

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Максимов В. П., Некрасов М. А.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

*Лабораторный практикум
для студентов направления
«Электроэнергетика и электротехника»*

Южно-Сахалинск
СахГУ
2018

*Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2017 г.*

Рецензенты:

Николаев П. И., доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»,
кандидат технических наук, доцент;

Микаелян Н. В., заведующий топливно-энергетическим
отделением ПТК СахГУ.

М171 **Максимов, В. П. Электроснабжение** : лабораторный практикум для студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» / В. П. Максимов, М. А. Некрасов. – Южно-Сахалинск : СахГУ, 2018. – 68 с.
ISBN 978-5-88811-568-8

Лабораторный практикум по дисциплине «Электроснабжение» соответствует требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Практикум включает описание лабораторных работ и методические указания к их выполнению, домашнее задание, перечень основной и дополнительной литературы, требования охраны труда и электробезопасности.

УДК 621.31
ББК 31.28я73

Учебное издание

МАКСИМОВ Виктор Петрович,
НЕКРАСОВ Максим Александрович

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ
*Лабораторный практикум для студентов направления
«Электроэнергетика и электротехника»*

Корректор: Яковлева В. А.
Верстка: Надточий О. А.

Подписано в печать 17.09.2018. Бумага «Mondi».
Гарнитура «Times New Roman».
Формат 60x84^{1/16}. Тираж 500 экз. (1-й завод 1–100 экз.).
Объем 3,95 усл. п. л. Заказ № 873-17.

Сахалинский государственный университет.
693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.
Тел. (4242) 45-23-16, тел./факс (4242) 45-23-17.
E-mail: izdatelstvo@sakhgu.ru, polygraph@sakhgu.ru

© Максимов В. П., 2018
© Некрасов М. А., 2018
© Сахалинский государственный
университет, 2018

ISBN 978-5-88811-568-8

ВВЕДЕНИЕ 5

**ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ** 6

Общие положения 6
Сборка электрической схемы 7
Выполнение эксперимента 8
Завершение работы и защита отчета 8
Оформление отчета 8
Правила охраны труда и электробезопасности 10

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИИ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ
СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ** 12

Общие сведения 12
Домашнее задание 14
Рабочее задание 14
Обработка результатов эксперимента
(указания к самостоятельной работе) 15
Контрольные вопросы 16

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АКТИВНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ
И РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ** 18

Общие сведения 18
Домашнее задание 21
Рабочее задание 21
Контрольные вопросы 24

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО
СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И РЕЗОНАНСА ТОКОВ** 26

Общие сведения 26
Домашнее задание 29
Рабочее задание 30

Контрольные вопросы	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ЕМКОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНО ПРИЕМНИКАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЦЕПИ	
Общие сведения	35
Домашнее задание	36
Рабочее задание	36
Контрольные вопросы	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ИСТОЧНИКА И ПРИЕМНИКА ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»	
Общие положения	44
Домашнее задание	46
Рабочее задание	46
Контрольные вопросы	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ПРИЕМНИКА ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»	
Общие положения	53
Домашнее задание	55
Рабочее задание	57
Контрольные вопросы	58
ТЕСТ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	61
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	67

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Электроснабжение» носят учебно-исследовательский характер. Назначение таких работ заключается в развитии у студентов умений и навыков в обращении с электротехническими устройствами, электроизмерительной аппаратурой, в освоении методов исследований электроэнергетических процессов, формировании опыта технических измерений.

Лабораторный практикум включает возможность освоения двух уровней сложности содержания, в том числе обработку и анализ измеряемых и расчетных результатов.

Перед выполнением каждой лабораторной работы студенты должны изучить соответствующий раздел учебной литературы, уяснить основные теоретические положения, ознакомиться с методическим руководством к данной работе, описанием лабораторной аппаратуры и исследуемых электрических цепей, с порядком обработки полученных результатов. Началу работ в лаборатории предшествует знакомство с основными организационными положениями и инструктаж по правилам безопасной эксплуатации электроустановок.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Таблица 1

Общие положения

1. Лабораторные работы обязательны для выполнения всеми студентами.

2. Работы производятся учебными бригадами по два-четыре человека. Каждая бригада выполняет за одно занятие не более одной лабораторной работы.

3. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие вводный и первичный инструктажи по охране труда. Все студенты должны иметь первую категорию допуска по электробезопасности.

4. Журналы проведения инструктажей должны быть оформлены надлежащим образом и находиться в лаборатории постоянно.

5. Студенты должны быть теоретически подготовлены к выполнению очередной лабораторной работы, поэтому до начала выполнения лабораторной работы необходимо изучить соответствующие темы конспекта лекций и учебника. В качестве допуска к выполнению конкретной работы возможно проведение преподавателем экспресс-опроса или теста по соответствующей теме.

6. Для оформления результатов проведения лабораторных работ каждый студент должен сделать записи, которые содержат следующую информацию:

- номер работы;
- название лабораторного стенда (макета) и перечень основного используемого оборудования;
- таблицу приведенной ниже формы с паспортными данными электроизмерительных приборов, используемых в процессе экспериментальных исследований (табл. 1);
- эскизы электрических схем;
- экспериментальные данные;
- расчетные данные;
- эскизы графиков и векторных диаграмм (если требуется их построение).

Паспортные данные электроизмерительных приборов

№ п/п	Наименование прибора	Заводской номер	Тип	Система измерения	Класс точности	Пределы измерений	Цена деления	Примечание

Допускается отчеты оформлять в электронном виде с обязательным сохранением на компьютере преподавателя.

7. График и последовательность выполнения лабораторных работ определяются преподавателем.

8. Запрещается без разрешения преподавателя менять оборудование и приборы на стендах.

9. Бесцельные хождения по лаборатории, вход и выход из лаборатории во время работы без разрешения преподавателя не допускаются.

Сборка электрической схемы

1. Перед сборкой электрической цепи по приведенной схеме необходимо выбрать нужные приборы из числа имеющихся на стенде, ознакомиться с ними и записать паспортные данные в рабочую тетрадь. На ваттметрах, имеющих несколько пределов измерения, выбираются и устанавливаются требуемые пределы.

2. При использовании в работе переносных измерительных приборов последние на стенде располагаются так, чтобы электрическая цепь была простой и наглядной, а снятие показаний приборов не требовало лишних и сложных движений от работающего.

3. Во избежание ошибок сборку электрической цепи производят в следующем порядке: сначала в исследуемой схеме собирают главную токовую цепь, начиная с одного зажима источника питания и кончая другим зажимом. Затем по схеме подключают параллельные токовые цепи потребителей и, завершая сборку цепи, производится подключение вспомогательных параллельных ветвей, в частности вольтметры и катушки напряжения ваттметров. Для надежности соединения коммутацию цепей следует осуществлять так, чтобы одной клеммой зажималось не более двух проводников.

4. По окончании сборки члены бригады проверяют электрическую цепь и предъявляют преподавателю или лаборанту для получения раз-

решения на включение. **Без разрешения преподавателя включение цепи под напряжение запрещается.**

5. При обнаружении в процессе сборки цепи неисправностей в приборах или проводах необходимо сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

Выполнение эксперимента

1. Перед снятием какой-либо характеристики необходимо предварительно (без записи показаний приборов) быстро провести опыт, чтобы определить ее границы и интервалы между отдельными замерами. Число точек должно быть достаточным для построения и анализа кривой.

2. Показания приборов во время эксперимента записывают только в рабочей тетради. На основании экспериментальных данных строят соответствующие графики и векторные диаграммы. Результаты эксперимента необходимо проанализировать и сопоставить с теоретическими.

3. Если работа состоит из нескольких опытов, требующих изменения схемы цепи, то после выполнения каждого опыта необходимо убедиться в правильности полученных результатов эксперимента и только после этого получить разрешение преподавателя на выполнение следующего опыта.

Завершение работы и защита отчета

1. После завершения работы отчет по лабораторной работе предъявляется преподавателю для защиты. Защита включает ответы на вопросы преподавателя по содержанию лабораторной работы из предложенного перечня контрольных вопросов. Количество вопросов, их порядок и формулировка определяются преподавателем. По решению преподавателя зачет работы может быть осуществлен с помощью ответов на специально подготовленный тест.

2. Результатом защиты работы является зачет.

3. Отчеты, оформленные, по мнению преподавателя, неудовлетворительно, должны быть исправлены.

4. Разборку цепи производят только с разрешения преподавателя. После разборки цепи все оборудование и провода убирают на свои места хранения и на стенде наводят порядок.

Оформление отчета

1. Отчет о выполненной работе должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель исследования;
- таблицу с паспортными данными электроизмерительных приборов;
- схемы исследуемых электрических цепей;
- таблицы с экспериментальными данными;
- таблицы с расчетными данными;
- формулы, по которым определялись расчетные данные;
- графики и векторные диаграммы;
- основные выводы по работе.

2. Отчеты выполняются рукописно в ученической тетради или на листах бумаги формата А4. Допускается выполнять отчет в электронном виде в редакторе Word с использованием приложений Microsoft Office (например, Excel, Visio, Paint).

3. Графическую часть отчета (схемы, графические зависимости, векторные диаграммы) следует выполнять только на миллиметровой или клетчатой бумаге обязательно с помощью линейки, циркуля и лекала. Выполнение схем и графиков от руки не допускается.

4. При построении экспериментальных и расчетных кривых должно приниматься во внимание следующее:

а) начала осей координат и нулевые значения параметров должны быть совмещены; численные значения параметров, отличные от нулевых, откладываются на осях координат в одном из следующих масштабов: $1 \cdot 10^n$, $2 \cdot 10^n$, $5 \cdot 10^n$, где $n = -2, -1, 0, 1, 2$;

б) если в зависимости от одного параметра, например полезной мощности P_2 , предполагается построение графиков нескольких физических величин, например напряжения U , тока I , потребляемой мощности P_1 , коэффициента полезного действия η , то для большей наглядности изображения численные значения каждой физической величины следует откладывать в индивидуальном масштабе, указываемом на дополнительной оси ординат (рис. 1);

в) численные значения параметров, полученные из опыта или в результате расчета, на оси координат наноситься не должны;

г) в процессе построения графиков значения физических величин, полученные экспериментально или в результате расчетов по экспериментальным данным, в виде точек четко наноситься в координатных осях; по этим точкам проводятся плавные усредненные зависимости (рис. 1);

д) если в одной системе координат строится несколько графиков, то экспериментальные или расчетные значения каждой физической величины рекомендуется отмечать различными значками (рис. 1).

5. Векторные диаграммы строятся с соблюдением следующих требований:

- все векторы строят в определенном масштабе. Масштабы выбирают в соответствии с п. 4, а;

– углы между векторами откладывают по транспортиру.

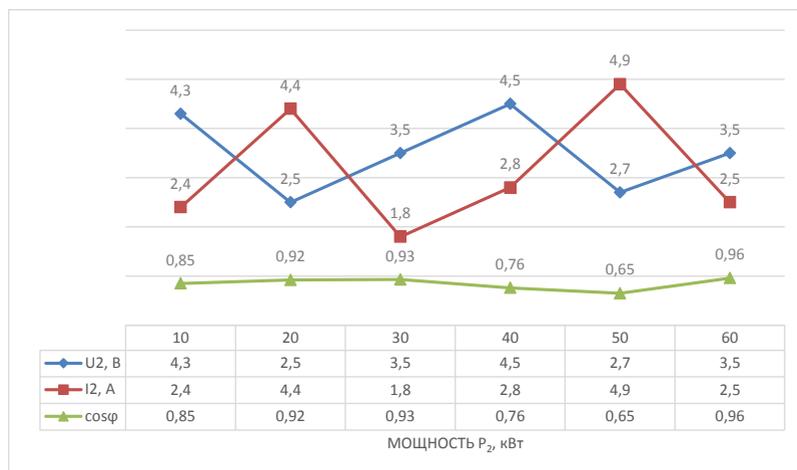


Рис. 1 – Пример оформления графиков

Правила охраны труда и электробезопасности

Следует помнить, что электрические напряжения в лаборатории электрических цепей опасны для жизни. Поэтому во избежание поражения электрическим током необходимо строго соблюдать следующие правила электробезопасности:

1. Запрещается включать под напряжение без проверки и разрешения преподавателя или лаборанта цепь после ее сборки, а также после каких-либо переключений в ней.

2. Не разрешается касаться руками неизолированных частей цепи, когда она находится под напряжением.

3. Всякие переключения и изменения в электрической цепи следует производить только при снятом напряжении.

4. При повреждении во время работы прибора или аппарата, а также при возникновении отклонений от нормального режима работы цепи следует немедленно отключить ее от источника напряжения и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

5. Особую осторожность следует соблюдать при работе с резонансными цепями, содержащими индуктивные катушки и конденсаторы, так как при резонансе напряжения на отдельных участках цепи могут значительно превышать напряжение источника питания.

6. На конденсаторах, включенных в цепь, после отключения их от источника напряжения может остаться заряд. Поэтому после окончания работы все конденсаторы следует разрядить.

7. Нельзя оставлять без присмотра цепь, включенную под напряжение.

8. Не следует загромождать свое рабочее место на стенде вещами, не относящимися к данной работе.

9. Запрещается во время работы загромождать подходы к стендам стульями, скамейками и т. п. Доступ к стендам, включенным под напряжение, должен быть свободен.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ПОМОЩЬЮ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Общие сведения

Цель работы: изучение энергетического процесса и распределения напряжений в схеме замещения двухпроводной линии электропередачи при постоянной величине напряжения в начале линии в зависимости от тока в линии, определяемого количеством включенных потребителей электрической энергии.

Всякий потребитель электрической энергии получает ее от генератора по воздушной или кабельной линии передачи, выполненной из металлического (медного, алюминиевого или стального) провода и обладающей определенным сопротивлением. Это сопротивление обуславливает падение напряжения и потерю мощности в линии.

