

Министерство образования и науки РФ
Нижекамский химико-технологический институт
(филиал)
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Электрические цепи постоянного и переменного тока

Учебно-методическое пособие

Казань, 2019

УДК 621.3

ББК 31.2

A13

Рецензенты:

Латыпов Д.Н., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ПАХТ НХТИ (филиал) ФГБОУ ВО «КНИТУ»;

Афлягунов И.Ф., кандидат технических наук, инженер-электроник ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Абдуллин А.М.

A13 Электрические цепи постоянного и переменного тока: учебно-методическое пособие / А.М.Абдуллин, НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ». Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт, 2019. - 80с.

Приведены теоретический материал и методические указания для выполнения лабораторных работ по законам электрических цепей.

Учебное издание предназначено для бакалавров высших технических учебных заведений, обучающихся по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Подготовлено на кафедре электротехники и энергообеспечения предприятий Нижнекамского химико-технологического института.

Рекомендовано к изданию экспертом РИС ФГБОУ ВО «КНИТУ» по направлению АУТПП, заведующим кафедрой АССОИ, доктором технических наук Р.Н.Гайнуллиным.

УДК 621.3

ББК 31.2

© Абдуллин А.М., 2019

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия являются важным элементом учебного процесса в плане приобретения студентами навыков в планировании эксперимента, использования измерительных приборов и аппаратуры, в экспериментальном исследовании схем, устройств и электронных элементов, а также в усвоении и практической конкретизации лекционного материала.

Для каждой лабораторной работы сформулированы цель исследований, дан перечень необходимых приборов и оборудования, определены конкретные задания и порядок выполнения работы, а также приведены контрольные вопросы и указан объем отчетных материалов. Краткое изложение теоретических сведений по исследуемому вопросу поможет студентам в подготовке к лабораторным работам и их выполнению.

Особенность лабораторного практикума в том, что работы имеют учебно-исследовательский характер. Они развивают у студентов навыки проведения экспериментальных исследований, знакомят с методами исследований процессов в электрических цепях и техникой измерения их параметров, обращения с электротехническими устройствами и электроизмерительной аппаратурой.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждый студент должен четко понимать цель лабораторной работы и отчетливо представлять назначение, принцип работы и основные характеристики исследуемой схемы, устройства или прибора. Поэтому перед выполнением каждой работы необходима предварительная подготовка, в процессе которой студент повторяет пройденный теоретический материал, готовит таблицы наблюдений и изучает последовательность необходимых операций.

После проверки степени готовности студента к выполнению лабораторной работы он допускается к сборке схемы, указанной в задании.

Лабораторные работы выполняются бригадами по 2–4 человека. За каждой бригадой закрепляется определенный стенд. Члены бригады должны знать тему лабораторной работы за несколько дней до ее выполнения.

После проверки собранной схемы преподавателем студенты приступают к выполнению лабораторной работы. Работа считается законченной в том случае, если результаты в виде записей, таблиц представлены преподавателю, им проверены и утверждены, после чего студенты разбирают схему и приводят рабочее место в исходное состояние.

2. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками и в некоторых случаях могут стать источниками опасности поражения электрическим током. Известно, что тело человека обладает электропроводностью и при соприкосновении с двумя неизолированными элементами установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникший вследствие этого в теле

человека электрический ток может вызвать ожог кожи или нанести тяжелые поражения нервной, дыхательной и сердечной системам человека. Поэтому при выполнении лабораторных работ студенты должны помнить о возможности поражения электрическим током и соблюдать следующие правила техники безопасности.

1. К проведению лабораторных работ допускаются только студенты, знающие правила техники безопасности. Инструктаж по технике безопасности проводит преподаватель, что фиксируется в специальном журнале по ТБ.

2. При проведении работ запрещается громко разговаривать, отвлекать работающих за рабочим местом.

3. Перед началом сборки схемы измерений необходимо убедиться в том, что выключатели находятся в положении «Выключено».

4. При монтаже схем используются только изолированные провода. Пользоваться оголенными проводами или с поврежденной изоляцией запрещается.

5. При сборке схемы следует обратить внимание на высокую надежность контактов всех разъемных соединений и по возможности не допускать пересечения проводов.

6. Студенту категорически запрещается включать схему без проверки ее преподавателем.

7. Напряжение к рабочему месту подается только преподавателем.

8. Устранение замеченных в рабочей цепи неисправностей, а также все пересоединения, необходимые по ходу работы, производятся только при отключенном напряжении. Повторное включение схемы после этих пересоединений допускается только после разрешения преподавателя.

9. Во время работы запрещается прикасаться к оголенным частям электрической цепи.

10. Запрещается покидать рабочее место и оставлять без наблюдения включенную лабораторную установку.

11. При возникновении неисправностей в работе лабораторного оборудования или несчастного случая лабораторную установку следует немедленно обесточить, оказать пострадавшему первую медицинскую помощь и немедленно доложить преподавателю.

12. По окончании работы напряжение у рабочего места необходимо немедленно отключить.

13. Смена перегоревших предохранителей и т.п. производится только обслуживающим персоналом лаборатории.

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

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

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТОВ

Каждый студент должен самостоятельно обработать данные измерений и подготовить отчет о проделанной работе.

В отчете на титульном листе указывается номер и наименование лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, выполнившего работу. Отчет должен содержать следующие разделы.

1. Цель лабораторной работы.
2. Краткая характеристика и основные соотношения объекта исследования.
3. Электрическая схема.
4. Таблицы:
 - технические сведения об используемых приборах;
 - результаты измерений;
 - результаты проведенных расчетов.
5. Формулы, по которым определялись расчетные данные.
6. Графики (диаграммы).
7. Выводы и обоснования по проделанной работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

Примечание

1. Электрические схемы выполняются аккуратно с помощью карандаша и чертежного инструмента, с соблюдением принятых стандартных условных обозначений.
2. Электрические схемы, графики должны иметь подписи.
3. Таблицы (диаграммы) должны иметь заголовки, поясняющие зависимости, которые они характеризуют.
4. При построении экспериментальных и расчетных кривых должно приниматься во внимание следующее.

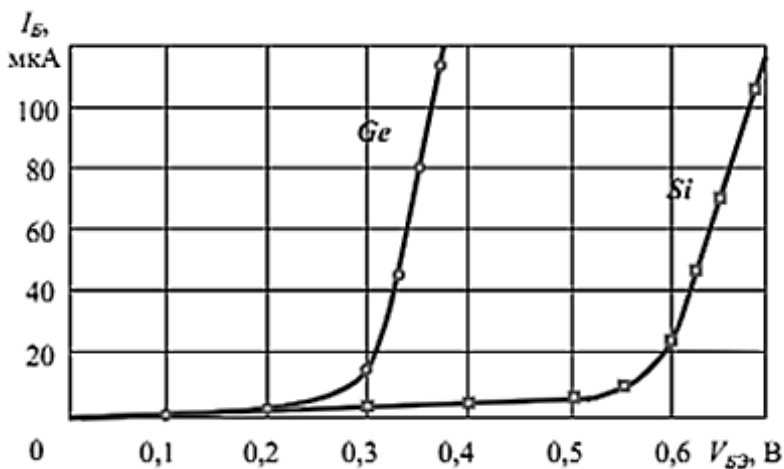


Рис.1. Пример оформления графика

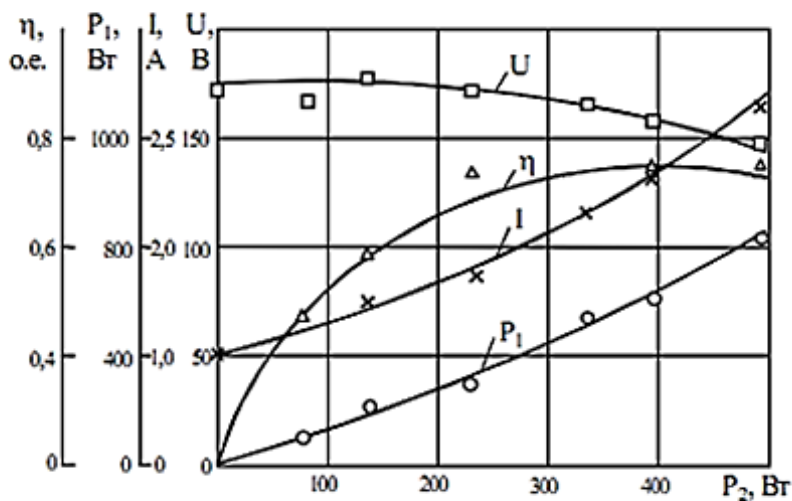


Рис.2. Оформление нескольких графиков в одной системе координат

Начало осей координат и нулевые значения параметров должны быть совмещены; численные значения параметров, отличные от нулевых, откладываются в масштабе на осях координат.

Следует обращать внимание на правильный выбор масштаба. Масштабы шкал по осям (как правило, на разных осях

разные масштабы) следует выбирать из условия максимального использования всей площади графика. Для определения масштаба по оси абсцисс делят наибольшее значение аргумента X на предполагаемую ширину графика, получают масштаб $m_x = X_{\max} / b$ – единиц измерения величины в направлении оси абсцисс (b – ширина графика). Аналогично определяют масштаб по оси ординат $m_y = Y_{\max} / h$, где h – предполагаемая высота графика. Масштабы округляют до ближайших целых значений (желательно в одном из следующих диапазонов: $1 \cdot 10^n$, $2 \cdot 10^n$, $5 \cdot 10^n$, где $n = -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ и т.п.).

Масштаб на осях координат наносится короткими рисками. Числовые значения масштаба шкал осей координат пишут за пределами графика (левее от оси ординат и ниже оси абсцисс). Если кривая, изображенная на рисунке, занимает небольшое пространство, то для экономии места числовые деления на осях координат можно начинать не с нуля, а ограничивать теми значениями, в пределах которых рассматривается данная функциональная зависимость. Допускается также разрывы масштабных осей и шкал с целью уменьшения площади графика.

Численные значения параметров, полученные из опыта или в результате расчета, на оси координат наноситься не должны.

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

6. 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. 2).

7. Если в одной системе координат строится несколько графиков, то экспериментальные или расчетные значения каждой физической величины рекомендуется отмечать различными значками (рис. 2).

8. Векторные диаграммы строятся с соблюдением следующих требований:

- все векторы строят в определенном масштабе, масштабы выбирают в соответствии с пунктом 4;
- углы между векторами откладывают по транспортиру.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально проверить возможности замены сложной электрической цепи эквивалентным генератором (активным двухполюсником) с параметрами $E_{ЭГ}$ и $R_{ЭГ}$, для чего:

- 1) исследовать работу эквивалентного генератора в различных режимах;
- 2) научиться определять параметры эквивалентного генератора;
- 3) зная параметры эквивалентного генератора, определить ток в исследуемой цепи.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

При работе и исследовании линейных электрических цепей часто необходимо знать режим работы какой-нибудь одной ветви с сопротивлением R_H , а не всех элементов сложной электрической цепи. В этом случае нецелесообразно производить расчет всей схемы. Исследуемую ветвь можно выделить, а всю оставшуюся часть схемы независимо от её структуры и сложности условно изобразить некоторым прямоугольником с двумя выводами (рис. 3).

По отношению к выделенной ветви $1-R_H-2$ вся схема, обозначенная прямоугольником, называется *двухполюсником*, т.к. имеет два вывода (выходных зажима). Если в двухполюснике имеются источники электрической энергии, то его называют активным двухполюсником. Если в двухполюснике отсутствуют источники электрической энергии, то такой двухполюсник называется пассивным.

В общем случае исследуемая ветвь с нагрузкой R_H присоединяется к активному двухполюснику в точках 1 и 2. Следовательно, двухполюсник может рассматриваться относительно исследуемой ветви как источник с некоторой

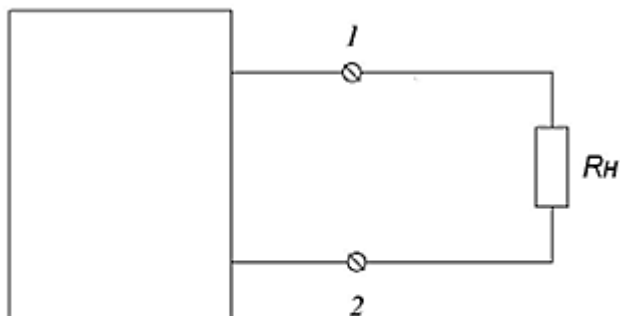


Рис.3. Замещение электрической цепи двухполюсником и выделенной цепью

электродвижущей силой $E_{ЭГ}$ и некоторым эквивалентным внутренним сопротивлением $R_{ЭГ}$ (рис.4). Такой условный источник энергии называется *эквивалентным генератором*. К зажимам генератора подключена ветвь электрической цепи с сопротивлением R_H , в которой нужно определить величину тока.

Метод замены линейной электрической цепи эквивалентным генератором (активным двухполюсником) называется методом эквивалентного генератора (активного двухполюсника).

После такой замены ток в исследуемой ветви можно определить из закона Ома для полной цепи:

$$I = \frac{E_{ЭГ}}{R_{ЭГ} + R_H}, \quad (1.1)$$

где $E_{ЭГ}$ и $R_{ЭГ}$ – э.д.с. и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора.

Первый этап анализа работы исследуемой ветви по методу эквивалентного генератора сводится к определению параметров активного двухполюсника. При известных параметрах всей заданной электрической цепи параметры эквивалентного генератора могут быть определены аналитически. Если же параметры рассматриваемой электрической цепи неизвестны, то параметры эквивалентного генератора определяются экспериментально.

В данной лабораторной работе параметры эквивалентного генератора определяются экспериментально методом холостого хода и короткого замыкания.

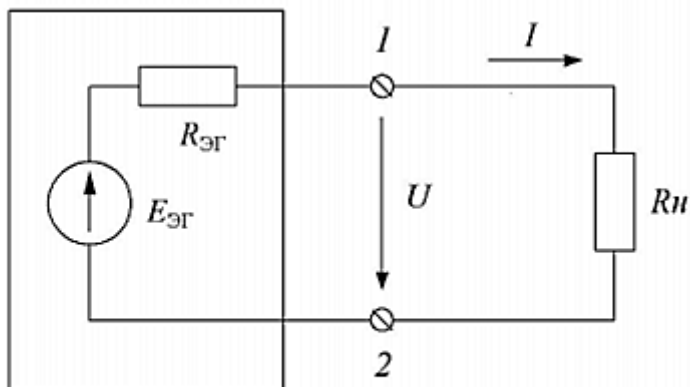


Рис. 4. Представление активного двухполюсника в виде эквивалентного генератора

По этому методу электродвижущая сила эквивалентного генератора равна напряжению холостого хода

$$E_{ЭГ} = U_{ХХ}, \quad (1.2)$$

где $U_{ХХ}$ – напряжение холостого хода на участке 1–2 ($R_H = \infty$, т.е. отключенная нагрузка). Это следует из того, что электродвижущая сила эквивалентного генератора равна напряжению между точками 1 и 2 при отключенной нагрузке, т.е. напряжению холостого хода.

Сопротивление эквивалентного генератора $R_{ЭГ}$ по методу холостого хода и короткого замыкания равно сопротивлению цепи между точками 1 и 2 в режиме короткого замыкания. Из закона Ома

$$R_{ЭГ} = \frac{U_{ХХ}}{I_{КЗ}}, \quad (1.3)$$

где $I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания ($R_H = 0$, т.е. закороченная нагрузка).

Таким образом, выполнив измерения в режиме холостого хода и короткого замыкания, можно экспериментально определить параметры эквивалентного генератора. Однако необходимо отметить, что данный метод холостого хода и короткого замыкания можно применять не ко всем цепям, т.к. не во всех цепях можно производить опыт короткого замыкания.

Зная напряжение и ток для нескольких значений нагрузки, можно построить внешнюю характеристику генератора. Зависимость $U=F(I)$ называется внешней характеристикой эквивалентного генератора. Она даёт возможность графически определить ток в исследуемой ветви при заданном её сопротивлении.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения лабораторной работы собирается электрическая цепь измерительного моста, схема которой представлена на рис.5. Измерительный мост питается от лабораторного автотрансформатора ЛАТР TV2. При этом тумблер SA3 устанавливается в верхнее положение – «Включено», тумблер переключения пределов регулирования напряжения ЛАТРа в положение «0-100В». Тумблер SA11 должен находиться в верхнем положении.

Плечами моста являются резисторы $R_{20} = 4,7\text{кОм}$, $R_{22} = 10\text{кОм}$, $R_{23} = 4,7\text{кОм}$ и R_1 . При равновесии моста выполняется соотношение

$$R_1 = \frac{R_{20} \cdot R_{23}}{R_{22}}. \quad (1.4)$$

Сила тока на мосту контролируется миллиамперметром РА3. Напряжение на выходе ЛАТРа регулируется двумя переключателями: левый с шагом 10В и правый с шагом 1В. Напряжение на выходе из ЛАТРа устанавливается таким, чтобы стабилитрон VD8 вошел в режим стабилизации, т.е. при повольтном увеличении $U_{\text{ВЫХ}}$ ЛАТРа напряжение на вольтметре PV1 мало изменялось. Напряжение стабилизации $U_{\text{СТ}}$ измеряется тестером при отключенных вольтметре PV1 и миллиамперметре РА3. Измерительный мост включается тумблером SA7.

На первом этапе работы определяются параметры эквивалентного генератора методом холостого хода и короткого замыкания. