0,5 до 62 мкФ, расположенная в “Блоке конденсаторов”;

4) резистор с сопротивлением 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”, используемый в качестве резистора R;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

а) pA1, pA2 – амперметры с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) pV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В;

в) pW – ваттметр с пределами измерений по току (0,01 ÷ 1) А и по напряжению (5 ÷ 250) В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно величину тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз на участке, к которому подключен.

4. Порядок выполнения работы

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора поверните против часовой стрелки до упора.

4.1. Исследование электрической цепи с параллельным соединением емкостного и индуктивного элемента.

Соберите электрическую цепь (рис.5.5).

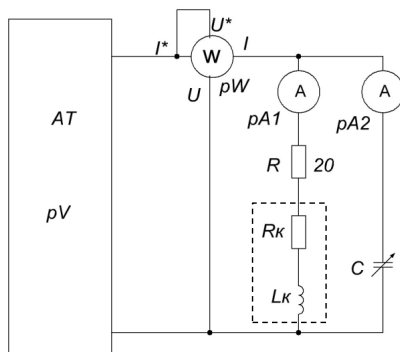


Рис.5.5. Схема эксперимента

Установите с помощью автотрансформатора напряжение на входе цепи 20 ÷ 40 В.

Изменяя емкость батареи конденсаторов, добейтесь резонанса токов в цепи, используя признаки, указанные в п. 2.3.

Проведите измерения токов, мощности, угла сдвига фаз при различных значениях емкости. Шаг изменения емкости вблизи резонанса выби-

ратель небольшой. Входное напряжение $U_{вх}$ при этом необходимо поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в табл.5.1.

Ток в неразветвленном участке цепи, потребляемая мощность и угол сдвига фаз измеряются многофункциональным ваттметром.

Таблица 5.1

Исследование электрической цепи при изменении емкости

№	Измерено							Вычислено							
	C мкФ	$U_{вх}$ В	I А	P Вт	φ град	I_1 А	I_2 А	y См	z_1 Ом	R_1 Ом	R_k Ом	x_L Ом	g_1 См	b_L См	b_C См
1															
.															
.															
9															

Полная проводимость и полное сопротивление ветвей вычисляются по закону Ома.

В эксперименте, как видно из схемы, активная мощность выделяется только в первой ветви и можно написать $P = I_1^2 \cdot R_1 = I_1^2 \cdot (R + R_k)$, откуда находится активное сопротивление всей первой ветви R_1 и собственно катушки R_k .

Проводимости ветвей рассчитываются по общим формулам через сопротивления

$$g = \frac{R}{z^2}, b = \frac{x}{z^2} \quad (5.8)$$

Покажите, что в резонансном режиме выполняются все необходимые соотношения, а именно

$$\begin{aligned} \varphi &= 0 \\ y &= g \\ b_L &= b_C \\ I &= I_{min} \end{aligned}$$

Для трех режимов работы до и после резонанса и в резонансном режиме постройте векторные диаграммы токов. Транспортиром измерьте полученный угол сдвига фаз φ и сравните его с измеренным.

Указания: диаграммы строятся по правилу сложения векторов с помощью циркуля и линейки, начинать построение диаграммы следует с вектора тока второй ветви, так как ток конденсатора опережает по фазе напряжение на 90° .

По результатам измерений табл.1 постройте графики изменения токов в цепи и угла сдвига фаз от емкости конденсатора.

4.2. Повышение коэффициента мощности активно-индуктивного приемника.

Установите произвольное положение катушки L8, конденсатор отключите. Произведите измерения тока, напряжения и мощности, с помощью которых определите параметры катушки – активное R и индуктивное x_L сопротивление и коэффициент мощности $\cos\varphi_k$ катушки.

Рассчитайте емкость конденсатора для повышения коэффициента мощности цепи до значения $\cos\varphi_2$, заданного преподавателем.

Подключите рассчитанную компенсирующую емкость и сравните экспериментально полученное значение коэффициента мощности с заданным. Результаты свести в табл.5.2.

Построить векторную диаграмму.

Таблица 5.2

Повышение коэффициента мощности

	$U, \text{В}$	$P, \text{Вт}$	$I, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$x_L, \text{Ом}$	$C, \text{мкФ}$	$\cos\varphi$
Исходный приемник						-	
Схема с емкостью							

5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- построенные графики и векторные диаграммы,
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Напишите выражение для полной комплексной проводимости цепи (рис.5.6) в алгебраической и экспоненциальной форме. Сопротивления элементов даны в Омах.

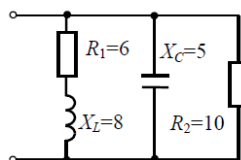


Рис.5.6.

Задача 2. Определите показания амперметров и потребляемый схемой ток (рис.5.7), если напряжение $U=220 \text{ В}$. Постройте векторную диаграмму.

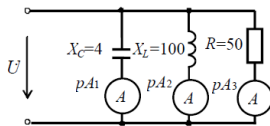


Рис.5.7.

Задача 3. Определить потребляемый ток I и напряжение $\dot{U}_{ab}$. Сопротивления элементов даны в Омах, входное напряжение $\dot{U}_{\text{вх}} = 12\text{В}$. Построить векторную диаграмму.

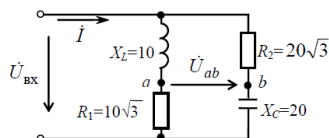


Рис.5.8.

Задача 4. Активно-индуктивная нагрузка с параметрами $R_1=30 \text{ Ом}$ и $x_1= 40 \text{ Ом}$ включена в сеть переменного напряжения 220 В (рис.5.9. Рассчитайте емкость конденсатора для повышения коэффициента мощности до 0.9.

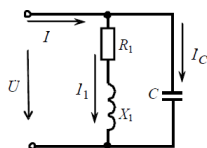


Рис.5.9.

Задача 5. Напишите комплексное выражение для потребляемого схемой (рис.5.10) тока, если напряжение на входе цепи $\dot{U} = 100 \text{ В}$, а сопротивления даны в Омах. Задачу решить символическим методом.

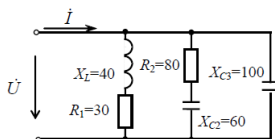


Рис.5.10.

Задача 6. Для схемы рис.5.10 определите потребляемый ток, рассчитав полную мощность.

Задача 7. Определите действующее значение потребляемого двухполюсником тока (рис.5.11), если комплексная проводимость пассивного двухполюсника $\underline{y} = 0,05e^{-j\pi/4} \text{ См}$, а напряжение $u = 141\sin(314t + \pi/4)$.

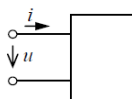


рис.5.11.

Контрольные вопросы

1. Напишите формулы для определения сопротивлений через проводимости.
2. Что называется активной и реактивной составляющими тока?
3. Как отсчитывается угол сдвига фаз между током и напряжением?
4. В цепи параллельно включены две ветви – RC и RL. В каком случае угол сдвига фаз в неразветвленном участке будет положительным?
5. По каким условиям можно определить, что на участке цепи имеет место резонанс токов?
6. Всегда ли при резонансе токов токи в ветвях больше, чем в неразветвленной цепи? Ответ поясните примером.
7. Что называется резонансным контуром?
8. Как нужно включить резонансный контур для выделения сигнала резонансной частоты?
9. Приведите примеры применения резонанса токов.
10. В каких случаях применяют конденсаторы для повышения коэффициента мощности?
11. Почему при расчетах емкости конденсаторов назначают коэффициент мощности порядка 0,9, а не доводят его до 1?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Исследование трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой

1. Цели и задачи работы.

Цель: исследование режимов работы приемников, соединенных звездой в трехфазной электрической цепи, приобретение навыков построения векторных диаграмм трехфазной цепи.

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

знать методы расчета работы приемников, соединенных звездой, в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях;

уметь выполнять электрические расчеты и строить векторные диаграммы для трехфазных цепей при соединении приемников звездой;

получить навыки проведения экспериментов с электротехническими устройствами в трехфазных цепях.

2. Теоретическая часть.

Под **трехфазной системой** понимается электрическая цепь, содержащая три синусоидальных источника, соединенных звездой или треугольником, одной и той же частоты и сдвинутые по фазе. Трехфазная система называется **симметричной**, если ЭДС источников одинаковы, а начальные фазы их сдвинуты на 120° . Трехфазная симметричная система ЭДС реализуется в трехфазных синхронных генераторах при соответствующем соединении обмоток генератора. При прямой последовательности ЭДС $\vec{E}_A$ опережает по фазе $\vec{E}_B$ на $\frac{1}{3}$ периода, а та, в свою очередь, опережает на $\frac{1}{3}$ периода ЭДС $\vec{E}_C$. В противном случае имеем обратную последовательность.

Передача энергии от источника к приемникам производится с помощью трех линейных проводов (трехпроводная цепь), нагрузка к которым подсоединяется либо по схеме звездой, либо треугольником. Если обмотки генератора и приемники соединены звездой, нейтрали генератора и приемников можно соединить проводом, который называется нейтральным (четырепроводная цепь). На рис.6.1 представлены схемы подсоединения приемников к трехпроводной и четырехпроводной трехфазной цепи. Здесь же показаны принятые направления токов и напряжений.

Напряжения между линейными проводами и токи в них называются линейными, а токи и напряжения на нагрузке – фазными.

Для симметричного генератора, обмотки которого соединены звездой, справедливо соотношение между фазными и линейными напряжениями $U_L = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$. Для приемников, соединенных звездой, связь между линейными и фазными напряжениями согласно второму закону Кирхгофа

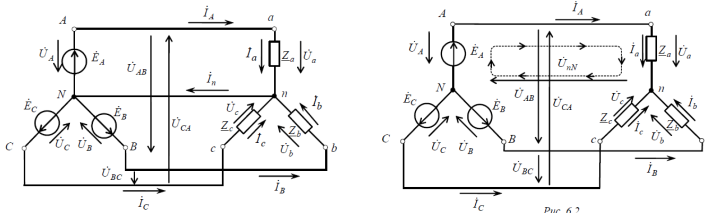


Рис.6.1. Подключение приемников, соединенных звездой, к четырехпроводной и трехпроводной сети.

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a\end{aligned}\quad (6.1)$$

Фазные напряжения приемников

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN} \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}\end{aligned}\quad (6.2)$$

Напряжение между нейтралями находится методом двух узлов

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A Y_a + \dot{U}_B Y_b + \dot{U}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_n} \quad (6.3)$$

Как следует из этой формулы, напряжение между нейтралями будет равно нулю, если есть **нейтральный провод**, сопротивлением которого можно пренебречь ($Y_n \rightarrow \infty$), или при **симметричной** нагрузке, когда сопротивления всех фаз одинаковы $Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi = z_\phi e^{j\varphi_\phi}$. В этих случаях фазные напряжения приемников одинаковы и равны $U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}$ и сдвинуты по фазе на $\frac{1}{3}$ периода.

Фазные токи определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}, \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}, \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} \quad (6.4)$$

Токи в линейных проводах равны соответствующим фазным токам, а ток в нейтральном проводе находится по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (6.5)$$

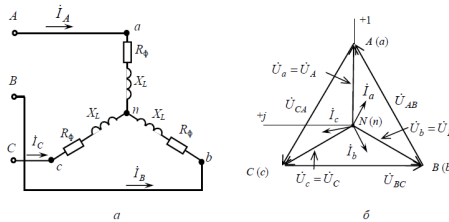


Рис.6.2. Симметричный активно-индуктивный приемник и векторная диаграмма

На рис.6.2 представлена схема и векторная диаграмма для симметричного приемника, включенного звездой и подсоединенного к трехпроводной цепи. Включение нейтрального провода не приведет к изменению электрического состояния цепи.

Векторные диаграммы несимметричного активного приемника, соединенного звездой, подключенного к четырехпроводной и трехпроводной трехфазной цепи показаны на рис.6.3. Фазные токи в случае активной нагрузки совпадают по фазе с соответствующими напряжениями.

Нейтральный провод выравнивает фазные напряжения, а сумма фазных токов (формула 5) дает значение тока в нейтральном проводе. Обрыв нейтрального провода приводит к смещению нейтрали приемника и изменению фазных напряжений таким образом, чтобы сумма фазных токов стала равна нулю.

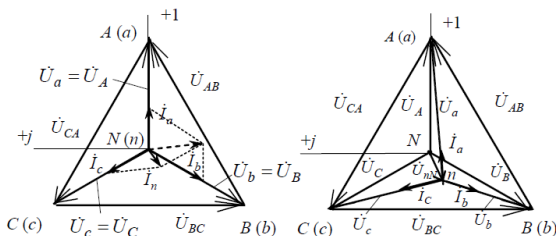


Рис.6.3. Векторные диаграммы для несимметричного активного приемника в трехфазной цепи с нейтральным проводом (слева) и без нейтрального провода(справа)

Мощности трехфазной системы рассчитываются по следующим выражениям:

1) при симметричной нагрузке

активная мощность $P = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi_{\phi}$, Вт ,

реактивная мощность $Q = 3U_{\phi}I_{\phi}\sin\varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi_{\phi}$, ВАр,

полная мощность $S = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_LI_L$, ВА, или $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

2) при несимметричной нагрузке

активная мощность $P = P_a + P_b + P_c$,

реактивная мощность $Q = Q_a + Q_b + Q_c$,

полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) три ламповых реостата, расположенные в “Блоке нагрузок”;

2) индуктивная катушка L6, L7, L8 с параметрами ($L = 0,6$ Гн, $R = 8$ Ом) расположенная в “Блоке индуктивностей”;

3) батарея конденсаторов $0 \div 62,5$ мкФ, расположенная в “Блоке конденсаторов”

4) блок “Контроль токов (I_1 , I_2 , I_3)” для измерения фазных (линейных) токов, расположенный в “Блоке коммутации”;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

а) pA_1 – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А, включается в блок “Контроль токов (I_1 , I_2 , I_3)”, предназначен для измерения фазных (линейных) токов;

б) pA_2 – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А, включается в цепь нейтрального провода;

в) pV_1 – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения фазных напряжений;

г) pV_2 – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения напряжения между нейтралью приемника и генератора;

д) pV_3 – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения линейных напряжений;

б) один из тумблеров, расположенный в “Блоке коммутации”.

4. Порядок выполнения работы

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

Включите тумблеры блоков питания приборов и коммутации.

4.1. Проверка соотношений между линейными и фазными напряжениями генератора.

Включите стенд. Измерьте напряжения источника электрической энергии. Результаты измерений занесите в табл.6.1.

Таблица 6.1

Напряжения генератора

Линейные напряжения			Фазные напряжения		
U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В

Проверьте соотношения между фазными и линейными напряжениями генератора, напр., $U_{AB} = \sqrt{3}U_A$.

4.2. Изучение работы приемников, соединенных звездой, в трехфазной цепи.

Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 6.4. В этой схеме амперметром pA_1 измеряются фазные токи при соответствующем положении переключателя “контроль токов”, одновременно с тока-

ми измеряются фазные напряжения вольтметром pV_1 . Замыкание выключателя SQ подсоединяет нейтральный провод, ток в котором измеряется амперметром pA_2 , размыкание выключателя SQ означает обрыв нейтрального провода, а вольтметр pV_2 в этом режиме измеряет напряжение смещения нейтрали U_{nN} .

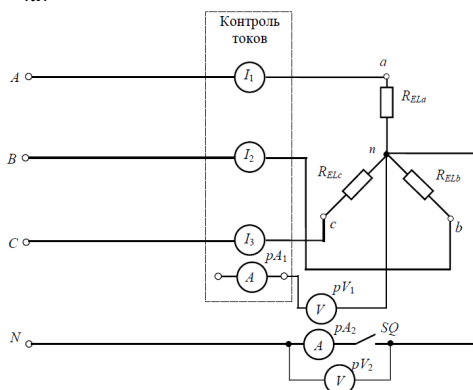


Рис. 6.4. Схема лабораторной работы.

Линейные напряжения измеряют вольтметром pV_3 .

При исследовании чисто активной нагрузки в качестве приемников подключаются ламповые реостаты.

Ламповые реостаты (EL) состоят из четырех ламп накаливания, мощностью 25 Вт. Подключение лампового реостата осуществляется посредством клеммных гнезд и соединительных проводов. Изменение нагрузки лампового реостата осуществляется соответствующим включением определенного количества ламп в параллельную ветвь (рис. 6.5).

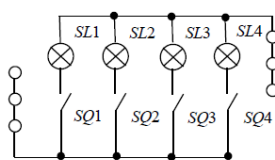


Рис. 6.5.

При исследовании неоднородной нагрузки выбирается один из вариантов табл. 6.2.

Несимметричную активно-реактивную нагрузку составьте, подключив последовательно к лампам из предыдущего опыта катушку и конденсатор.

В качестве активно-индуктивной нагрузки (R-L) при несимметричном режиме рекомендуется использовать индуктивную катушку L6 с па-

раметрами $R_k = 8 \text{ Ом}$ и $L = 0,6 \text{ Гн}$, включаемую последовательно с ламповым реостатом с количеством ламп из предыдущего опыта.

Таблица 6.2

Возможные варианты включения приемников

Режимы	Варианты			
	1	2	3	4
Несимметричная активная нагрузка количество ламп в фазах	1-2-3	2-2-1	3-1-1	3-1-2
Несимметричная активная нагрузка обрыв фазы	b	c	a	b
Короткое замыкание фазы	a	c	b	a
Несимметричная активно- реактивная нагрузка	a - R b R-C c R-L	a R-C b - R c R-L	a R-L b -R c C	a C b R-L c R

В качестве активно-емкостной нагрузки (R-C) рекомендуется использовать последовательно включенные ламповый реостат и конденсатор емкостью 8 - 12 мкФ.

4.2.1. Симметричная активная нагрузка.

В каждую фазу приемника подключите одинаковое количество ламп накаливания.

Замкните ключ SQ и произведите измерения токов и напряжений. результаты измерения занесите в табл.6.3 – схема с нейтральным проводом.

Разомкните ключ SQ – получится схема без нейтрального провода, Произведите подобные измерения.

4.2.2. Несимметричная активная нагрузка.

Включите разное количество ламп в фазы согласно одному из вариантов табл.6.2 и проведите измерения токов и напряжений в схемах с нейтральным проводом и без него. В последующих опытах количество включенных ламп оставьте без изменения.

4.2.3. Обрыв фазы при несимметричной активной нагрузке.

Отключите все лампы в одной из фаз приемника.

4.2.4. Обрыв линейного провода.

Подключите обратно лампы, отключенные в предыдущем опыте.

Отсоедините один из проводов от трехфазного источника согласно варианту табл.6.2.

4.2.5. Короткое замыкание одной из фаз приемника.

Подсоедините обратно линейный провод, ключ SQ разомкните. Одну из фаз приемника закоротите проводником.

Таблица 6.3

Работа приемников, соединенных звездой, в трехфазной цепи

режим	нейтральный провод	U _{ab} В	U _{bc} В	U _{ca} В	U _a В	U _b В	U _c В	I _a А	I _b А	I _c А	U _{nN} В	I _n А
симметричная активная нагрузка	есть											
	нет											
несимметричная активная нагрузка	есть											
	нет											
обрыв фазы	есть											
	нет											
короткое замыкание фазы	нет											
неоднородная нагрузка	есть											
	нет											

4.2.6. Несимметричная активно-реактивная нагрузка.

В фазах приемника согласно варианту табл.6. 2 последовательно с лампами включите конденсатор емкостью порядка 10 мкФ и катушку индуктивности.

Внимание: Изменения в схеме по п. 4.2.4 – 4.2.6 производить при обесточенном стенде.

Результаты всех измерений занесите в табл.6.3.

4.3. Обработка результатов измерений.

Проверьте соотношение $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ между фазными и линейными напряжениями генератора и нагрузки для четырехпроводной цепи.

Для каждого опыта следует построить векторные диаграммы.

При активной нагрузке фазные токи совпадают по фазе с соответствующими напряжениями, поэтому их откладывают по направлению напряжений.

Для построения векторных диаграмм при активно-реактивной нагрузке следует рассчитать углы сдвига фаз φ следующим образом:

по известным значениям емкости конденсаторов и индуктивности катушки находятся реактивные сопротивления $x_c = 1/\omega C$ и $x_L = \omega L$,

полное сопротивление фазы находится по закону Ома $z_{\text{ф}} = U_{\text{ф}}/I_{\text{ф}}$,

угол сдвига фаз $\varphi_{\text{ф}} = \arcsin(x_{\text{ф}}/z_{\text{ф}})$, реактивные сопротивления в фазах

$x_{\text{ф}} = x_L - x_c$.

Результаты расчета можно свести в табл.6.4.

Таблица 6.4

Характеристики активно-реактивной нагрузки

фаза	$z_{\phi}, \text{ Ом}$	$x_{\phi}, \text{ Ом}$	$R_{\phi}, \text{ Ом}$	$\varphi_{\phi}, \text{ град.}$
a				
b				
c				

Порядок построения векторных диаграмм

- выбрать масштабы для изображения векторов тока и напряжения таким образом, чтобы векторные диаграммы получились не слишком мелкими и не слишком крупными,

- построить по трем сторонам треугольник линейных напряжений, в центре треугольника отметить положение нейтрали генератора,

- отложить циркулем с вершин треугольника фазные напряжения, точка пересечения дуг соответствует положению нейтрали приемника, из которой и провести векторы фазных напряжений (см. рис.6.3),

- соединяя нейтральные точки генератора и трехфазного приемника, провести вектор напряжения между нейтральями $\dot{U}_{nN}$, измерить длину вектора и определить величину напряжения, сравнить измеренное на векторной диаграмме значение с измеренным в опыте,

- из нейтральной точки приемника отложить векторы фазных токов; при активной нагрузке вектор тока совпадает по фазе (и направлению) с напряжением, при активно-реактивной нагрузки вектор фазного тока направить под углом к фазному напряжению согласно табл. 6.4.

- сложить векторы фазных токов согласно формуле (6.5) и построить вектор тока нейтрального провода, измерив его длину определить значение и сравнить со значением, измеренным в эксперименте.

5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- векторные диаграммы,
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Трехфазная симметричная активно-индуктивная нагрузка подключена по схеме звездой к трехфазной электрической сети с линейным напряжением 380 . Сопротивления фазы: $R_{\phi} = 2 \text{ Ом}$, $X_{L\phi} = 8 \text{ Ом}$.

Определите токи в фазах. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений. Определите токи в фазах при аварийных режимах:

- а) обрыв фазного провода *a*,
- б) при коротком замыкании фазы *a*.

Задача 2. В четырехпроводную сеть напряжением 380 В включается несимметричная нагрузка $\underline{Z}_a = 30 + j40$ Ом, $\underline{Z}_b = 24 + j18$ Ом, $\underline{Z}_c = 80 - j60$ Ом.

Определите фазные токи и ток в нейтральном проводе. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений.

Задача 3. В четырехпроводную сеть напряжением 220 В включается несимметричная нагрузка с сопротивлением $Z_a = 10$ Ом, $Z_b = j10$ Ом, $Z_c = -j10$ Ом. Определите фазные напряжения приемника при обрыве нейтрального провода, напряжение смещения между нейтральными точками $\dot{U}_{Nn}$. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений.

Задача 4. Трехфазный приемник соединен по схеме "звезда с нейтральным проводом". Фазные токи в приемнике равны соответственно 50, 80 и 20 А и сдвинуты относительно фазных напряжений соответственно на углы - 30, -60 и +60°. Постройте топографическую векторную диаграмму напряжений, покажите на ней векторы токов и определите ток нейтрального провода.

Задача 5. В трехфазную трехпроводную сеть с линейным напряжением 380 В включен асинхронный двигатель с паспортными данными: номинальное напряжение 220/380В, номинальная мощность 3.6кВт, коэффициент полезного действия 0.82, номинальный коэффициент мощности 0.75.

Определить, как соединены обмотки двигателя и потребляемый двигателем ток.

Контрольные вопросы

1. Каким преимуществом обладают трехфазные цепи?
2. В чем достоинства и недостатки способа соединения потребителей звездой?
3. Как определяется соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении потребителей звездой при симметричной нагрузке?
4. Поясните назначение нейтрального провода.
5. Почему в цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранители и выключатели?
6. Как влияет изменение режима работы одной из фаз потребителя, соединенного звездой, на режим работы других фаз?
7. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной системы.
8. Начертите схему фазоуказателя и поясните, как он работает.
9. Почему необходимо знать порядок следования фаз?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

Исследование трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником

1. Цели и задачи работы.

Цель: теоретическое и экспериментальное изучение работы трехфазной цепи при соединении приемников треугольником в симметричном и несимметричном режимах; приобретение навыков построения векторных диаграмм токов и напряжений.

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

знать основы расчета трехфазных цепей, особенности работы трехфазных цепей при соединении приемников треугольником;

уметь выполнять электрические расчеты и строить векторные диаграммы для трехфазных цепей при соединении нагрузки треугольником;

получить навыки проведения экспериментов с электротехническими устройствами в трехфазных цепях.

2. Теоретическая часть.

Соединение приемников треугольником в трехфазной цепи получится, если три однофазных приемника подсоединить к трем линейным проводам, причем каждый приемник подсоединен к своей паре линейных проводов (рис.7.1). Обмотки генератора могут быть соединены как звездой, так и треугольником.

Если пренебречь сопротивлениями линейных проводов, то фазные напряжения приемника будут равны соответствующим линейным напряжениям источника электрической энергии $U_\phi = U_\Delta$, то есть

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}, \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}.$$

Фазные токи определяются по закону Ома

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}, \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}, \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}} \quad (7.1)$$

Линейные и фазные токи связаны первым законом Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} + \dot{I}_{ac} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{ba} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} + \dot{I}_{cb} \end{aligned} \quad (7.2)$$

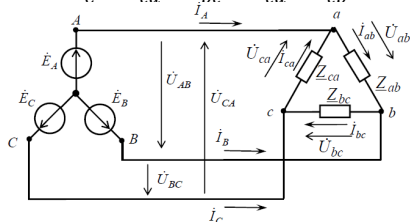


Рис.7.1. Соединение приемников треугольником в трехфазной цепи.

Положительные направления токов и напряжений в такой цепи показаны на рис.7.1.

Нагрузка в трехфазной цепи называется **симметричной** (рис.7.2), если комплексные сопротивления всех фаз приемника одинаковы

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_{\Phi} = Z_{\Phi} e^{j\varphi_{\Phi}}$$

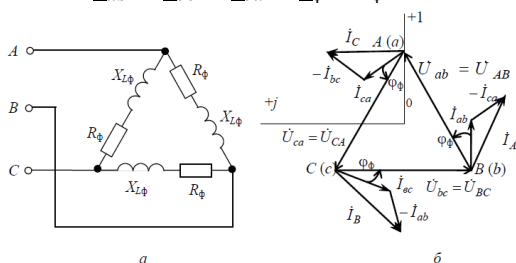


Рис.7.2. Симметричный активно-индуктивный приемник в трехфазной цепи (а) и векторная диаграмма (б).

В этом случае фазные токи одинаковы по величине и сдвинуты от своих фазных напряжений на один угол. Одинаковы по величине и линейные токи, которые связаны с фазными соотношением $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\Phi}$.

При несимметричной нагрузке (рис.7.3) фазные токи определяются по закону Ома – формулы (7.1), а линейные по первому закону Кирхгофа – формулы (7.2).

Независимо от характера нагрузки сумма линейных токов равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (7.3)$$

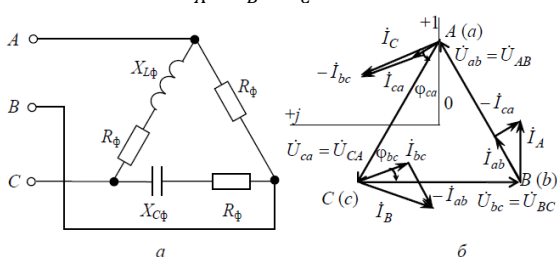


Рис.7.3. Несимметричная нагрузка, включенная треугольником (а) и векторная диаграмма (б).

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз останется неизменным, так как линейные напряжения источника являются постоянными (будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линий, соединенных с этой фазой). То есть, изменение режима работы одной фазы не влияет на работу остальных фаз.

Мощности трехфазной системы рассчитываются по следующим выражениям:

1) при симметричной нагрузке

активная мощность $P = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi_{\phi}$, Вт ,
реактивная мощность $Q = 3U_{\phi}I_{\phi}\sin\varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\sin\varphi_{\phi}$, ВАр,
полная мощность $S = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}$, ВА, или $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

2) при несимметричной нагрузке

активная мощность $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$,
реактивная мощность $Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$,
полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) три ламповых реостата, расположенные в “Блоке нагрузок”;

2) индуктивная катушка L6 с параметрами ($L = 0,6$ Гн, $R = 8$ Ом) расположенная в “Блоке индуктивностей”;

3) блок “Контроль токов (I_1, I_2, I_3)” для измерения линейных токов, расположенный в “Блоке коммутации”;

4) блок “Контроль токов (I_4, I_5, I_6)” для измерения фазных токов, расположенный в “Блоке коммутации”;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

а) рА1 – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А, включается в блок “Контроль токов (I_1, I_2, I_3)”;

б) рА2 – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А, включается в блок “Контроль токов (I_4, I_5, I_6)”;

в) рV – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В для измерения фазных и линейных напряжений.

4. Порядок выполнения работы

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

Включите тумблеры блоков питания приборов и коммутации.

4.1. Изучение работы приемников, соединенных треугольником, в трехфазной цепи.

Соберите электрическую цепь (рис. 7.4), используя ламповые реостаты.

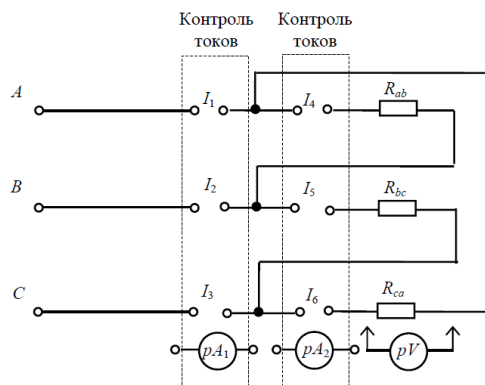


Рис.7.4. Схема лабораторной работы.

Ламповые реостаты (EL) состоят из четырех ламп накаливания, мощностью 25 Вт. Подключение лампового реостата осуществляется посредством клеммных гнезд и соединительных проводов. Изменение нагрузки лампового реостата осуществляется соответствующим включением определенного количества ламп в параллельную ветвь (рис.7.5).

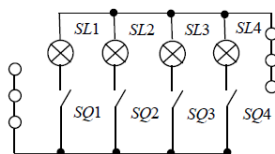


Рис.7.5.

Варианты изменения нагрузки при различных режимах работы цепи задается преподавателем в соответствии с табл. 7.1.

Несимметричную активно-реактивную нагрузку составьте, подключив последовательно к лампам из предыдущего опыта катушку и конденсатор.

Табл.7.1.

Варианты включения приемников				
Режимы	Варианты			
	1	2	3	4
Несимметричная активная нагрузка количество ламп в фазах	1-2-3	2-2-1	3-1-1	3-1-2
Несимметричная активная нагрузка обрыв фазы	ab	bc	ca	ab
Несимметричная активная нагрузка обрыв линейного провода	C	A	C	B
Несимметричная активно-реактивная нагрузка	ab - R bc R-C ca R-L	ab R-C bc - R ca R-L	ab R-L bc -R ca C	ab C bc R-L ca- R

В качестве активно-индуктивной нагрузки (R-L) при несимметричном режиме рекомендуется использовать индуктивную катушку L6 с па-

раметрами $R_k = 8 \text{ Ом}$ и $L = 0,6 \text{ Гн}$, включаемую последовательно с ламповым реостатом с количеством ламп из предыдущего опыта.

В качестве активно-емкостной нагрузки (R-C) рекомендуется использовать последовательно включенные ламповый реостат и конденсатор емкостью 8 - 12 мкФ.

Исследуйте режимы работы трехфазной цепи, указанные в табл. 7.1. Результаты измерений занести в табл. 7.2.

Табл.7.2.

Работа приемников, соединенных треугольником,
в трехфазной цепи

Исследуемые режимы	Измеряемые величины							
	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В	I_{ab} В	I_{bc} В	I_{ca} В	I_A В	I_B В
1. Симметричная активная нагрузка								
2. Несимметричная активная нагрузка								
3. Обрыв фазы при несимметричной активной нагрузке								
4. Обрыв линейного провода при несимметричной активной нагрузке								
5. Несимметричная активно-реактивная нагрузка								

Во всех опытах, начиная со второго, количество включенных ламп в фазах оставьте неизменным.

Измерение напряжений производится одним вольтметром, последовательно подсоединяя его к соответствующему участку цепи.

Измерение фазных и линейных токов производится с помощью коммутаторов “контроль токов”, последовательным переключением переключателей SA1 и SA2 соответственно. При переключении амперметр подключается в соответствующую ветвь. Между положениями переключателей 1 – 2 – 3 имеются нейтральные положения.

При исследовании аварийных режимов в целях безопасности работы следует полностью удалять из цепи “поврежденный” провод.

4.2. Обработка результатов измерений.

1. Проверьте соотношение $I_L = \sqrt{3}I_\phi$ между фазными и линейными токами для симметричной нагрузки.

2. Для построения векторной диаграммы при активно-реактивной нагрузке рассчитайте фазные углы сдвига фаз. Для этого рассчитаете в каждой фазе

- полное сопротивление по закону Ома $z_\phi = U_\phi / I_\phi$

- индуктивное сопротивление катушки $x_L = 2\pi fL$ и емкостное сопротивление конденсатора $x_C = 1/2\pi fC$

- активное сопротивление $R_\phi = \sqrt{z_\phi^2 - (x_{L\phi} - x_{C\phi})^2}$

- угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi_\phi = \arctg \frac{x_{L\phi} - x_{C\phi}}{R_\phi}$$

- проверьте значения активных сопротивлений в фазах, которые в фазах с активной и активно-емкостной нагрузкой равны сопротивлениям ламп (опыт 2), а в фазе с активно-индуктивной нагрузкой $R = R_l + R_k$.

Результаты расчетов можно свести в таблицу.

Табл.7.3

Параметры однофазных приемников

фаза	несимметричная активно-реактивная нагрузка				сопротивления ламп R_l , Ом
	z_ϕ , Ом	x_ϕ , Ом	R_ϕ , Ом	φ_ϕ , град.	
AB					
BC					
CA					

3. Для каждого опыта следует построить векторную диаграмму.

Порядок построения векторных диаграмм

- в произвольном масштабе построить треугольник линейных (фазных) напряжений (см. рис.7.2 и 7.3).

- выбрать масштаб для токов

- отложить векторы фазных токов в соответствии с углами φ_ϕ , при активной нагрузке $\varphi_\phi = 0$, для активно-реактивной нагрузки значения взять из табл. 7.3.

- с помощью циркуля и линейки построить треугольники токов по уравнениям (7.2).

- проверить параллельность одинаковых токов из разных треугольников.

5. Содержание отчета;

– название и цель работы,

– исследуемые схемы,

– таблицы измеренных и вычисленных величин,

– векторные диаграммы,

– выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. К трехфазной сети напряжением 380 В подключены три одинаковых приемника ($R_{\phi} = 3 \text{ Ом}$, $X_{L\phi} = 4 \text{ Ом}$), соединенные треугольником (рис. 7.2).

Определите токи в фазных и линейных проводах и потребляемую мощность (активную, реактивную, полную). Постройте векторную диаграмму токов и напряжений. Рассмотрите аварийные режимы – обрывы фазного и линейных проводов.

Задача 2. В трехфазную сеть напряжением 380 В, частотой $f = 50 \text{ Гц}$ включен трехфазный асинхронный двигатель, обмотки которого соединены треугольником. Активная мощность потребляемая двигателем $P = 1,44 \text{ кВт}$, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,85$.

Определите потребляемый двигателем ток, токи в обмотках двигателя, активное и индуктивное сопротивления, индуктивность катушек, полную и реактивную потребляемые мощности.

Задача 3. К трехпроводной трехфазной линии с напряжением 380 В подключены треугольником три однофазных приемника с параметрами:

$$R_1 = 5 \text{ Ом}, R_2 = 6 \text{ Ом}, X_{L2} = 8 \text{ Ом}, R_3 = 4 \text{ Ом}, X_{C3} = 3 \text{ Ом}.$$

Составьте схему включения. Определите токи в фазах и линейных проводах, активную, реактивную и полную мощности и постройте векторную диаграмму токов и напряжений. Задачу решить символическим методом и построением векторной диаграммы.

Задача 4. К трехфазной сети с линейным напряжением 220 В подключен симметричный приемник с сопротивлением $Z = (20 - j30) \text{ Ом}$ в каждой фазе.

Определите фазные и линейные токи, показание каждого ваттметра и активную мощность, потребляемую всей нагрузкой (рис. 7.6).

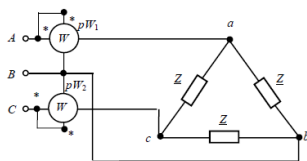


рис.7.6.

Задача 5. К трехфазной сети с напряжением 220 В присоединены треугольником электрические лампы следующей мощности: в фазе ab – 1100 Вт, в фазе bc – 2500 Вт, в фазе са – 500 Вт.

В сети произошел обрыв линейного провода C. Вычислить фазные и линейные токи, полагая сопротивления ламп неизменными.

Задача 6. В трехфазной цепи (рис.7.7) при симметричной нагрузке, амперметром был измерен ток 2 А. Определите фазные и линейные токи, приложенное напряжение, активную, реактивную и полную мощности, потребляемую приемником, если фазное сопротивление $Z_{\phi} = 80 - j60 \text{ Ом}$

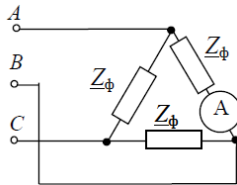


Рис.7.7.

Контрольные вопросы

1. Как определяется соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении потребителей треугольником при симметричной нагрузке?

2. В чем достоинства и недостатки способа соединения потребителей треугольником?

3. Как влияет изменение режима работы одной из фаз потребителя, соединенного треугольником, на режим работы других фаз и на линейные токи?

4. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной системы.

5. Как изменится активная потребляемая мощность симметричного приемника, соединенного треугольником при обрыве одной из фаз?

6. К трехфазной сети подключен электродвигатель, обмотки которого соединены звездой. Для повышения коэффициента мощности цепи подключены конденсаторы, соединенные треугольником. Начертите соответствующую схему и поясните, как подобрать емкость конденсаторов.

7. Приемник соединен треугольником. В фазу ab включен реостат, в фазу bc - катушка (L , R), в фазу ca - конденсатор. Начертите векторную диаграмму напряжений и токов.

8. как изменится режим работы в цепи рис. 7.7, если произойдет короткое замыкание в одной из фаз приемника?

9. Начертите схему включения ваттметров для определения мощности приемника, подключенного к трехпроводной трехфазной цепи.

10. При какой нагрузке схемы рис.7.6 показания ваттметра p_{W1} будут отрицательными?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Исследование переходных процессов в цепи, содержащей индуктивность

1. Цели и задачи работы.

Цель: исследование переходных процессов в активно-индуктивной цепи при включении ее на постоянное напряжение и отключении цепи от источника.

Задачи: в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

получить представление о переходных процессах первого порядка, законах коммутации, законах изменения токов и напряжений в цепях, содержащих один реактивный элемент;

уметь выполнять расчеты переходных процессов в линейных цепях, составлять уравнения для послекоммутационной цепи, определять свободную и вынужденную составляющие и постоянную цепи;

получить навыки проведения экспериментов с использованием электронного осциллографа и обработки осциллограмм.

2. Теоретическая часть.

2.1. Основные понятия переходного процесса.

Процесс изменения состояния электрической цепи от одного режима работы к другому, чем-либо отличающемуся от предыдущего, называется **переходным процессом**. Переходные процессы вызываются **коммутацией** в цепи, т.е. замыканием или размыканием выключателей. Подразумевается, что коммутация осуществляется мгновенно.

При этом изменяется энергетическое состояние цепи. Но энергия никакого элемента измениться мгновенно не может, поэтому сформулированы законы коммутации:

– **первый закон коммутации:** ток в цепи с индуктивностью не может измениться скачком, или ток в ветви с индуктивностью непосредственно перед коммутацией равен току непосредственно после коммутации $i_L(-0) = i_L(+0)$

– **второй закон коммутации:** напряжение на емкости не может изменяться скачком, или напряжение на конденсаторе непосредственно перед коммутацией равно напряжению непосредственно после коммутации $u_C(-0) = u_C(+0)$

В этих формулах момент времени $t=0$ соответствует моменту коммутации.

Таким образом, в электрической цепи не могут изменяться скачком токи в ветвях с индуктивностью и напряжения на конденсаторах. Все остальные токи и напряжения при коммутации изменяться скачком могут, но не обязательно.

Для электрической цепи, содержащей реактивные элементы, система уравнений по законам Кирхгофа получается дифференциальной. Порядок уравнений определяется количеством реактивных элементов. Для решения дифференциальных уравнений необходимо задать начальные условия, т.е. значения токов и напряжений в момент времени $t=0$. Независимые начальные условия (ток в ветви с катушкой и напряжение на конденсаторе) рассчитываются по докоммутационной цепи, а остальные находят для послекоммутационной цепи по законам Кирхгофа. Общее решение переходного процесса представляют в виде суммы **свободной** и **принужденной** составляющих

$$i(t) = i_{св}(t) + i_{пр}(t) \quad (8.1)$$

Принужденная составляющая (частное решение неоднородного дифференциального уравнения) представляет собой установившийся после коммутации закон изменения величины (тока, напряжения), изменяется с той же частотой, что и действующая в цепи эдс, и рассчитывается для послекоммутационной цепи любым удобным способом, например, символическим методом.

Свободная составляющая (полное решение однородного уравнения) содержит постоянные интегрирования, которые находятся из начальных условий и с течением времени затухает $i_{св}(\infty) \rightarrow 0$ в линейных цепях по экспоненциальному закону. Время, в течение которого амплитуда свободной составляющей уменьшается в e раз, называется **постоянной времени цепи**.

2.2. Подключение цепи с индуктивностью к источнику постоянного напряжения

Рассмотрим включение электрической цепи рис.8.1 на постоянное напряжение.

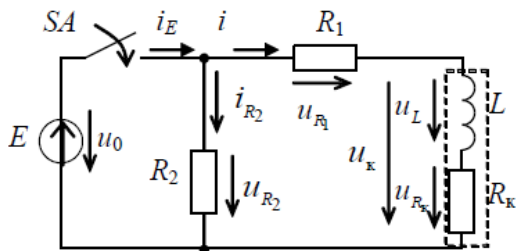


Рис.8.1

До коммутации цепь была обесточена и ток в ветви с катушкой $i(-0)=0$.

Составим систему уравнений для послекоммутационной цепи по законам Кирхгофа

$$\begin{aligned} i_E &= i + i_{R_2} \\ L \frac{di}{dt} + R_1 i + R_k i &= E \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$R_2 i_{R_2} = E$$

Второе уравнение содержит только одну неизвестную – ток $i(t)$, поэтому достаточно решить это уравнение, остальные токи находим по другим уравнениям.

Решение однородного уравнения $L \frac{di}{dt} + R_1 i + R_k i = 0$ дает свободную составляющую

$$i_{св} = Ae^{pt}, \quad (8.3)$$

где $p = -\frac{R_1+R_k}{L}$, а постоянную интегрирования найдем из начальных условий.

Принужденную составляющую для этого тока находим, рассчитывая цепь постоянного тока после замыкания ключа

$$i_{пр} = \frac{E}{R_1+R_k} \quad (8.4)$$

Таким образом, общее решение для тока i

$$i = Ae^{pt} + \frac{E}{R_1+R_k}$$

Осталось найти постоянную интегрирования из начального условия

$$i(0) = A + \frac{E}{R_1+R_k} = 0,$$

откуда $A = -\frac{E}{R_1+R_k}$ и ток в ветви с катушкой при переходном процессе изменяется по закону

$$i(t) = \frac{E}{R_1+R_k} (1 - e^{pt}) = \frac{E}{R_1+R_k} \left(1 - e^{-\frac{R_1+R_k}{L}t} \right) \quad (8.5)$$

Величина $\tau = \frac{L}{R_1+R_k}$ называется постоянной времени цепи, постоянная времени показывает, за какое время амплитуда свободной составляющей уменьшится в e раз. Считается, что переходный процесс заканчивается через время порядка $(3 \div 4)\tau$, когда фактическая амплитуда тока (напряжения) отличается от установившегося значения менее, чем на 5%.

Легко показать, что постоянная времени равна времени достижения принужденного значения величины, если бы ток (напряжение) изменялся с постоянной начальной скоростью. Постоянную времени можно определить графически – для этого необходимо провести касательную к графику тока (напряжения) в начальный момент времени до достижения установившегося значения (см. рис.8.2).

Законы изменения остальных величин можно определить, используя законы Кирхгофа (8.2) или известные формулы. Например,

$$\text{напряжение на резисторе } R_1 \quad u_{R_1}(t) = i(t)R_1 = \frac{E \cdot R_1}{R_1+R_k} \left(1 - e^{-\frac{R_1+R_k}{L}t} \right),$$

$$\text{напряжение на резисторе } R_2 \quad u_{R_2}(t) = E$$

$$\text{напряжение на катушке} \quad u_k(t) = L \frac{di}{dt} + R_k i = E \left[\frac{R_k}{R_1+R_k} + \frac{R_1}{R_1+R_k} e^{-\frac{R_1+R_k}{L}t} \right].$$

Графики изменения этих напряжений показаны в левой части рис.8.2.

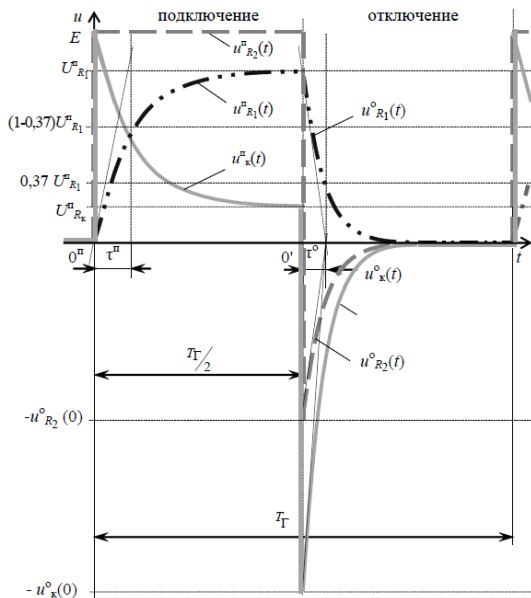


Рис.8.2. Графики изменения напряжений на элементах схемы рис.8.1 при замыкании (левая часть) и размыкании ключа (правая часть)

2.3. Отключение источника постоянного напряжения от цепи с индуктивностью.

В схеме рис.8.1 после замыкания ключа через какое-то время установится режим, при котором ток в ветви с катушкой станет равен $i = \frac{E}{R_1 + R_k}$, см. решение предыдущей задачи. По первому закону коммутации это значение сохранится непосредственно после размыкания ключа. Для новой задачи имеем независимое начальное условие

$$i(-0) = i(+0) = \frac{E}{R_1 + R_k}. \quad (8.6)$$

Принужденная составляющая всех токов и напряжений в цепи без источников энергии будет нулевая.

После размыкания ключа имеем один замкнутый контур, для которого уравнение по второму закону Кирхгофа

$$i(R_k + R_2 + R_1) + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (8.7)$$

Общее решение этого однородного уравнения

$$i_{cb}(t) = B e^{-\frac{R_k + R_2 + R_1}{L} t}, \quad (8.8)$$

а поскольку принужденная составляющая – нулевая, то это и будет решение переходного процесса. Постоянную интегрирования находим из начального условия (8.6) $B = \frac{E}{R_1 + R_k}$.

Таким образом, ток в схеме при размыкании ключа изменяется по закону

$$i(t) = \frac{E}{R_1 + R_k} e^{-\frac{R_k + R_2 + R_1}{L}t} \quad (8.9)$$

Напряжения на элементах схемы

$$\begin{aligned} u_{R_1}(t) &= i(t)R_1 = \frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_k} e^{-\frac{R_k + R_2 + R_1}{L}t} \\ u_{R_2}(t) &= -i(t)R_2 = -\frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_k} e^{-\frac{R_k + R_2 + R_1}{L}t} \\ u_k(t) &= L \frac{di}{dt} + R_k i = -E \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_k} e^{-\frac{R_k + R_2 + R_1}{L}t} \end{aligned}$$

Графики изменения напряжений на элементах схемы рис.8.1 после размыкания ключа также показаны на рис.8.2 – в правой его части. Как видно из последнего выражения, если в схеме $R_2 \gg R_k$, напряжение на катушке сразу после отключения источника может быть гораздо больше, чем напряжение питания.

График изменения тока в ветви с катушкой по форме совпадает с графиком напряжения на резисторе R_2 .

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

- 1) генератор сигналов низкой частоты (ГСНЧ), расположенный в “Блоке цифровых устройств”,
- 2) диод VD12, расположенный в “Блоке аналоговых устройств”,
- 3) катушки индуктивности ($L2$ или $L3$), расположенные в “Блоке индуктивностей”,
- 4) резистор 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”,
- 5) переменный резистор 330 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”,
- 6) электронный осциллограф С1-55,
- 7) мультиметр.

4. Порядок выполнения работы

1. Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда.
2. Включите осциллограф в сеть и включите собственно осциллограф – на экране должна появиться горизонтальная линия. Ручками осциллографа установите яркость и контрастность изображения, а саму линию переместите на середину экрана. Отключите плавное регулирование масштаба, для чего поверните соответствующие ручки до щелчка.

3. Соберите электрическую цепь (рис.8.3) для проведения эксперимента.

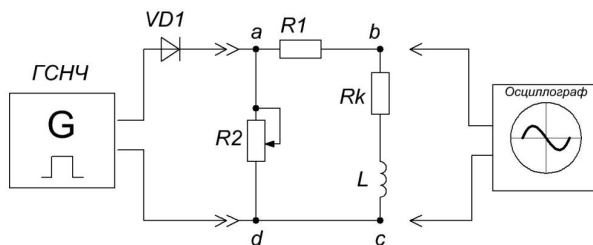


Рис.8.3. Схема проведения эксперимента.

При сборке цепи в качестве узлов **a** и **d** используйте линейки разномножения XS1 и XS2, расположенные в “Блоке аналоговых устройств” или в “Блоке цифровых устройств”.

Ручку переменного резистора R_2 установите в среднее положение и в остальных опытах *не устанавливайте в крайнем положении, чтобы исключить короткое замыкание генератора.*

Перед сборкой цепи следует мультиметром измерить фактические сопротивления резисторов R_1 и R_2 .

4. На генераторе выберите режим “прямоугольные импульсы” и установите частоту в пределах 50÷500 Гц по указанию преподавателя. Амплитуду напряжения установите порядка $E=1.5$ В и оставьте ее неизменной во всех опытах.

5. Снимите осциллограмму напряжения на выходе генератора с включенным последовательно с ним диодом в режиме холостого хода при отключенной нагрузке. Для получения устойчивого изображения используйте ручки “синхронизация” и “уровень”. Выберите масштаб изображения таким образом, чтобы на экране укладывалось 1 – 2 периода сигнала, а амплитуда была не очень большой. Запишите масштаб по амплитуде (В/дел) и длительности (мс/дел) и в дальнейшем без крайней необходимости масштабы не меняйте.

6. Подсоедините нагрузку. Подключите осциллограф к точкам **a** и **d** и снимите осциллограмму напряжения на резисторе R_2 $u_{R_2}(t)$.

7. Подключите осциллограф последовательно к клеммам **a-b** и **b-c** и снимите осциллограммы напряжений на резисторе R_1 $u_{R_1}(t)$ и катушке индуктивности $u_k(t)$. Изображения осциллограмм зарисуйте в масштабе.

8. Установите другое значение сопротивления R_2 , измерьте мультиметром сопротивление, и проведите аналогичные измерения.

9. Не изменяя значения резистора R_2 , установите последовательно с катушкой дополнительную катушку и получите осциллограммы напряжений на элементах.

Таким образом у вас будет три массива осциллограмм при разных значениях сопротивления R_2 и параметрах катушки индуктивности (R_k и L).

10. По результатам опытов следует определить:

- амплитуду и частоту генератора (опыт п.5), длительность положительного импульса (длительность подключения источника) и длительность нулевого сигнала (длительность отключения источника),
- начальные и принужденные составляющие напряжений на элементах схемы при подключении и отключении цепи,
- постоянные времени цепи,
- рассчитать начальные и принужденные составляющие токов ветвей схемы,
- рассчитать значения активного сопротивления и индуктивность катушки.

Результаты обработки осциллограмм занести в табл. 8.1 и 8.2.

Таблица 8.1

Результаты обработки осциллограмм

Нагрузка		подключение						отключение					
		начальная составляющая			принужденная составляющая			начальная составляющая			принужденная составляющая		
		$u_k^n(0)$	$u_{R_1}^n(0)$	$u_{R_2}^n(0)$	u_k^n	$u_{R_1}^n$	$u_{R_2}^n$	$u_k^0(0)$	$u_{R_1}^0(0)$	$u_{R_2}^0(0)$	u_k^0	$u_{R_1}^0$	$u_{R_2}^0$
		В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В
R_2	L												
R_2'	L												
R_2'	L'												

Токи в ветвях схемы рассчитываются по закону Ома по измеренным напряжениям на резисторах R_1 и R_2 , активное сопротивление катушки – через принужденные значения тока и напряжения катушки, индуктивность катушки – через постоянную времени.

11. Напишите аналитические выражения для напряжений и токов в цепи при подключении и отключении от источника.

12. Рассчитайте внутреннее сопротивление источника $R_{вн}$ (генератора с последовательно включенным диодом).

Таблица 8.2

Расчет токов и параметров цепи

		Измерено			Вычислено							
		$R_I =$			подключение				отключение			
		τ^n с	τ^0 с	R_2 Ом	$i^n(0)$ А	$i_{п}^n$ А	$i_{R_2}^n(0)$ А	$i_{R_2}^n$ А	$i^0(0)$ А	$i_{п}^0$ А	R_k Ом	L Гн
R_2	L											
R_2'	L											
R_2'	L'											

5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- осциллограммы напряжений при подключении (положительный полупериод) и отключении (отрицательный полупериод) источника
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- законы изменения токов и напряжений на элементах цепи при переходных процессах,
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Запишите выражения для тока $i(t)$, напряжений на индуктивности $u_L(t)$ и резисторе $u_R(t)$ в цепи рис.8.4 после замыкания ключа SA . Приведите графики изменения этих величин. Определите время завершения переходного процесса, если $E=1\text{В}$, $R_{\text{вн}}=2\text{ Ом}$, $L=100\text{ мГн}$, $R=18\text{ Ом}$.

Задача 2. На рис.8.5 приведены графики изменения тока $i(t)$ и напряжения $u_k(t)$ на катушке индуктивности после подключения к источнику постоянного напряжения.

Запишите выражения для $i(t)$ и $i_k(t)$, определите параметры индуктивной катушки L_k и R_k и параметры источника - эдс E и внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$.

Задача 3. В схеме рис.8.6 эдс источника $E=12\text{В}$, сопротивления $R_1=2\text{ Ом}$, $R_2=200\text{ Ом}$, индуктивность $L=0,2\text{ Гн}$.

Напишите уравнения по законам Кирхгофа после замыкания ключа SA .

Определите значения тока $i(0)$ и напряжений $u_L(0)$, $u_{R1}(0)$, $u_{R2}(0)$ в момент коммутации.

Задача 4. Напишите уравнения по законам Кирхгофа для схемы рис. 8.6 после размыкания ключа.

Определите значения тока $i(0)$ и напряжений $u_L(0)$, $u_{R1}(0)$, $u_{R2}(0)$ в момент коммутации.

Данные возьмите из предыдущей задачи.

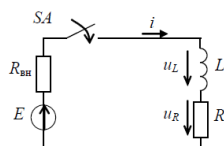


Рис.8.4

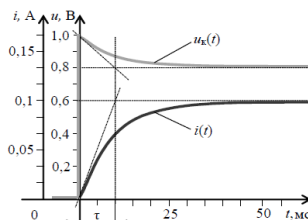


Рис.8.5

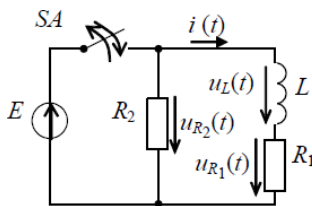


Рис.8.6

Контрольные вопросы

1. Дайте определение переходного процесса.
2. Сформулируйте законы коммутации дайте им объяснение.
3. От чего зависит порядок дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс?
4. Приведите алгоритм расчета переходных процессов.
5. Как определяются начальные условия при расчете переходных процессов?
6. Почему свободная составляющая тока или напряжения при переходном процессе имеет затухающий характер?
7. Каков физический смысл постоянной времени цепи?
8. В течение какого времени переходный процесс заканчивается?
9. Почему при размыкании электрической цепи очень часто наблюдается искра между размыкаемыми контактами?
10. В какой сфере нашло широкое применение явление возникновения больших напряжений на индуктивных элементах при размыкании электрической цепи?
11. Покажите, что за время, равное половине периода генератора в эксперименте, переходный процесс можно считать завершенным.

Список литературы

1. Электротехника и электроника. Лаборатория: учебное пособие/ под ред. И.С.Лукманова; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т: УГА-ТУ, 2013.
2. Иванов И.И. Электротехника: основные положения, примеры и задачи. – СПб.: Лань, 2002.
3. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для неэлектротехн. спец. вузов, рек. МО РФ. – М.: Академия, 2007
4. Новиков Ю.Р. Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа: учеб. пособие для вузов рек. УМО по дисциплине “Электротехника и электроника”. – СПб.: Питер, 2005
5. Немцов М.В. Электротехника и электроника : Учеб. для вузов рек. МО РФ. – М.: Изд-во МЭИ, 2003
6. Рекус Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие рек. МО РФ, - М.: Высш. шк., 2002
7. Электротехника: Учебник для вузов. / Под ред. В.Г. Герасимова. – 4-е изд., стереотипное. – М.: ООО ТИД «Арис», 2010.
8. Электротехника и электроника: учебное пособие/ Р.В.Ахмадеев и др. Уфа: УГАТУ, 2012
9. Электротехника и электроника: Учебник для вузов. В 3 кн. / Под общ.ред. В.Г. Герасимова.– Кн.1: Электрические и магнитные цепи.– М.: ООО ТИД «Арис», 2011.
10. Авдеев А.Н., Николаева О.В., Кузнецов Э.В. Тесты. Электротехника: Учебно-методическое пособие для студентов и преподавателей технических вузов. – М.: Центр тестирования МО РФ, 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Основные правила техники безопасности и проведения работ в электротехнической лаборатории	4
Лабораторная работа 1. Исследование элементов электрической цепи постоянного тока	5
Лабораторная работа 2. Исследование линейной электрической цепи с несколькими источниками	14
Лабораторная работа 3. Исследование свойств линейной электри- ческой цепи	21
Лабораторная работа 4. Исследование неразветвленной цепи пе- ременного тока. Резонанс напряжений.	28
Лабораторная работа 5. Исследование разветвленной электриче- ской цепи синусоидального тока. Резонанс токов	35
Лабораторная работа 6. Исследование трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой	43
Лабораторная работа 7. Исследование трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником	52
Лабораторная работа 8. Исследование переходных процессов в цепи, содержащей индуктивность	60
Список литературы	69

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Авторы-составители:
Мезрин Владимир Васильевич
Зиновьев Виталий Валерьевич

Электротехника и электроника
Лабораторный практикум
Часть I. Электрические цепи

Авторская редакция

Подписано в печать 08.07.21. Формат 60х84 $\frac{1}{16}$.
Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 2,7.
Тираж 30 экз. Заказ № 1347.

Типография
Издательского центра «Удмуртский университет»
426034, Ижевск, Университетская, д. 1, корп. 2
Тел. 68-57-18