При изменении числа включенных потребителей электрической энергии изменяется величина тока в линии, что обуславливает изменение падения напряжения и потерь мощности в линии и отражается на работе потребителей.

Для теоретического и экспериментального изучения процессов в двухпроводной линии электропередачи пользуются эквивалентной схемой замещения (рис. 2), где $R_{Л}$ – сопротивление линии; $R_{Н}$ – эквивалентное сопротивление всех подключенных потребителей; I – ток в линии; U_1 – напряжение в начале линии; U_2 – напряжение в конце линии (у потребителя).

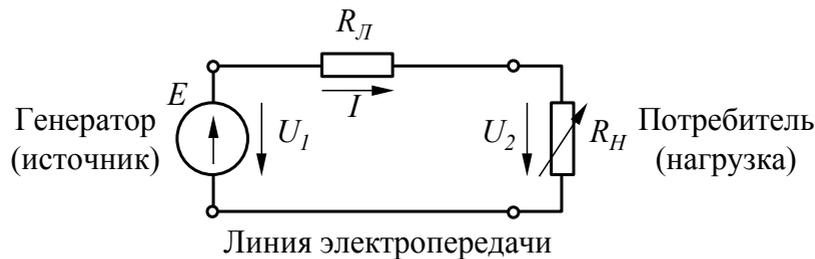


Рис. 2 – Эквивалентная схема замещения

С учетом принятых обозначений:

$$I = \frac{U_1}{R_{Л} + R_{Н}}; \quad (1)$$

$$\Delta U = U_1 - U_2 = I \cdot R_{Л}; \quad (2)$$

$$R_{Л} = \frac{\Delta U}{I}; \quad (3)$$

$$R_{Н} = \frac{U_2}{I}; \quad (4)$$

Энергетический процесс в схеме характеризуется следующим соотношением мощностей:

- мощность, отдаваемая генератором в линию:

$$P_1 = U_1 \cdot I; \quad (5)$$

- мощность потерь электрической энергии в линии:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I = R_{Л} \cdot I^2; \quad (6)$$

- мощность, отдаваемая линией потребителю (мощность нагрузки):

$$P_2 = U_2 \cdot I = R_{Н} \cdot I^2. \quad (7)$$

Коэффициент полезного действия линии η определяется как отношение мощностей P_2 и P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (8)$$

Если в формуле (7) ток выразить через отношение мощности потребителя к напряжению у потребителя и подставить это выражение для тока в формулу (6), то для мощности потерь электрической энергии в линии получается следующее выражение:

$$\Delta P = P_2^2 \cdot \frac{R_{Л}}{U_2^2}. \quad (9)$$

Согласно (9), при постоянной мощности нагрузки P_2 величина потерь в линии обратно пропорциональна квадрату напряжения, то есть электрическую энергию экономично передавать при высоких напряжениях. Однако с ростом напряжения увеличивается стоимость изоляции линии. На практике применяют тем большее напряжение, чем больше передаваемая мощность и дальность передачи.

Заменяв в формуле (8) P_1 и P_2 их выражениями по (5) и (7), получим новую форму записи выражения для расчета коэффициента полезного действия линии:

$$\eta = \frac{U_2}{U_1}. \quad (10)$$

Домашнее задание

1. Изучить теоретический материал по режимам работы электрических цепей.
2. Проработать содержание и порядок выполнения работы, изложенные в разделе «Рабочее задание». В отчете подготовить таблицу 2, а также таблицу 1 паспортных данных приборов (см. п. 5 общих положений).
3. Подготовить ответы на контрольные вопросы к данной работе.

Рабочее задание

1. Работу следует выполнять по схеме, показанной на рисунке 3. В качестве потребителей используются лампы накаливания, включенные параллельно. При увеличении числа включенных ламп их эквивалентное сопротивление будет уменьшаться, а ток в цепи увеличиваться.

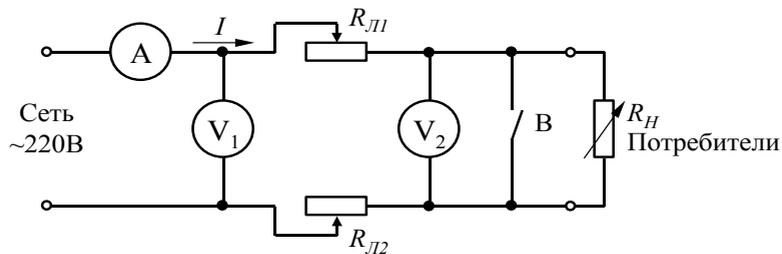


Рис. 3 – Исследование режимов работы линии электропередачи

В качестве аналога линии электропередачи используются два проволочных реостата. Общее сопротивление линии $R_{Л} = R_{Л1} + R_{Л2}$.

Максимальный ток будет при коротком замыкании в конце линии (выключатель B замкнут, напряжение на потребителях и токи в них равны нулю). Ток короткого замыкания:

$$I_{к} = \frac{U_1}{R_{Л}}.$$

Сопротивление $R_{Л}$ нужно установить такой величины (положением движков проволочных реостатов), чтобы ток $I_{к}$ был близок к пределу измерения амперметра и не превышал номинального тока проволочных реостатов.

2. Включить цепь под напряжение и, замкнув выключатель B , измерить ток короткого замыкания $I_{к}$.

3. Изменяя величину тока от нуля до $I_{к}$, снять показания для семи точек. Интервал между точками $\Delta I \approx I_{к}/7$. Показания приборов записать в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты измерений

Измерено			Вычислено						
I	U_1	U_2	ΔU	$R_{Л}$	$R_{ЛСР}$	P_1	P_2	P_H	η
А	В	В	В	Ом	Ом	Вт	Вт	Ом	о.е.

4. По ранее приведенным формулам вычислить для всех режимов (исключая режим холостого хода) ΔU , $R_{Л}$ и занести их в правую часть таблицы 2. Вычислить величину $R_{ЛСР}$ и также занести ее в таблицу 2.

Примечание: работа выполнена правильно, если сопротивление проводов линии $R_{Л}$ в каждом опыте отличается от среднего значения $R_{ЛСР}$ не более чем на 10 %.

Обработка результатов эксперимента (указания к самостоятельной работе)

1. По результатам эксперимента вычислить для всех режимов значения $R_{Л}$, P_1 , P_2 , P_H , η и занести их в таблицу 2. Численное значение коэффициента полезного действия рассчитывается по формуле (10).

2. По данным таблицы 2 построить в **общей системе координат** зависимости $U_1, U_2, \Delta U, P_1, P_2, \eta$ от тока I . Образец для построения графиков приведен на рисунке 1.

3. Проанализировать зависимости $U_1, U_2, \Delta U, P_1, P_2, \eta$ от тока I . При анализе выявить и обосновать области возрастания (убывания) этих величин, установить их экстремумы.

Используя экспериментальные данные, установить, при каком соотношении сопротивлений линии электропередачи $R_{л}$ и нагрузки $R_{н}$ и при каком значении коэффициента полезного действия η мощность нагрузки P_2 является максимальной. Отметить особенности режимов: холостого хода, номинальной работы, короткого замыкания. Выявить рациональные по величинам P_2 и η режимы работы для мощных линий и слаботочных цепей связи, телемеханики и автоматики. Сделать выводы по работе.

4. Студенты по указанию преподавателя дополнительно к изложенному в п. 3 должны получить аналитическую зависимость $P_2 = f(I)$, исследовать ее на максимум и выявить, при каких условиях значение P_2 максимально и какое значение при этом имеет коэффициент полезного действия η . Результаты аналитических исследований сопоставить с экспериментальными данными и сделать соответствующие выводы.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит электрическая цепь?
2. В чем состоит цель расчета электрической цепи и как она достигается?
3. Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа. Расскажите о методике применения их к расчету простых цепей постоянного тока.
4. Расскажите о тепловом действии электрического тока. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца. Запишите и объясните уравнение баланса мощностей в любой электрической цепи.
5. Какой режим электрической цепи называется номинальным и какой рабочим?
6. Почему уменьшается напряжение на зажимах источника при увеличении его нагрузки (тока в цепи)?
7. В чем особенности режимов холостого хода и короткого замыкания электрической цепи? Укажите признаки режимов холостого хода и короткого замыкания.
8. Какой режим электрической цепи является согласованным и где он используется?
9. Что называется внешней характеристикой источника?
10. В чем недостаток круто падающей внешней характеристики источника с точки зрения условий работы приемников?

11. Как изменится напряжение в конце линии электропередачи, если в середине линии произойдет короткое замыкание?

12. Объясните, почему при больших мощностях передача энергии на большие расстояния производится при высоких напряжениях?

13. Укажите величину допустимых потерь напряжения в проводах линии электропередачи.

14. Объясните пути уменьшения потерь напряжения в проводах линии электропередачи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ И РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Общие сведения

Цель работы: исследование влияния величины индуктивности катушки на электрические параметры цепи однофазного синусоидального напряжения, содержащей последовательно соединенные катушки индуктивности и конденсатор. Опытное определение условий возникновения в данной цепи резонанса напряжения.

Цепь с последовательным соединением конденсатора и катушки с подвижным ферромагнитным сердечником изображена на рисунке 4, а схема замещения этой цепи – на рисунке 5.



Рис. 4 – Цепь с последовательным соединением конденсатора и катушки



Рис. 5 – Схема замещения

Для данной цепи справедливы следующие соотношения:

$$x_{LK} = \omega L_K = 2\pi f L_K; \quad x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; \quad x = x_{LK} - x_C; \quad (11)$$

$$z = \sqrt{r_K^2 + x^2}; \quad \varphi_K = \arctg \frac{x_{LK}}{r_K}; \quad \varphi = \arctg \frac{x}{r_K}; \quad I = \frac{U}{z},$$

где U, I – действующие значения напряжения источника питания и тока;
 z – полное сопротивление цепи;

r_K – активное сопротивление катушки, обусловленное активным сопротивлением провода катушки и потерями в стали ферромагнитного сердечника;

x – реактивное сопротивление;

x_{LK} – индуктивное сопротивление катушки;

x_C – емкостное сопротивление конденсатора;

φ_K – угол сдвига фаз между напряжением на катушке и током в ней;

φ – угол сдвига фаз между напряжением источника и током цепи;

f – частота тока источника;

L_K – индуктивность катушки;

C – емкость конденсатора.

Ток отстает по фазе от напряжения при $x_{LK} > x_C$ и опережает по фазе напряжение при $x_{LK} < x_C$.

При равенстве индуктивного x_{LK} и емкостного x_C сопротивлений в цепи возникает резонанс напряжений, который характеризуется следующим:

1. Реактивное сопротивление цепи $x = 0$. Полное ее сопротивление $z = r_K$, то есть имеет минимальную величину.

2. Ток совпадает по фазе с напряжением источника, так как при $x = 0$:

$$\cos \varphi = \frac{r_K}{z} = 1; \quad \varphi = 0.$$

3. Ток имеет максимальную величину, так как сопротивление цепи является минимальным:

$$I = \frac{U}{r_K} = I_{\max}.$$

4. Падение напряжения на активном сопротивлении катушки равно приложенному напряжению, так как при $z = r_K$:

$$r_K \cdot I = z \cdot I = U.$$

5. Напряжения на индуктивности и емкости равны, так как:

$$U_{LK} = x_{LK} \cdot I = x_C \cdot I = U_C.$$

При относительно малом по величине активном сопротивлении катушки ($r_K \ll x_{LK}$, $r_K \ll x_C$) напряжения на индуктивности и на емкости будут превышать напряжение на активном сопротивлении, а следовательно, и напряжение источника. Действительно, при $r_K \ll x_{LK}$ и $x = (x_{LK} - x_C) = 0$:

$$U_{LK} = x_{LK} \cdot I = \frac{x_{LK} \cdot U}{\sqrt{r_K^2 + (x_{LK} - x_C)^2}} = \frac{x_{LK}}{r_K} \cdot U,$$

где $\frac{x_{LK}}{r_K} \gg 1$, т. е. $U_{LK} \gg U$ и аналогично $U_C \gg U$.

Таким образом, напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе напряжений могут значительно превысить напряжение источника, что опасно для изоляции катушки и конденсатора.

6. Энергетический процесс при резонансе напряжений можно рассматривать как наложение двух процессов: необратимого процесса преобразования потребляемой от источника энергии в тепло, выделяемое в активном сопротивлении цепи, и обратимого процесса, представляющего собой колебания энергии внутри цепи: между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора. Первый процесс характеризуется величиной активной мощности $P = r_K \cdot I^2$, а второй – величиной реактивной мощности $Q_{LK} = x_{LK} \cdot I^2 = x_C \cdot I^2 = Q_C$.

Колебаний энергии между источником питания и участком цепи, включающим катушку и конденсатор, не происходит, и поэтому реактивная мощность всей цепи:

$$Q = x \cdot I^2 = 0.$$

Из условий возникновения резонанса $x_{LK} = x_C$ или $\omega L_K = \frac{1}{\omega C}$ следует, что практически резонанс напряжений можно получить изменением:

- индуктивности катушки;
- емкости конденсатора;
- частоты тока.

В данной работе резонанс напряжений получается за счет изменения индуктивности катушки перемещением ее ферромагнитного сердечника.

Домашнее задание

- Изучить теоретический материал по теме лабораторной работы.
- Подготовить ответы на контрольные вопросы.
- Внимательно прочитать методические указания к данной работе. Ознакомиться с электрической схемой проведения работы (рис. 6). Обдумать порядок проведения опыта. Начертить в рабочей тетради таблицу 3.

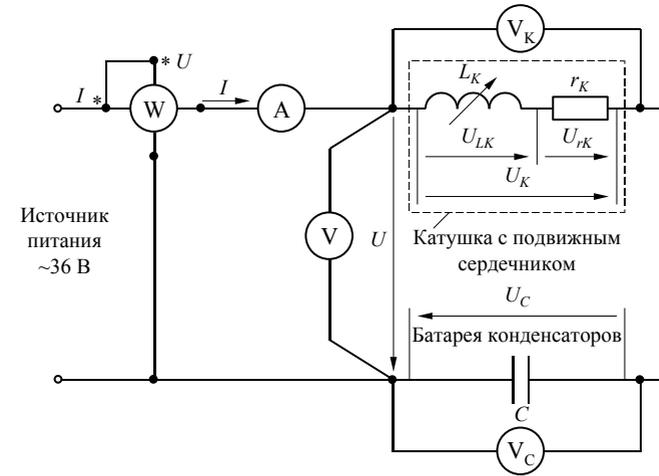


Рис. 6 – Схема проведения работы

Таблица 3

Результаты измерений

Номер опыта	I	P		U	U_K	U_C
	А	кол-во дел	Вт	В		

Рабочее задание

- Работа выполняется по схеме, показанной на рисунке 6. В качестве источника питания используется источник однофазного синусоидального напряжения с действующим значением 36 В. На каждом стенде размещена катушка индуктивности, конструктивно

представляющая собой совокупность трех отдельных катушек и подвижного ферромагнитного сердечника. Начала и концы каждой из трех катушек выведены на клеммную панель. При проведении данной работы для увеличения диапазона изменения величины индуктивности необходимо все три катушки соединить между собой последовательно. В качестве емкости используется установленная на каждом стенде батарея конденсаторов.

2. Процессы в цепи исследуются при постоянной емкости $C = 40 \text{ мкФ}$ и переменной индуктивности. **В начале работы** следует **полностью ввести сердечник в катушки**, что соответствует наибольшему значению индуктивности.

3. Включив цепь под напряжение и постепенно выдвигая сердечник, определить максимальное значение тока I_{max} , после чего установить сердечник в исходное состояние.

4. Медленно выдвигая сердечник, снять показания приборов для трех точек до резонанса, точки резонанса и трех точек после резонанса. Интервал между точками $\Delta I \approx (I_{max} - I)/3$. Точки до резонанса и после резонанса снимать при одних и тех же значениях тока.

Показания приборов занести в таблицу 3.

5. Проверить значение коэффициента мощности цепи в точке резонанса:

$$\cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

Это значение должно быть близко к единице. Если получена величина, существенно отличающаяся от 1, то это означает, что работа или расчет $\cos\varphi$ выполнены неправильно.

6. Вычислить величины, указанные в таблице 4, по формулам:

– полное сопротивление цепи:

$$z = \frac{U}{I};$$

– полное сопротивление катушки:

$$z_K = \frac{U_K}{I};$$

– активное эквивалентное сопротивление катушки, учитывающее потери энергии в обмотке и стальном сердечнике катушки:

$$r_K = \frac{P}{I^2};$$

– индуктивное сопротивление катушки:

$$x_{LK} = \sqrt{z_K^2 - r_K^2};$$

– индуктивность катушки:

$$L_K = \frac{x_{LK}}{\omega},$$

где $\omega = 2\pi f$ и частота $f = 50 \text{ Гц}$;

– активная составляющая напряжения на катушке:

$$U_{rK} = r_K \cdot I;$$

– индуктивная составляющая напряжения на катушке:

$$U_{LK} = x_{LK} \cdot I;$$

– емкостное сопротивление:

$$x_C = \frac{U_C}{I};$$

– емкость конденсатора (для проверки):

$$C = \frac{1}{\omega \cdot x_C}.$$

Таблица 4

Результаты расчетов

Номер опыта	Z	Z _K	r _K	x _{LK}	L _K	U _{rK}	U _{LK}	x _C	C	cosφ
	Ом				Гн	В	Ом	мкФ	о. е.	

7. Построить в общей системе координат зависимости I , U_K , U_C , $\cos\varphi$, z как функции L_K . Используя данные опыта и расчета, построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и тока при: а) $x_{LK} > x_C$ б) $x_{LK} = x_C$ в) $x_{LK} < x_C$.

8. Проанализировать кривые I , U_K , U_C , $\cos\varphi$, z как функции от L_K и написать выводы по работе. Выводы должны отражать основную суть физических процессов в цепи переменного тока с последовательным соединением разных по характеру элементов; содержать анализ вида кри-

вых ($I, U_K, U_C, \cos\varphi, z = f(L_K)$) и оценку значений указанных величин при резонансе напряжений.

9. Студенты по указанию преподавателя проводят углубленные экспериментальные и теоретические исследования режима резонанса напряжений.

Для этого следует использовать вольтметры V_K, V_C и амперметр A более высокого класса точности. Измерения в **околорезонансной области** (до и после точки резонанса) проводить более тщательно: по три-четыре дополнительных опыта в дорезонансной и послерезонансной областях. Четко зафиксировать максимумы напряжений U_{Kmax}, U_{Cmax} , и тока I_{max} при резонансе.

Используя опытные данные, показать, что максимум U_{Cmax} достигается при $L_K < L_{Kp}$, а максимум U_{Kmax} – при $L_K > L_{Kp}$, где L_{Kp} – индуктивность катушки для точки резонанса напряжений.

Величину L_{Kp} определяют из формулы:

$$L_{Kp} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}$$

и сравнивают со значением L_{Kp} , полученным из графиков, согласно п. 6.

Контрольные вопросы

1. В чем основные различия физических явлений в цепях переменного и постоянного тока?
2. Чем физически объясняется отставание тока в цепи индуктивной катушки от напряжения, приложенного к ее зажимам?
3. Чем объяснить опережение тока в цепи конденсатора относительно напряжения, приложенного к его обкладкам?
4. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.
5. В какой цепи и при каком условии наступает резонанс напряжений? Объясните энергетические процессы, протекающие в электрической цепи при резонансе напряжений.
6. Объясните, почему при резонансе напряжений ток в цепи максимален.
7. Как изменится резонансная частота в цепи с последовательным соединением r, L, C , если емкость увеличить в четыре раза?
8. На каком участке цепи (рис. 7) напряжение при резонансе равно напряжению источника питания?

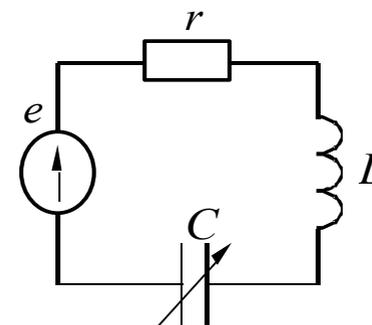


Рис. 7

9. Как изменится ток (увеличится, уменьшится, останется без изменения) в цепи, показанной на рисунке 8, при замыкании выключателя B , если $x_c = 2x_L$.

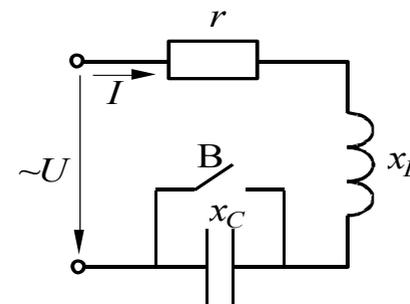


Рис. 8

10. Оцените величину коэффициента мощности при резонансе напряжений по сравнению с коэффициентом мощности до резонанса.
11. Каким электроизмерительным прибором можно определить состояние резонанса в неразветвленной цепи, если настройка в резонанс ведется при неизменном действующем значении входного напряжения?
12. К каким аварийным последствиям может привести резонанс напряжений в электрических цепях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Общие сведения

Цель работы: изучение процессов в электрической цепи с параллельным соединением приемников, содержащих индуктивные и емкостные элементы, при различном соотношении их параметров. Опытное определение условий достижения в данной цепи явления резонанса токов.

На рисунке 9 представлена электрическая цепь однофазного синусоидального напряжения с параллельным соединением двух приемников, один из которых на схеме замещен последовательным соединением резистора и емкостного элемента, а второй – последовательным соединением резистора и индуктивного элемента. Токи в приемниках определяются по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{z_1}; I_2 = \frac{U}{z_2}.$$

где U – действующее значение напряжения источника электрической энергии;

r_1, x_{C1}, z_1 – активное, емкостное и полное сопротивления первого приемника;

r_2, x_{L2}, z_2 – активное, индуктивное и полное сопротивления второго приемника;

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{C1}^2}, z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}.$$

Вектор тока источника электрической энергии равен сумме векторов токов приемников:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2.$$

Векторная диаграмма напряжения и токов для рассматриваемой схемы приведена на рисунке 10.

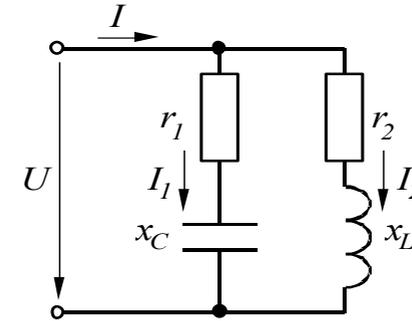


Рис. 9 – Цепь с параллельным соединением двух приемников

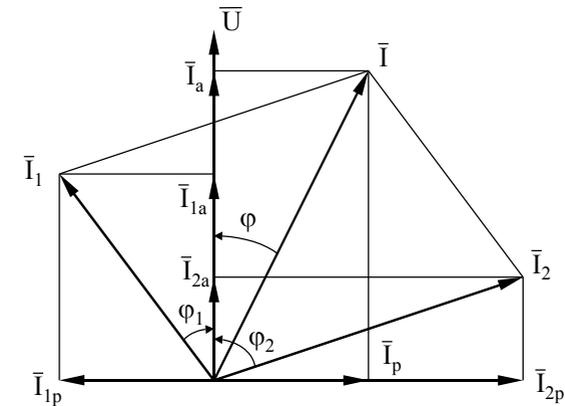


Рис. 10 – Векторная диаграмма напряжения и токов

Энергетические процессы в электрической цепи характеризуются величинами активной P , реактивной Q и полной S мощности, а также коэффициентом мощности $\cos\varphi$.

Для первого приемника:

$$P_1 = r_1 \cdot I_1^2, Q_{C1} = x_{C1} \cdot I_1^2, S_1 = U \cdot I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_{C1}^2},$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{r_1}{z_1}.$$

Для второго приемника:

$$P_2 = r_2 \cdot I_2^2, Q_{L2} = x_{L2} \cdot I_2^2, S_2 = U \cdot I_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_{L2}^2},$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{r_2}{z_2}.$$

Для двух приемников:

$$P = P_1 + P_2, Q = Q_{L2} - Q_{C1}, S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

В соответствии с балансом активной и реактивной мощностей под $P, Q, S, \cos \varphi$ следует понимать также активную, реактивную и полную мощности источника электрической энергии и его коэффициент мощности.

При исследовании процессов в цепях с параллельным соединением приемников вектор тока в каждой ветви условно представляют в виде суммы векторов активной и реактивной составляющих тока. Вектор активной составляющей тока \bar{I}_a совпадает по направлению с вектором напряжения \bar{U} , а вектор реактивной составляющей \bar{I}_p перпендикулярен этому вектору.

Величины активной и реактивной составляющих токов приемников (см. рис. 10):

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1;$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2;$$

где φ_1 и φ_2 – углы сдвига фаз между вектором напряжения \bar{U} и векторами токов \bar{I}_1 и \bar{I}_2 .

Представление токов активными и реактивными составляющими позволяет путем их сложения найти активную I_a и реактивную I_p составляющие тока источника и по ним определить ток источника I .

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{1a} + \bar{I}_{2a}; \bar{I}_p = \bar{I}_{1p} + \bar{I}_{2p}; \bar{I} = \bar{I}_a + \bar{I}_p.$$

Из векторной диаграммы (рис. 10), следует:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a}; I_p = I_{2p} - I_{1p}; I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Косинус угла сдвига фаз между вектором тока источника \bar{I} и вектором напряжения источника \bar{U} определяется из выражения:

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}.$$

В электрических цепях с *параллельным* соединением приемников, содержащих индуктивные и емкостные элементы, может при определенных условиях возникать явление резонанса токов.

Резонансом токов называется режим, при котором ток источника электрической энергии совпадает по фазе с напряжением источника, то есть $\varphi = 0$. Следовательно, условием резонанса токов является равенство нулю реактивной мощности цепи и реактивной составляющей тока источника электрической энергии.

Применительно к электрической цепи, изображенной на рисунке 9:

$$Q = Q_{L2} - Q_{C1} = S \cdot \sin \varphi = 0; I_p = I_{2p} - I_{1p} = I \cdot \sin \varphi = 0.$$

Из условия резонанса токов следует, что:

$$Q_{C1} = Q_{L2}; I_{1p} = I_{2p}.$$

При резонансе токов коэффициент мощности цепи:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} = 1.$$

Ток в ветви с источником электрической энергии содержит только активную составляющую, является минимальным по величине и может оказаться значительно меньше токов в каждом из параллельно включенных приемников:

$$I = I_{1a} + I_{2a} = I_a = I_{min}.$$

Домашнее задание

1. Проработать теоретический материал по теме лабораторной работы.
2. Изучить порядок проведения работы и начертить в рабочей тетради таблицу 5.

Рабочее задание

1. Собрать электрическую цепь, изображенную на рисунке 11. В первую ветвь включаются последовательно одна секция лампового релюста с сопротивлением r_1 и батарея конденсаторов с емкостным сопротивлением x_{C1} . Во вторую – катушка индуктивности с подвижным ферромагнитным сердечником и последовательным соединением всех трех обмоток, ее образующих. Катушка в целом обладает активным r_2 и индуктивным x_{L2} сопротивлениями. Ветви соединены параллельно и подключены к источнику электрической энергии с действующим значением напряжения U , равным 220 В (данное напряжение берется с зажимов А и В или В и С, или А и С трехфазного источника электрической энергии).

2. Записать паспортные данные электроизмерительных приборов.
3. Ферромагнитный сердечник катушки установить в положение, при котором ее индуктивность будет наибольшей по величине.

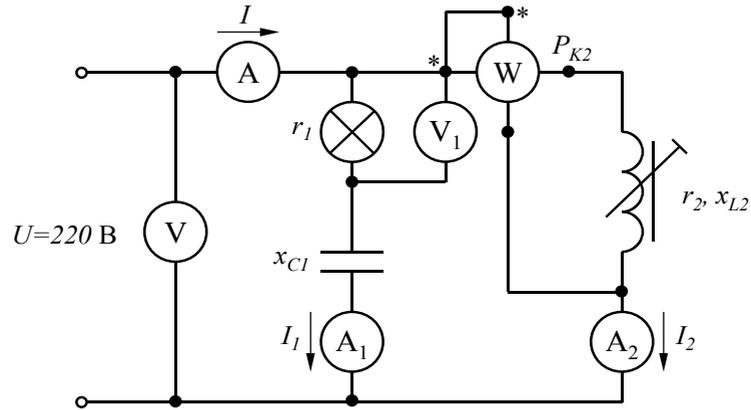


Рис. 11 – Электрическая цепь эксперимента

4. Включить схему под напряжение и исследовать влияние величины индуктивности катушки на параметры цепи, измеряемые приборами. Для этого, выдвигая сердечник, то есть уменьшая величину индуктивности, сделать семь опытов, три из которых соответствуют области до резонанса, один – в околорезонансной области с минимальным значением тока источника электрической энергии, три – в области после резонанса. Данные, полученные при проведении опытов, занести в таблицу 5.

Таблица 5

Результаты измерений

Номер опыта	U	U_1	I	I_1	I_2	P_{K2}	
	В		А			кол-во дел.	Вт

5. По результатам опытов вычислить величины, входящие в таблицу 6. Формулы для расчета:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1; S_1 = U \cdot I_1; Q_{C1} = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}; \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1};$$

$$S_2 = U \cdot I_2; Q_{L2} = \sqrt{S_2^2 - P_{K2}^2}; \cos \varphi_2 = \frac{P_{K2}}{S_2}; x_{L2} = \frac{Q_{L2}}{I_2^2};$$

$$P = P_1 + P_{K2}; S = U \cdot I; \cos \varphi = \frac{P}{S}; L = \frac{x_{L2}}{2\pi f}.$$

Таблица 6

Результаты расчетов

Номер опыта	P_1	S_1	Q_{C1}	$\cos \varphi_1$	S_2	Q_{L2}	$\cos \varphi_2$	x_{L2}	P	S	$\cos \varphi$	L
	Вт	ВА	ВАр	о. е.	ВА	ВАр	о. е.	Ом	Вт	ВА	о. е.	Гн

6. Используя данные таблицы 5 и таблицы 6, рассчитать активные и реактивные составляющие токов всех ветвей.

Расчетные формулы:

$$I_{1a} = I_1 \cdot \cos \varphi_1; I_{1p} = I_1 \cdot \sin \varphi_1; I_{2a} = I_2 \cdot \cos \varphi_2; I_{2p} = I_2 \cdot \sin \varphi_2;$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = I_{1a} + I_{2a}; I_p = I \cdot \sin \varphi = I_{2p} - I_{1p}$$

Данные расчета занести в таблицу 7. В эту же таблицу перенести численные значения индуктивности из таблицы 6.

Таблица 7

Расчетные данные							
Номер опыта	L	I_{1a}	I_{1p}	I_{2a}	I_{2p}	I_a	I_p
	Гн	А					

7. Построить в общей системе координат зависимости $I, I_1, I_2, \cos\varphi$ как функции от L .

8. Построить в масштабе три векторные диаграммы, одна из которых соответствует условию $I_{1p} < I_{2p}$, вторая $I_{1p} = I_{2p}$, третья $I_{1p} > I_{2p}$. На каждой диаграмме должны быть изображены векторы напряжения U , токов $I, I_1, I_2, I_a, I_p, I_{1a}, I_{1p}, I_{2a}, I_{2p}$, а также углы $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$, значения которых рассчитываются через косинусы этих углов посредством отыскания функции \arccos .

9. Проанализировать полученные зависимости и векторные диаграммы и сделать выводы по работе, которые должны отражать особенности физических процессов в цепи с параллельным соединением ветвей, содержащих индуктивные и емкостные элементы.

10. Студенты по указанию преподавателя дополнительно к п. п. 1–9 по данным таблиц 5, 6, взятым для опытов 2, 4, 6, рассчитывают активные, реактивные и полные проводимости отдельных ветвей, активную, реактивную и полную проводимость параллельного соединения, через которые определяют величины эквивалентных активного, индуктивно-емкостного и полного сопротивлений параллельного соединения.

Формулы для расчета:

$$r_1 = \frac{U_1}{I_1}; z_1 = \frac{U}{I_1}; g_1 = \frac{r_1}{z_1^2}; b_{C1} = \frac{\sqrt{z_1^2 - r_1^2}}{z_1^2};$$

$$r_2 = \frac{P_{K2}}{I_2^2}; z_2 = \frac{U}{I_2}; g_2 = \frac{r_2}{z_2^2}; b_{L2} = \frac{x_{L2}}{z_2^2};$$

$$g_{\Sigma} = g_1 + g_2; b_{\Sigma} = b_{L2} - b_{C1}; y_{\Sigma} = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2}; z_{\Sigma} = \frac{1}{y_{\Sigma}};$$

$$r_{\Sigma} = g_{\Sigma} \cdot z_{\Sigma}^2; x_{L\Sigma} = x_{L2} \cdot z_{\Sigma}^2; x_{C\Sigma} = x_{C1} \cdot z_{\Sigma}^2; x_{\Sigma} = x_{L\Sigma} - x_{C\Sigma}.$$

Данные расчета заносятся в таблицу 8.

Таблица 8

Расчетные данные												
Номер опыта	g_1	b_{C1}	g_2	b_{L2}	g_{Σ}	b_{Σ}	y_{Σ}	z_{Σ}	r_{Σ}	$x_{L\Sigma}$	$x_{C\Sigma}$	x_{Σ}
	См							Ом				

11. С учетом данных таблицы 8 нарисовать схемы электрических цепей, эквивалентные исходной электрической цепи (рис. 11). Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. В каких цепях и при каких условиях может возникнуть резонанс токов?
2. Изменением каких параметров можно достичь резонанса токов в цепи, изображенной на рисунке 11?
3. По каким выражениям рассчитываются активные и реактивные составляющие токов ветвей?
4. Напишите формулу резонансной частоты для цепи, представленной на рисунке 11.
5. Постройте векторную диаграмму для цепи (рис. 11), если выполняется условие $I_{1p} < I_{2p}$.
6. Для электрических цепей, изображенных на рисунках 12, 13, нарисовать графики изменения действующих значений токов во всех ветвях в зависимости от частоты напряжения источника электрической энергии.

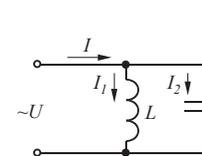


Рис. 12

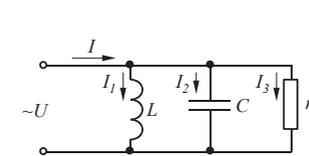


Рис. 13

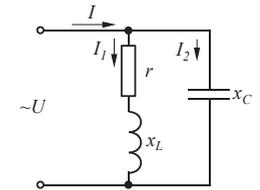


Рис. 14

7. Определить значение емкостного сопротивления x_C , при котором в цепи (рис. 14) возникает резонанс токов, если $r = 4$ Ом, $x_L = 3$ Ом.

8. Построить векторные диаграммы при резонансе токов для цепей, представленных на рисунках 12, 13, 14.

9. Для цепей, представленных на рисунках 12, 13, 14, написать формулы резонансной частоты, считая известными r , L и C .

10. Приведите примеры практического использования явления резонанса токов в технике.

11. Определите индуктивное сопротивление x_{L1} , если при резонансе токов в цепи (рис. 15) $I_1 = 10$ А, $I_2 = 5$ А, $x_{C2} = 20$ Ом.

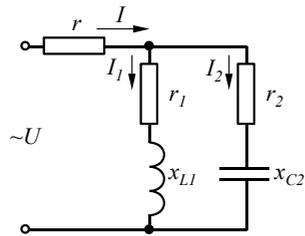


Рис. 15

12. В цепи (рис. 16) существует резонанс токов. Как изменятся показания приборов и сохранится ли резонанс, если увеличить сопротивление r_2 ?

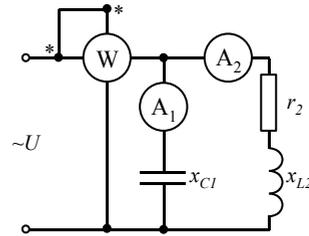


Рис. 16

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ЕМКОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНО ПРИЕМНИКАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЦЕПИ

Общие сведения

Цель работы: опытным путем установить влияние включения конденсатора параллельно приемникам электрической энергии на величину коэффициента мощности цепи и ток источника электрической энергии. Научиться определять параметры электрической цепи с параллельным и последовательно-параллельным соединением ветвей. Закрепить навыки построения векторных диаграмм и анализа процессов в электрических цепях с их помощью.

Большинство потребителей электрической энергии переменного тока (асинхронные двигатели, индукционные печи, электромагниты и т. д.) при работе наряду с активной мощностью потребляют значительную реактивную индуктивную мощность. Эту мощность вырабатывают источники электрической энергии, установленные на электрических станциях. Процесс передачи реактивной мощности от источников к приемникам сопровождается дополнительной загрузкой по току всех элементов системы электроснабжения (генераторы и трансформаторы электрических станций, провода линий электропередачи, трансформаторы понизительных подстанций, воздушные и кабельные линии, идущие к потребителям), обуславливает рост электрических потерь и снижение величины напряжения, что негативно сказывается на энергетических показателях системы и рабочих характеристиках потребителей.

Для снижения реактивной мощности генераторов электрических станций и уменьшения негативных последствий от ее передачи параллельно приемникам с активно-индуктивным характером нагрузки включаются батареи статических конденсаторов.

Реактивная мощность, вырабатываемая генераторами электрических станций в случае включения конденсаторов параллельно приемникам активно-индуктивной мощности:

$$Q = Q_L - Q_C$$

где Q – реактивная мощность генераторов;

Q_L – реактивная индуктивная мощность приемников;

Q_C – реактивная емкостная мощность конденсаторов.

Согласно данному выражению, включение конденсаторов обуславливает уменьшение реактивной мощности генераторов электрических станций на величину Q_C . Коэффициент мощности генераторов при этом возрастает, что видно из следующего соотношения:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}$$

Рост коэффициента мощности генераторов станции при неизменной величине отдаваемой ими активной мощности P обуславливает уменьшение полной мощности генераторов и тока, при котором энергия от генераторов передается к приемникам. Это следует из выражений:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi}; I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi}$$

Уменьшение тока в элементах системы электроснабжения приводит к снижению потерь энергии и напряжения, что способствует повышению энергетических показателей и улучшает работу потребителей.

Домашнее задание

1. Изучить теоретический материал по теме лабораторной работы.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Продумать порядок проведения данной работы и начертить в рабочей тетради таблицу 9.

Таблица 9

Измеряемые данные

Номер опыта	U	U_1	U_2	I_1	I_2	I_3	I_4	P_K	
	В			А				кол-во дел.	Вт

Рабочее задание

1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 17.

На схеме источник электрической энергии представлен двумя зажимами, между которыми при включении выключателя (на схеме не показан) возникает напряжение, действующее значение которого U , равно 220 В. В качестве зажимов использовать клеммы A и B или B и C , или A и C трехфазного источника электрической энергии. Линия электропередачи, посредством которой энергия от источника передается приемникам, замещена на схеме резистором r_1 , в качестве которого используется проволочный реостат 30 Ом. В лабораторной работе используются два параллельно включенных приемника электрической энергии.

Один из приемников представлен резистором r_2 , в качестве которого используется одна секция лампового реостата, а вторым приемником является одна обмотка катушки индуктивности, замещенная на схеме последовательным включением резистора r_K и индуктивности L_K . Параллельно потребителям подключается батарея конденсаторов, в цепь которой включен однополюсный выключатель K .

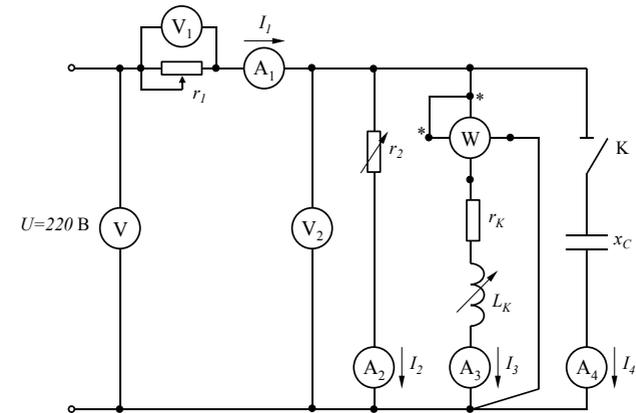


Рис. 17 – Электрическая цепь эксперимента

2. Записать паспортные данные электроизмерительных приборов, используемых при проведении исследований.

3. Посредством перемещения движка резистора r_1 вправо установить его сопротивление равным нулю.

4. Включить схему под напряжение. Изменяя величину сопротивления r_2 путем регулирования числа включенных ламп лампового реостата, установить ток I_2 равным 1,5–2 А.

Перемещением ферромагнитного сердечника катушки установить ток I_3 на уровне 3–3,5 А. Исследовать работу данной электрической

цепи в двух режимах: с отключенной батареей конденсаторов (выключатель К отключен); с подключенной батареей конденсаторов (выключатель К включен).

Показания приборов занести в таблицу 9.

5. Переместить движок резистора r_1 влево на 2/3 длины проволочного реостата и исследовать работу электрической цепи в двух режимах: с отключенной батареей конденсаторов; с подключенной батареей конденсаторов.

Показания приборов занести в таблицу 9.

6. По данным, полученным при проведении опытов, рассчитать величины, указанные в таблице 10.

Таблица 10

Расчетные данные									
Номер опыта	P_1	P_2	P	Q_L	Q_C	Q	S	$\cos\varphi$	φ
	Вт			ВАр			ВА	-	град

Расчетные формулы:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1; P_2 = U_2 \cdot I_2; P = P_1 + P_2 + P_K; S_K = U_2 \cdot I_3;$$

$$Q_L = \sqrt{S_K^2 - P_K^2}; Q_C = U_2 \cdot I_4; Q = Q_L - Q_C;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \cos\varphi = \frac{P}{S}; \varphi = \arccos \frac{P}{S},$$

где P_1 – мощность потерь в проводах линии электропередачи;
 P_2 – активная мощность, потребляемая лампами лампового реостата;
 P_K – мощность потерь в активном сопротивлении обмотки и ферромагнитном сердечнике катушки индуктивности;
 S_K – полная мощность обмотки катушки индуктивности;
 Q_L – реактивная индуктивная мощность обмотки катушки индуктивности;
 Q_C – реактивная емкостная мощность батареи конденсаторов;
 P, Q, S – активная, реактивная и полная мощности исследуемой электрической цепи. Согласно балансу активных и реактивных мощностей, под P, Q, S следует понимать также активную, реактивную и

полную мощности, отдаваемые в цепь источником электрической энергии.

7. Используя данные таблиц 9, 10, рассчитать значения параметров, указанных в таблице 11.

8. По данным таблиц 9, 10, 11 построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для всех режимов работы, указанных в п. п. 4, 5.

Таблица 11

Расчетные данные											
Номер опыта	r_1	r_2	r_K	z_K	x_{LK}	x_C	$r_{\mathcal{E}}$	$x_{\mathcal{E}}$	$z_{\mathcal{E}}$	$\cos\varphi_K$	φ_K
	Ом									о. е.	град

Формулы для расчета:

$$r_1 = \frac{U_1}{I_1}; r_2 = \frac{U_2}{I_2}; r_K = \frac{P_K}{I_3^2}; z_K = \frac{U_2}{I_3}; x_{LK} = \sqrt{z_K^2 - r_K^2};$$

$$x_C = \frac{U_2}{I_4}; z_{\mathcal{E}} = \frac{U}{I_1}; r_{\mathcal{E}} = \frac{P}{I_1^2}; x_{\mathcal{E}} = \sqrt{z_{\mathcal{E}}^2 - r_{\mathcal{E}}^2};$$

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{U_2 \cdot I_3}; \varphi_K = \arccos \frac{P_K}{U_2 \cdot I_3},$$

где z_K, x_{LK} – полное и индуктивное сопротивления обмотки катушки индуктивности;

x_C – емкостное сопротивление конденсаторов;

$z_{\mathcal{E}}, r_{\mathcal{E}}, x_{\mathcal{E}}$ – эквивалентные полное, активное и реактивное сопротивления всей электрической цепи;

φ_K – угол сдвига фаз между напряжением и током в обмотке катушки индуктивности.

На векторной диаграмме, соответствующей первому опыту, строятся вектор напряжения источника \bar{U} и векторы токов $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$. Построение диаграммы рекомендуется начинать с построения вектора напряжения \bar{U} , относительно которого под углами φ_2 и φ_3 строятся векторы

токов \bar{I}_2 и \bar{I}_3 , где $\varphi_2 = 0$; $\varphi_3 = \varphi_k$. Построение вектора тока \bar{I}_1 источника производится на основании первого закона Кирхгофа по уравнению:

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

Векторная диаграмма, построение которой производится по данным второго опыта, должна включать в себя вектор напряжения \bar{U} и векторы токов \bar{I}_1 , \bar{I}_2 , \bar{I}_3 , \bar{I}_4 . Построение следует выполнять в той же последовательности, что и в первом опыте. Вектор тока \bar{I}_4 проводится под углом φ_4 к вектору напряжения \bar{U} , где $\varphi_4 = -90^\circ$, а построение вектора тока источника производится согласно уравнению:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + \bar{I}_4.$$

Векторная диаграмма, соответствующая третьему опыту, должна включать построение векторов напряжения \bar{U} , \bar{U}_1 , \bar{U}_2 и векторов токов \bar{I}_1 , \bar{I}_2 , \bar{I}_3 , а векторная диаграмма для четвертого опыта наряду с векторами \bar{U} , \bar{U}_1 , \bar{U}_2 , \bar{I}_1 , \bar{I}_2 , \bar{I}_3 должна содержать вектор тока \bar{I}_4 . Построение этих векторных диаграмм рекомендуется начинать с построения вектора напряжения \bar{U}_2 . Далее строятся векторы токов \bar{I}_2 , \bar{I}_3 , \bar{I}_1 (опыт 3) и векторы токов \bar{I}_2 , \bar{I}_3 , \bar{I}_4 , \bar{I}_1 (опыт 4). Векторы токов \bar{I}_2 , \bar{I}_3 , \bar{I}_4 проводят под углами φ_2 , φ_3 , φ_4 по отношению к вектору напряжения \bar{U}_2 , а векторы тока \bar{I}_1 строятся по уравнениям, составленным по первому закону Кирхгофа. Вектор напряжения \bar{U}_1 проводится из конца вектора напряжения \bar{U}_2 параллельно вектору тока \bar{I}_1 . Вектор напряжения источника электрической энергии строится на основании уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа:

$$\bar{U} = \bar{U}_2 + \bar{U}_1.$$

9. Используя данные первого опыта, приведенные в таблицах 9, 10, рассчитать величину емкости батареи конденсаторов, при которой коэффициент мощности электрической цепи равен единице. Для расчета воспользоваться формулой:

$$C = \frac{Q_L}{2\pi f U^2},$$

где f – частота напряжения источника электрической энергии; $f = 50$ Гц.

10. На основании анализа полученных результатов сделать выводы по работе, в которых необходимо отразить влияние параллельного подключения конденсаторов на коэффициент мощности цепи и ток источника электрической энергии.

Контрольные вопросы

1. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для электрических цепей, представленных на рисунках 18, 19, 20.

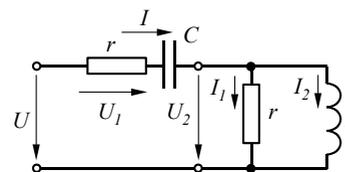


Рис. 18

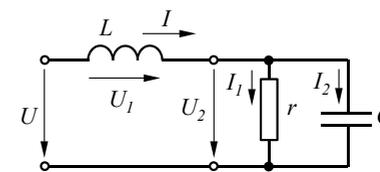


Рис. 19

2. Используя символический метод, рассчитать в общем виде эквивалентные значения активного, реактивного и полного сопротивлений электрических цепей, изображенных на рисунках 18, 19, 20.

3. Объяснить необходимость подключения батареи статических конденсаторов параллельно приемникам электрической энергии однофазного синусоидального напряжения, в конструкции которых используются катушки индуктивности.

4. Определить показания амперметра (рис. 21), если $r = 40$ Ом; $L = 127,4$ мГн; $f = 50$ Гц; $U = 100$ В.

5. Амперметры (рис. 22) соответственно показывают: $I_1 = 10$ А; $I_2 = 6$ А. Каково будет показание амперметра, включенного в ветвь с источником электрической энергии, если в цепи имеет место резонанс токов? Построить векторную диаграмму.

6. Какой элемент нужно включить в цепь (рис. 23) и какой величины должно быть его сопротивление, чтобы цепь носила чисто активный характер, если $r = 6$ Ом; $x_L = 8$ Ом?

7. Записать формулу для определения емкости конденсаторной батареи, подключаемой параллельно к активно-индуктивной нагрузке с

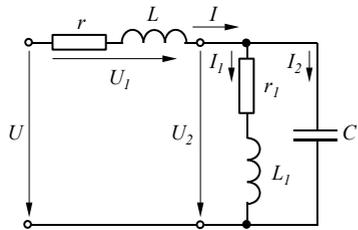


Рис. 20

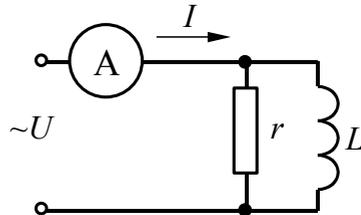


Рис. 21

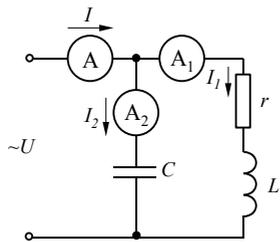


Рис. 22

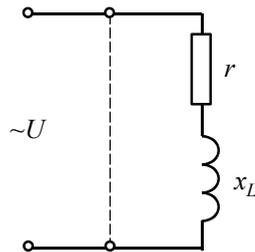


Рис. 23

активной мощностью P_H и коэффициентом мощности $\cos\varphi_1$ с целью повышения коэффициента мощности до значения $\cos\varphi_2$. Напряжение переменного тока U и частота тока f .

8. Определить параметры эквивалентной схемы замещения электрической цепи (рис. 24), если $r = x_1 = x_2 = x_3 = 10 \text{ Ом}$; $f = 50 \text{ Гц}$.

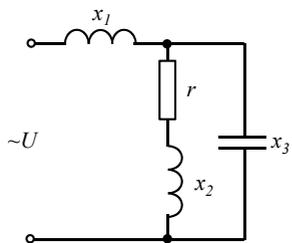


Рис. 24

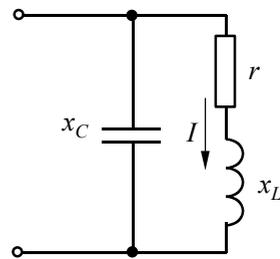


Рис. 25

9. Коэффициент мощности установки (рис. 25), содержащей r и x_L , равен $\cos\varphi = 0,865$. Напряжение сети $U = 380 \text{ В}$, ток установки $I = 24 \text{ А}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$. Определить емкость C батареи конденсаторов для повышения коэффициента мощности установки до $\cos\varphi = 1$.

10. Определить характер нагрузки цепей, представленных на рисунке 26 а, б, если $x_L > x_C$.

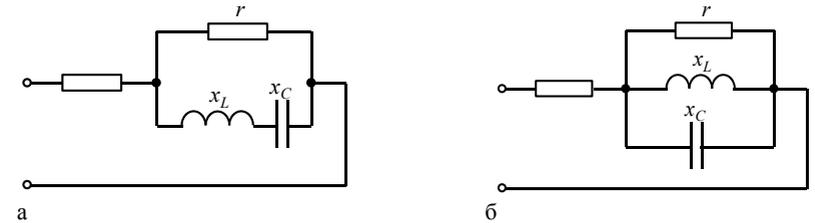


Рис. 26

11. Определить потери мощности в проводах линии электропередачи при работе промышленного предприятия с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,9$, если при $\cos\varphi = 0,7$ потери мощности составляли $\Delta P = 400 \text{ кВт}$. Активная мощность потребителей предприятия не меняется.

12. Нарисовать последовательную схему замещения электрической цепи (рис. 24) и рассчитать ее эквивалентные параметры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ИСТОЧНИКА И ПРИЕМНИКА ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

Общие положения

Цель работы: приобретение практических навыков соединения фаз приемников по схеме «звезда»; опытное исследование распределения токов, линейных и фазных напряжений при симметричных и несимметричных режимах работы трехфазной цепи; выяснение роли нейтрального провода.

Отдельные фазы трехфазных источников и приемников электрической энергии принято на практике соединять по схеме «звезда» или схеме «треугольник». Для получения соединения «звезда» концы отдельных фаз источника (приемника) электрически соединяют между собой. Образующаяся при таком соединении общая точка называется нейтралью источника (приемника). На электрических схемах нейтраль источника принято обозначать буквой N , а нейтраль приемника – буквой n .

Передача электрической энергии от трехфазного источника, обмотки фаз которого соединены по схеме «звезда» к трехфазному приемнику, фазы которого также соединены по схеме «звезда», может осуществляться посредством трехпроводной (рис. 27) или четырехпроводной (рис. 28) воздушной или кабельной линии.

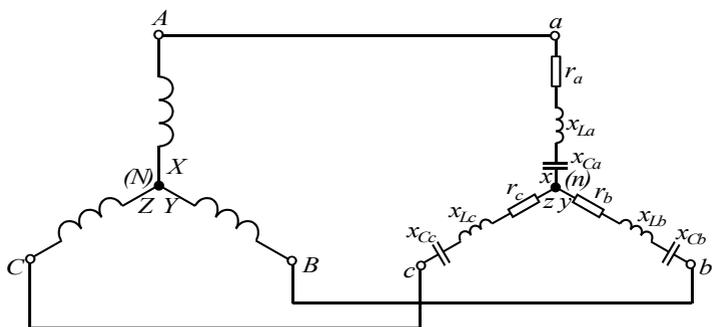


Рис. 27 – Передача электрической энергии по схеме «звезда» посредством трехпроводной линии

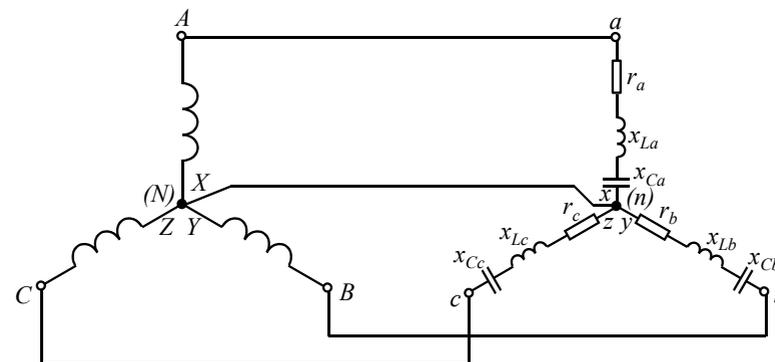


Рис. 28 – Передача электрической энергии по схеме «звезда» посредством четырехпроводной линии

В трехфазной трехпроводной системе (рис. 27) начала фаз источника A, B, C соединяются с помощью трех проводов линии электропередачи с началами фаз a, b, c трехфазного приемника. Нейтраль источника N и нейтраль приемника n при этом между собой непосредственно не соединены. В трехфазной четырехпроводной системе (рис. 28) наряду с тремя проводами, соединяющими начала фаз источника и приемника, используется четвертый провод, соединяющий нейтраль источника N с нейтралью приемника n , получивший название нейтрального.

Трехфазные источники электрической энергии вырабатывают симметричную систему фазных напряжений, то есть три одинаковых по величине фазных напряжения, сдвинутых по фазе во времени на одну треть периода. Симметрия фазных напряжений источника обуславливает симметрию его линейных напряжений, то есть линейные напряжения, действующие между началами фаз источника, равны по величине и сдвинуты по фазе во времени на одну треть периода.

Напряжения на фазах трехфазного приемника, токи и мощности фаз, углы сдвига фаз между фазными напряжениями, фазными токами, между напряжениями и токами одноименных фаз зависят от величины активных, индуктивных и емкостных сопротивлений фаз приемника и от числа проводов линии, соединяющей трехфазный источник и трехфазный приемник.

В случае симметричного трехфазного приемника, для которого справедливы следующие три равенства: $r_a = r_b = r_c, x_{La} = x_{Lb} = x_{Lc}, x_{Ca} = x_{Cb} = x_{Cc}$, в трехфазной цепи, как трехпроводной, так и четырехпроводной, устанавливается симметричный режим работы. В этом режиме напряжения на фазах приемника, токи в фазах, активные, реактивные и полные мощности фаз, углы сдвига фаз между фазными напряжениями, фазными токами, между напряжениями и токами одноименных фаз равны по ве-

личине. В нейтральном проводе ток отсутствует, то есть нейтральный провод не используется, и поэтому необходимость в нем в симметричном режиме работы трехфазной системы отпадает. Другими словами, передачу энергии от трехфазного источника симметричному трехфазному приемнику целесообразно осуществлять с помощью трехпроводной линии.

Если трехфазный приемник является несимметричным, то есть сопротивления фаз отличаются или по величине, или по характеру, или одновременно и по величине, и по характеру, то в трехфазной системе, как трехпроводной, так и четырехпроводной, устанавливается несимметричный режим работы. В несимметричном режиме работы как трехфазной трехпроводной системы, так и трехфазной четырехпроводной системы токи в фазах приемника, активные, реактивные и полные мощности фаз, углы сдвига фаз между токами, между токами и напряжениями одноименных фаз в общем случае различны по величине. Напряжения на фазах приемника в трехфазной трехпроводной цепи образуют несимметричную систему. Степень несимметрии напряжений фаз приемника определяется параметрами его фаз, то есть величинами активных, индуктивных и емкостных сопротивлений. Несимметрия напряжений фаз приемника негативно сказывается на его работе и является недопустимой. Применение нейтрального провода, то есть переход к трехфазной четырехпроводной системе, позволяет устранить несимметрию напряжений фаз приемника и, как следствие, улучшить рабочие характеристики приемника. Поэтому передача энергии от трехфазного источника несимметричному трехфазному приемнику осуществляется посредством четырехпроводной линии электропередачи.

Домашнее задание

1. Изучить теоретический материал по теме лабораторной работы. Особое внимание при этом уделить построению векторных диаграмм для симметричного и несимметричных режимов работы трехфазной трехпроводной и трехфазной четырехпроводной систем.

2. Ознакомиться с методическими указаниями к данной лабораторной работе, в частности, с электрической схемой, приведенной на рисунке 29. Обдумать назначение всех элементов электрической цепи и порядок проведения опытов. Подготовить в рабочей тетради таблицу 1 паспортных данных электроизмерительных приборов, таблицу 12 с программой исследований и таблицу 13 опытных данных.

Рабочее задание

1. Собрать электрическую схему по рисунку 29.

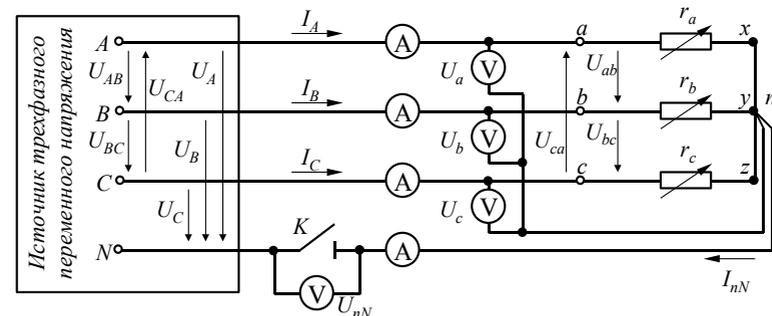


Рис. 29 – Электрическая схема эксперимента

В качестве источника питания используется источник трехфазного переменного напряжения. Действующие значения напряжений фаз U_A , U_B , U_C равны 127 В, а действующие значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} равны 220 В.

Функции приемников электрической энергии выполняют лампы накаливания трех ламповых реостатов. На схеме (рис. 29) ламповые реостаты замещены регулируемыми по величине активными сопротивлениями r_a , r_b , r_c , соединенными в «звезду». Напряжения на фазах потребителя измеряются вольтметрами электромагнитной системы с пределом измерения 300 В. Напряжение между нейтралью источника N и нейтралью приемника n измеряется вольтметром электромагнитной системы с пределом измерения 150 В. Токи в фазах потребителя и ток в нейтральном проводе измеряются амперметрами электромагнитной системы с пределом измерения 5 А. Однополюсный выключатель K в цепи нейтрального провода позволяет исследовать режимы работы трехфазной трехпроводной системы (выключатель K отключен) и режимы работы трехфазной четырехпроводной системы (выключатель K включен). Сопротивления проводов, соединяющих источник и приемник, в лабораторных условиях могут быть приняты равными нулю. При этом линейные напряжения на зажимах потребителя U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} по величине становятся равными линейным напряжениям источника и образуют в совокупности симметричную трехфазную систему с действующим значением 220 В.

2. Исследовать работу электрической цепи в режимах, указанных в таблице 12. Показания электроизмерительных приборов, снятые при проведении опытов, занести в таблицу 13.

3. Рассчитать, используя полученные данные, сопротивления фаз потребителя по формулам:

$$r_a = \frac{U_a}{I_a}, r_b = \frac{U_b}{I_b}, r_c = \frac{U_c}{I_c}.$$

Результаты расчета записать в таблицу 13.

Таблица 12

Данные измерений

Номер опыта	Режим работы	Положение выключателя К		Число включенных ламп ламповых реостатов		
		откл.	вкл.	фаза a-x	фаза b-y	фаза c-z
1.	Симметричный режим трехфазной трехпроводной системы	x		6	6	6
2.	Симметричный режим трехфазной четырехпроводной системы		x	6	6	6
3.	Несимметричный режим работы трехфазной трехпроводной системы	x		6	4	3
4.	Несимметричный режим работы трехфазной четырехпроводной системы		x	6	4	3
5.	Несимметричный режим работы трехфазной трехпроводной системы, обусловленный обрывом фазы a-x потребителя	x		–	6	6
6.	Несимметричный режим работы трехфазной четырехпроводной системы, обусловленный обрывом фазы a-x потребителя		x	–	6	6
7.	Несимметричный режим работы трехфазной трехпроводной системы, обусловленный коротким замыканием фазы a-x потребителя	x		–	4	4
8.	Несимметричный режим работы трехфазной трехпроводной системы,	x		4	Батарея кон-	4

Продолжение таблицы 12

Номер опыта	Режим работы	Положение выключателя К		Число включенных ламп ламповых реостатов		
		откл.	вкл.	фаза a-x	фаза b-y	фаза c-z
	обусловленный включением в фазу b-y потребителя батареи конденсаторов				денсаторов емкостью 40 мкФ	
9.	Несимметричный режим работы трехфазной четырехпроводной системы, обусловленный включением в фазу b-y потребителя батареи конденсаторов		x	4	Батарея конденсаторов емкостью 40 мкФ	4

Таблица 13

Данные расчетов

Номер опыта	Напряжения в фазах приемника			Токи в фазах потребителя			Напряжение между нейтральными	Ток в нейтральном проводе	Сопротивления фаз потребителя				
	U_a	U_b	U_c	I_A	I_B	I_C			U_{nN}	I_{nN}	r_a	r_b	r_c
	В			А			В	А	Ом				

4. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследованных режимов работы трехфазной цепи. Построение векторных диаграмм рекомендуется производить с использованием следующих масштабов: по напряжению 20 В/см, по току 1 А/см.

Порядок построения:

– находят длины векторов напряжений и токов посредством деления величин линейных напряжений, фазных напряжений, фазных токов соответственно на масштаб напряжения и масштаб тока;

– строится равносторонний треугольник линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} источника, который одновременно является треугольником линейных напряжений U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} приемника;

- находится центр тяжести треугольника линейных напряжений, который на векторной диаграмме определяет место нейтрали N источника;
- строится трехлучевая «звезда» фазных напряжений U_A, U_B, U_C источника посредством соединения центра тяжести треугольника линейных напряжений с его вершинами;

(Примечание: указанные выше построения являются общими и выполняются для всех исследованных режимов работы);

- определяется местоположение нейтрали n приемника. Для этого из вершин A, B, C треугольника линейных напряжений радиусами, равными соответственно длинам векторов фазных напряжений U_a, U_b, U_c приемника, делаются засечки. Точка пересечения засечек определяет местоположение нейтрали n приемника;

- строятся векторы фазных напряжений U_a, U_b, U_c приемника посредством соединения нейтрали n приемника с вершинами A, B, C треугольника линейных напряжений;

- из нейтрали n приемника по направлению векторов фазных напряжений U_a, U_b, U_c проводятся векторы токов фаз I_A, I_B, I_C приемника;

- осуществляется проверка правильности результатов проведенных лабораторных исследований и тщательности построения векторных диаграмм. При отсутствии нейтрального провода, то есть в трехфазной трехпроводной системе, независимо от режима ее работы, геометрическая

сумма токов фаз $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ должна быть равна нулю, а вектор напряжения U_{nN} , соединяющий нейтраль приемника n и нейтраль источника N , должен получиться такой длины, чтобы при умножении ее на масштаб напряжения получилось значение, равное указанному в таблице 13 для данного режима работы.

При наличии нейтрального провода, то есть в трехфазной четырехпроводной системе, длина вектора напряжения U_{nN} равняется нулю и нейтрали приемника и источника совпадают и располагаются в центре тяжести треугольника линейных напряжений, а длина вектора, равного геометрической сумме векторов токов фаз, будучи умноженной на масштаб тока, должна дать величину, равную току I_{nN} , указанному в таблице 13 для данного режима работы.

5. Студенты ряда специальностей (по указанию преподавателя) проводят дополнительные исследования несимметричных режимов работы электрической цепи (см. табл. 12, опыты 8* и 9*). С этой целью вместо лампового реостата, включенного в фазу b -у приемника, включается установленная на стенде батарея конденсаторов емкостью 40 мкФ. Программа дополнительных исследований включает проведение в измененной схеме электрической цепи двух опытов. Первый опыт относится к несимметричному режиму работы трехфазной трехпроводной системы (выключатель K отключен), а второй опыт проводится при включенном выключателе K , то есть исследуется несимметричный режим работы

трехфазной четырехпроводной системы. При проведении этих опытов в фазы a -х и c -z приемника рекомендуется включать по четыре лампы. Данные опытов заносятся в таблицу 13.

По полученным данным рассчитываются активные сопротивления r_a и r_c , емкостное сопротивление x_{cb} и строятся векторные диаграммы. При расчете емкостного сопротивления x_{cb} используется выражение:

$$x_{cb} = \frac{U_b}{I_B}.$$

6. В выводах по работе отразить роль нейтрального провода в симметрировании системы фазных напряжений на зажимах трехфазных несимметричных потребителей и проанализировать влияния вида несимметрии в трехфазной трехпроводной системе на величину напряжения, возникающего между нейтралью источника и нейтралью приемника.

Контрольные вопросы

1. Дать определение трехфазной электрической цепи.
2. Из каких элементов состоит реальная электрическая цепь трехфазного переменного напряжения?
3. Как устроен источник электрической энергии трехфазного переменного напряжения?
4. За счет проведения каких мероприятий получают синусоидальную форму кривых ЭДС в фазах трехфазного источника?
5. Каковы способы изображения трехфазной симметричной системы ЭДС, напряжений, токов?
6. Каковы способы соединения фаз трехфазных источников электрической энергии?
7. Какое напряжение называется фазным, какое линейным? Каково соотношение между линейным и фазным напряжениями источника при соединении его фаз в «звезду»?
8. Какой источник электрической энергии трехфазного переменного напряжения называется симметричным?
9. Какой трехфазный приемник электрической энергии называется симметричным, какой несимметричным?
10. Для питания каких приемников электрической энергии используются трехпроводные и четырехпроводные линии?
11. В каком режиме работы трехфазной четырехпроводной системы ток по нейтральному проводу не проходит и почему?
12. В каких режимах работы трехфазной системы возникает необходимость в использовании нейтрального провода?

13. Почему в цепь нейтрального провода не устанавливается предохранитель?

14. Во сколько раз увеличивается напряжение на фазах $a-x$, $c-z$ симметричного трехфазного приемника, питаемого по трехпроводной линии, если в фазе $b-y$ произойдет короткое замыкание?

15. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для симметричного трехфазного приемника, в фазы которого включены только емкостные сопротивления.

16. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для симметричного трехфазного приемника, в фазы которого включены индуктивные сопротивления.

17. В фазе $c-z$ симметричного трехфазного приемника, питаемого по трехпроводной линии, произошел обрыв. Как изменятся напряжения на фазах $a-x$, $b-y$ по сравнению с нормальным режимом их работы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ПРИЕМНИКА ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

Общие положения

Цель работы: приобретение практических навыков соединения фаз трехфазных потребителей электрической энергии по схеме «треугольник». Экспериментальное исследование распределения напряжений, фазных и линейных токов при симметричных и несимметричных режимах работы трехфазной цепи. Углубление знаний в области использования метода векторных диаграмм для анализа процессов в трехфазных электрических цепях переменного напряжения.

При эксплуатации трехфазных электрических цепей переменного напряжения фазы потребителей электрической энергии довольно часто соединяют между собой по схеме «треугольник». Для этого конец x фазы $a-x$ электрически соединяют с началом b фазы $b-y$, конец y этой фазы электрически соединяют с началом c фазы $c-z$, а конец z этой фазы электрически соединяют с началом a фазы $a-x$ (см. рис. 30, 31). К вершинам образовавшегося при этом треугольника подключаются три провода линии электропередачи, посредством которых электрическая энергия от трехфазного источника передается приемнику. При этом фазы источника могут быть соединены по схеме «треугольник» (рис. 30) или «звезда» (рис. 31).

Характерной особенностью соединения фаз приемника по схеме «треугольник» является то, что к каждой фазе приемника подключаются два линейных провода, между которыми действует линейное напряжение. Поэтому для соединения фаз в «треугольник» характерно равенство фазных и линейных напряжений:

$$U_{ax} = U_{ab'}; U_{by} = U_{bc'}; U_{cz} = U_{ca'}$$

где U_{ax} , U_{by} , U_{cz} – действующие значения фазных напряжений;
 $U_{ab'}$, $U_{bc'}$, $U_{ca'}$ – действующие значения линейных напряжений.

Токи, протекающие по фазам потребителя, называются фазными токами. На рисунках 30, 31 действующие значения фазных токов обозначены через $I_{ab'}$, $I_{bc'}$, $I_{ca'}$.

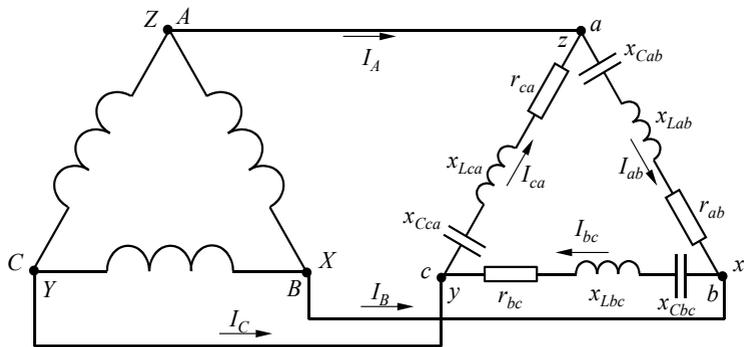


Рис. 30 – Электрическая схема, соединенная по схеме «треугольник» или «звезда»

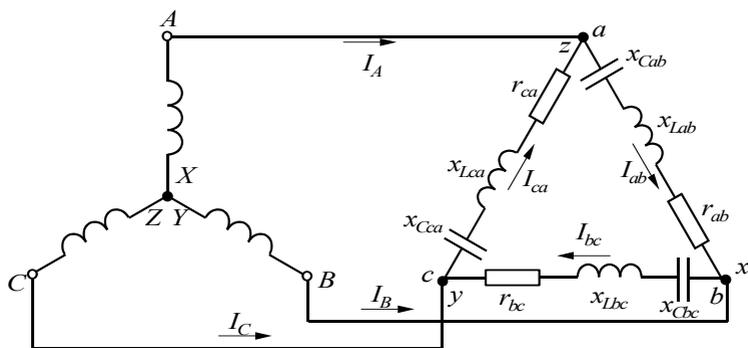


Рис. 31 – Электрическая схема, соединенная по схеме «звезда»

Токи, протекающие по проводам линии электропередачи, называются линейными токами. На схемах (рис. 30, 31) действующие значения линейных токов обозначены через I_A, I_B, I_C .

Трехфазные источники электрической энергии, установленные на электрических станциях, вырабатывают симметричные системы фазных и линейных напряжений. Поэтому в рабочем режиме трехфазной системы, когда нет обрыва проводов линии электропередачи, система фазных (линейных) напряжений на зажимах трехфазного приемника также является симметричной, то есть напряжения на фазах потребителя равны по величине и сдвинуты по фазе во времени на 120° . Если при этом и трехфазный приемник является симметричным, то есть выполняются равенства:

$$r_{ab} = r_{bc} = r_{ca}, x_{Lab} = x_{Lbc} = x_{Lca}, x_{Cab} = x_{Cbc} = x_{Cca},$$

то в трехфазных системах (рис. 30, 31) устанавливается симметричный режим работы. В этом режиме работы трехфазной системы:

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}, I_A = I_B = I_C, P_{ab} = P_{bc} = P_{ca},$$

$$Q_{Lab} = Q_{Lbc} = Q_{Lca}, Q_{Cab} = Q_{Cbc} = Q_{Cca}, \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca},$$

где P_{ab}, P_{bc}, P_{ca} – активные мощности фаз;

$Q_{Lab}, Q_{Lbc}, Q_{Lca}$ – индуктивные реактивные мощности фаз;

$Q_{Cab}, Q_{Cbc}, Q_{Cca}$ – емкостные реактивные мощности фаз;

$\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$ – углы сдвига фаз между фазными напряжениями и фазными токами.

В симметричном режиме работы токи в фазах приемника и токи в проводах линии электропередачи связаны следующим соотношением:

$$I_{Л} = \sqrt{3} \cdot I_{\Phi},$$

где $I_{Л}$ – ток в проводах питающей линии;

I_{Φ} – ток в фазе потребителя.

В случае, когда сопротивления фаз потребителя отличаются или по величине, или по характеру, или одновременно и по величине, и по характеру, или же имеет место обрыв одной из фаз потребителя или обрыв одного из линейных проводов, то в трехфазных системах (рис. 30, 31) устанавливается несимметричный режим работы. В несимметричном режиме работы трехфазной системы токи в фазах потребителя, токи в проводах линии электропередачи, активные, индуктивные, емкостные и полные мощности фаз, углы сдвига между напряжениями и токами соответствующих фаз в общем случае отличаются по величине. Токи в линейных проводах рассчитываются через токи в фазах потребителя по формулам:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}, \bar{I}_B = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}, \bar{I}_C = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}.$$

Домашнее задание

Изучить материал по трехфазным электрическим цепям при соединении фаз потребителя по схеме «треугольник». Начертить в рабочей тетради таблицу 1 паспортных данных электроизмерительных приборов, таблицу 14 режимов работы трехфазной электрической цепи и таблицу 15 для опытных данных, полученных в процессе экспериментальных исследований.

Таблица 14

Данные измерений

Но- мер опы- та	Режим работы трехфазной цепи	Количество ламп ламповых реостатов, включаемых в фазы		
		a-x	b-y	c-z
1.	Симметричный режим работы	5	5	5
2.	Несимметричный режим работы, обусловленный различным числом ламп, включенных в фазах потребителя	4	3	5
3.	Несимметричный режим работы, обусловленный обрывом фазы a-x потребителя	–	5	5
4.	Несимметричный режим работы, обусловленный обрывом провода А-а линии электропередачи	4	4	4
5.*	Несимметричный режим работы, обусловленный различным характером сопротивлений фаз приемника	6	Батарея конденсаторов емкостью 40 мкФ	3

Примечание:

* – данный режим проводится только по указанию преподавателя.

Таблица 15

Расчетные данные

Номер опыта	Напряжения на фазах приемника			Токи в фазах приемника			Токи в проводах линии электропередачи			Сопротивления фаз приемника			
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	r_{ab}	r_{bc}	r_{ca}	x_{cby}
	В			А			А			Ом			

Рабочее задание

1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 32. В качестве источника питания используется источник трехфазного переменного напряжения с действующим значением линейного напряжения 220 В. Функции приемника электрической энергии выполняют лампы накаливания трех ламповых реостатов, соединенных по схеме «треугольник». На электрической схеме (рис. 32) ламповые реостаты замещены регулируемыми по величине активными сопротивлениями r_{ab} , r_{bc} , r_{ca} . Напряжения на фазах потребителя измеряются с помощью трех вольтметров электромагнитной системы с пределами измерения 300 В. Токи в фазах потребителя и токи в проводах линии электропередачи измеряются амперметрами электромагнитной системы с пределами измерения соответственно 5 А и 7,5 А.

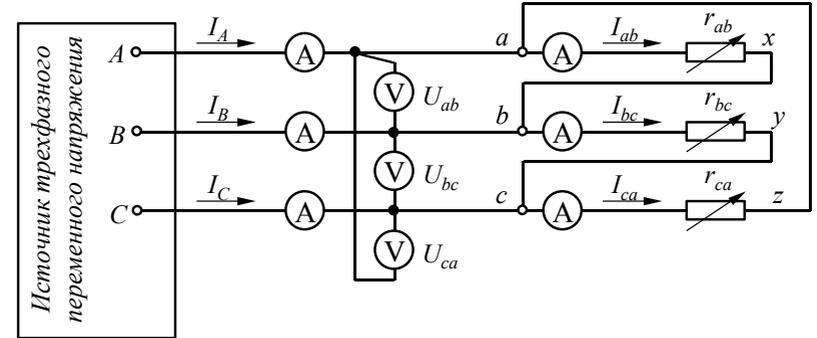


Рис. 32 – Электрическая схема эксперимента

2. Исследовать работу электрической цепи в режимах, указанных в таблице 14. Показания электроизмерительных приборов для всех исследованных режимов работы заносятся в таблицу 15.

3. На основании данных таблицы 15 произвести построение векторных диаграмм напряжений и токов. Построение выполнить с использованием следующих масштабов: по напряжению – 20 В/см, по току – 1 А/см. Порядок построения:

– находят длины векторов напряжений, фазных и линейных токов посредством деления величин напряжений и токов, указанных в таблице 15, соответственно на масштаб напряжения и масштаб тока;

– строится равносторонний треугольник напряжений фаз (в опыте с обрывом линейного провода треугольник вырождается в три вектора, располагаемых на одной прямой);

- по направлению векторов напряжений фаз откладываются векторы соответствующих токов фаз;
- строятся векторы токов в проводах линии электропередачи по выражениям, приведенным в разделе «Общие положения».

4. По экспериментально полученным данным произвести расчет сопротивлений фаз потребителя. При расчете использовать следующие формулы:

$$r_{ab} = \frac{U_{ab}}{I_{ab}}, r_{bc} = \frac{U_{bc}}{I_{bc}}, r_{ca} = \frac{U_{ca}}{I_{ca}}.$$

Данные расчета для всех режимов работы занести в таблицу 14.

5. Для студентов ряда специальностей (по указанию преподавателя) программа исследований несимметричных режимов работы трехфазных цепей должна быть расширена. С этой целью ламповый реостат в фазе *b*-у отключается, а вместо него в эту фазу включается батарея конденсаторов емкостью 40 мкФ. В фазы *a*-х и *c*-z приемника при этом включается соответственно шесть и три лампы.

Показания электроизмерительных приборов, зафиксированных при проведении данного опыта, заносятся в таблицу 15. На основании этих данных строится векторная диаграмма токов и напряжений и рассчитываются сопротивления фаз приемника. Величины r_{ab} и r_{ca} рассчитываются по приведенным выше выражениям, а емкостное сопротивление конденсатора определяется по формуле:

$$x_{bc} = \frac{U_{bc}}{I_{bc}}.$$

Результаты расчета сопротивлений заносятся в таблицу 14.

6. В выводах по работе отразить особенности симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи, в которой фазы приемника включены по схеме «треугольник».

Контрольные вопросы

1. В чем заключается отличие соединения фаз потребителя по схеме «треугольник» от соединения фаз по схеме «звезда»?
2. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения при соединении фаз потребителя электрической энергии по схеме «треугольник»?
3. В каком случае отношение $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$ справедливо? В каком случае несправедливо?

4. По каким выражениям рассчитываются токи в проводах линии электропередачи при несимметричном режиме работы трехфазной цепи, в которой фазы потребителя соединены по схеме «треугольник»?

5. В фазе *a*-х симметричного трехфазного приемника активной энергии произошел обрыв. Как изменятся токи в фазах приемника и в проводах линии электропередачи в возникшем при этом несимметричном режиме по сравнению с симметричным режимом, имевшем место до обрыва? Построить векторную диаграмму для несимметричного режима.

6. В симметричной трехфазной цепи, в которой фазы потребителя соединены по схеме «треугольник», произошел обрыв провода *B-b* линии электропередачи. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для несимметричного режима работы трехфазной цепи. Определить, в каком соотношении находятся напряжения на фазах *a*-х и *b*-y?

7. В электрической цепи (рис. 33) $r_{ab} = 5$ Ом, $r_{bc} = 4$ Ом, $x_{Cbc} = 3$ Ом, $r_{ca} = 3$ Ом, $x_{Lca} = 4$ Ом. Величина линейного напряжения $U_{\text{л}} = 220$ В. Рассчитать величины токов в фазах приемника и углы сдвига фаз между напряжениями фаз и токами фаз. Построить в масштабе векторную диаграмму, из которой определить токи в проводах линии электропередачи.

8. В электрической цепи (рис. 34) $r_{ab} = 10$ Ом, $x_{Lbc} = 10$ Ом, $x_{Cca} = 10$ Ом. Величина линейного напряжения 380 В. Рассчитать величины токов в фазах приемника. Построить в масштабе векторную диаграмму, из которой определить токи в проводах линии электропередачи.

9. В схеме (рис. 34) произошел обрыв в фазе *c*-z. Используя данные, приведенные в п. 8, рассчитать токи в фазах *a*-z, *b*-y и построить в масштабе векторную диаграмму напряжений, фазных и линейных токов. Найти величину тока в линейном проводе *A-a*.

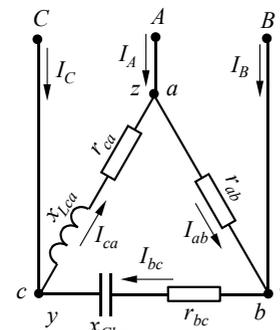


Рис. 33

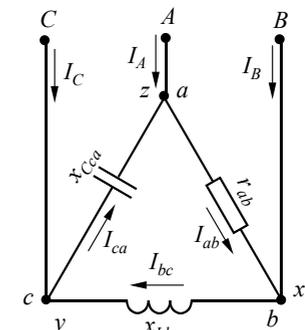


Рис. 34

10. В схеме (рис. 34) произошел обрыв линейного провода *B-b*. Ис-

пользуя данные п. 7, рассчитать токи в фазах потребителя, активные, реактивные и полные мощности фаз.

11. Рассчитать активную, реактивную и полную мощности трехфазного источника электрической энергии в схеме, представленной на рисунке 33.

12. Какие элементы и с какой величиной сопротивления надо ввести в фазы потребителя, приведенного на рисунке 34, чтобы потребитель стал симметричным?

ТЕСТ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Что изображают в схемах первичных цепей:
 - а) главные цепи электрической установки;
 - б) соединения только для одной фазы установки;
 - в) основное электрооборудование;
 - г) три фазы;
 - д) измерительные приборы.
2. Что условно показывают в однолинейных схемах:
 - а) соединения только для одной фазы установки;
 - б) основное электрооборудование;
 - в) три фазы;
 - г) измерительные приборы;
 - д) главные цепи электрической установки.
3. Что показывают на оперативных электрических схемах:
 - а) основное электрооборудование;
 - б) три фазы;
 - в) измерительные приборы;
 - г) главные цепи электрической установки;
 - д) соединения только для одной фазы установки.
4. На сколько категорий по степени ответственности электроснабжения принято подразделять электроприемники:
 - а) 1;
 - б) 2;
 - в) 3;
 - г) 4;
 - д) 5.
5. Электроприемники первой категории:
 - а) нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный материальный урон;
 - б) перерыв в электроснабжении которых связан с массовой невыработкой продукции, простоем рабочих, механизмов и транспорта, нарушением нормальной деятельности людей;
 - в) электроприемники вспомогательных цехов, небольших поселков;
 - г) нарушение электроснабжения которых не представляет опасности;
 - д) нет правильного ответа.
6. Реактивная мощность в цепи однофазного переменного тока равна:
 - а) $Q = U \cdot I \cdot \operatorname{tg}\varphi$;
 - б) $Q = U \cdot I^2$;
 - в) $Q = U^2 \cdot I$;

- г) $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$;
 д) $Q = U \cdot I \cdot \cos\varphi$.
7. Электроприемники третьей категории:
- электроприемники вспомогательных цехов, небольших поселков;
 - перерыв в электроснабжении которых связан с массовой невыработкой продукции, простоем рабочих, механизмов и транспорта, нарушением нормальной деятельности людей;
 - нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный материальный урон;
 - нарушение электроснабжения которых не представляет опасности;
 - нет правильного ответа.
8. Выражение для определения полной мощности в цепях трехфазного тока независимо от вида соединения:

а) $S = \sqrt{3}U_{л}I_{л}$;
 б) $S = \sqrt{2}U_{л}I_{л}$;
 в) $S = \sqrt{3}P_{л}R_{л}$;
 г) $S = U_{л}I_{л}$;
 д) $S = \sqrt{3}U_{\phi}I_{\phi}$.

9. Уравнение баланса мощности:

а) $\sum E_i I_i = \sum I_i^2 R_i$;
 б) $\sum E_i I_i = \sum I_i^2 U_i$;
 в) $\sum Q_i = \sum P_i$;
 г) $\sum E_i = \sum R_i$;
 д) $\sum E_i I_i = \sum XC$.

10. В какой цвет окрашивается линия фазы «В»:

- желтый;
- красный;
- коричневый;
- зеленый;
- не окрашивается.

11. Каким прибором измеряется напряжение в сети:

- амперметром;

- вольтметром;
- ваттметром;
- варметром;
- омметром.

12. Отклонение напряжения – это:

- разность между фактическим значением напряжения и его номинальным значением для сети, возникающая при сравнительно медленном изменении режима работы, когда скорость изменения напряжения меньше 1% в секунду;
- колебания напряжения;
- изменение амплитуды напряжения;
- изменение режима работы;
- разность между максимальным и минимальным значением напряжения.

13. Условие резонанса напряжений:

- $X_L > X_C$;
- $X_L = X_C$;
- $X_L < X_C$;
- $B_L = B_C$;
- $X_L = 0$.

14. Абсолютное отклонение напряжения определяется:

- $\Delta U = U - U_H$;
- $U = U_{\max} + U_{\min}$;
- $U = (U + U_H)/2$;
- $U = (U_H + U_{\text{ср}} + U_{\min} + U_{\max})/4$;
- $\delta U = (U/U_H)/100\%$.

15. Синхронные компенсаторы и статические конденсаторы используются для:

- компенсации реактивной мощности;
- накопления электрической энергии;
- изменения параметров цепи;
- регулирования частоты;
- автоматического управления.

16. Какой энергетический процесс характеризует собой активная мощность:

- преобразование электрической энергии в тепловую;
- преобразование тепловой энергии в электрическую;
- преобразование электрической энергии в световую;
- преобразование электрической энергии в тепловую;
- преобразование электрической энергии в энергию движения.

17. Системой электроснабжения называют:

- совокупность устройств для передачи и распределения электрической энергии;
- преобразование переменного тока в постоянный;

- в) преобразование постоянного тока в переменный;
 г) преобразование электрической энергии одной величины в постоянную энергию другой величины;
 д) выпрямления переменного тока.
18. Формула реактивной мощности:
- $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$;
 - $Q = U \cdot I \cdot \operatorname{tg}\varphi$;
 - $Q = U \cdot I \cdot \cos\varphi$;
 - $Q = U_{\max} \cdot I_{\max}$;
 - $Q = U_{\min} \cdot I_{\min}$.
19. Формула активной мощности:
- $P = U_{\max} \cdot I_{\max}$;
 - $P = U \cdot I \cdot \operatorname{tg}\varphi$;
 - $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$;
 - $P = U \cdot I \cdot \sin\varphi$;
 - $P = U_{\min} \cdot I_{\min}$.
20. С точки зрения надежного и бесперебойного питания приемники электрической энергии делятся на:
- на пять категорий;
 - на четыре категории;
 - на три категории;
 - на две категории;
 - не делятся.
21. Совокупность устройств для передачи, распределения и производства электрической энергии – это:
- электрическая система;
 - система электроснабжения;
 - система автоматического управления;
 - электродинамическая система;
 - электростатическая система.
22. Выражение для мгновенного значения переменного напряжения:
- $U = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$;
 - $U = U_m/2$;
 - $U = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi)$;
 - $U = \sin(\omega t)$;
 - $U = \omega t + \varphi$.
23. Максимальная нагрузка длительностью 1–2 секунды – это:
- пиковая нагрузка;
 - рабочая нагрузка;
 - полная нагрузка;
 - критическая нагрузка;
 - нерабочая нагрузка.
24. Ток короткого замыкания определяется по формуле:

$$\text{а) } I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{к.з.}}}{R_{\text{к.з.}}};$$

$$\text{б) } I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\max}}{R_{\min}};$$

$$\text{в) } I_{\text{к.з.}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{к.з.}}}{R_{\text{к.з.}}};$$

$$\text{г) } I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{\text{к.з.}}};$$

- д) правильные варианты отсутствуют.
25. Статические электромагнитные устройства, которые преобразуют переменную электрическую энергию одной величины в другую, – это:
- трансформаторы;
 - двигатели переменного тока;
 - конденсаторы;
 - резисторы;
 - транзисторы.
26. Коэффициент мощности для однофазной системы определяется:
- $\cos\varphi = P/(UI)$;
 - $\cos\varphi = P_{\text{НОМ}}/(UKI)$;
 - $\cos\varphi = \frac{P}{U}$;
 - $\cos\varphi = UI$;
 - $\cos\varphi = P_1/P_2$.
27. Синхронные компенсаторы и статические конденсаторы используются для:
- компенсации реактивной мощности;
 - накопления электрической энергии;
 - изменения параметров цепи;
 - регулирования частоты;
 - автоматического управления.
28. Разность, усредненная за 10 минут между фактическим значением основной частоты и номинальным ее значением, называется:
- отклонение частоты;
 - изменение величины тока;
 - колебания частоты;

- г) увеличение частоты;
 д) уменьшение частоты.
29. Разность между наибольшим и наименьшим значением основной частоты в процессе достаточного быстрого изменения параметров режима, когда скорость изменения частоты не меньше 0,2 Гц в секунду, – это:
- а) колебания частоты;
 б) уменьшения частоты;
 в) увеличение частоты;
 г) отклонение частоты;
 д) изменение величины частоты.
30. Характерное соотношение для соединения треугольником при симметричной нагрузке:
- а) $\sqrt{3}I_{Л} = I_{Ф}, \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} = U_{Ф};$
 б) $\sqrt{3}I_{Л} = I_{Ф}, U \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} = U_{Ф};$
 в) $I_{Л} = I_{Ф}, U \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} = U_{Ф};$
 г) $\sqrt{3}I_{Л} = I_{Ф}, \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}} = U_{Ф};$
 д) $\sqrt{2}I_{Л} = I_{Ф}, U \frac{U_{Л}}{2} = U_{Ф}.$
31. Что происходит с мощностью при переключении схемы из треугольника в звезду:
- а) уменьшится в три раза;
 б) увеличится в три раза;
 в) уменьшится в два раза;
 г) увеличится в два раза;
 д) не изменится.
32. Чем больше сечение проводов, тем передача электроэнергии по ним:
- а) происходит с меньшими потерями;
 б) происходит с большими потерями;
 в) потери стабилизируются;
 г) потери не стабилизируются;
 д) правильные варианты отсутствуют.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Анчарова, Т. В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по курсу «Электрооборудование и электроснабжение промышленных предприятий» / Т. В. Анчарова, М. А. Рашевская, Е. Д. Стебунова. – М. : Форум, 2012. – 415 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=137024> (дата обращения: 05.02.2014).
2. Конюхова, Е. А. Электроснабжение : учебник для вузов / Е. А. Конюхова. – Электрон. текстовые данные. – М. : изд. дом «МЭИ», 2014. – 510 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/33222.html>. – ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 15.05.2017).
3. Кудрин, Б. И. Электроснабжение потребителей и режимы : учебное пособие для вузов : для студентов, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / Б. И. Кудрин, Б. В. Жилин, Ю. В. Матюнина. – М. : изд. дом «МЭИ», 2013. – 411 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=129904> (дата обращения: 05.02.2014).
4. Основы электроснабжения городов : учебное пособие / В. К. Грунин [и др.]. – Минобрнауки России, Федеральное гос. бюд. обр. учреждение высш. проф. образования «Омский гос. технический ун-т». – Омск : полиграфический центр «КАН», 2012. – 141 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=119729> (дата обращения: 05.02.2014).
5. Фролов, Ю. М. Основы электроснабжения : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Агроинженерия» / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. – СПб. : Лань, 2012. – 479 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=57317> (дата обращения: 05.02.2014).

Дополнительная:

6. Гологорский, Е. Г. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ / Е. Г. Гологорский, А. Н. Кравцов, Б. М. Узелков. – М. : ЭНАС, 2007. – 557 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=58127> (дата обращения: 05.02.2014).
7. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расче-

тов / Ю. С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=50136> (дата обращения: 05.02.2014).

8. Плащанский, Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий : учебник для вузов / Л. А. Плащанский. – М. : Московский государственный горный университет, 2006. – 500 с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=79280> (дата обращения: 05.02.2014).

9. Сопов, В. И. Электроснабжение нефтегазовых комплексов и производств : учебное пособие / В. И. Сопов, Н. И. Щуров. – М-во образования и науки Российской Федерации, Новосибирский гос. технический ун-т, фак. мехатроники и автоматизации. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2011. – 268, [1] с. – Режим доступа : <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=57323> (дата обращения: 05.02.2014).

10. Стрельников, Н. А. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие / Н. А. Стрельников. – Электрон. текстовые данные. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. – 100 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/45457.html>. – ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 15.05.2017).

11. Шведов, Г. В. Электроснабжение городов. Электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети : учебное пособие / Г. В. Шведов. – Электрон. текстовые данные. – М. : изд. дом «МЭИ», 2012. – 268 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/33175.html>. – ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 15.05.2017).

12. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – М. : Форум, 2010. – 496 с. – Режим доступа : <http://znanium.com/catalog.php#1235280> (дата обращения: 05.02.2014).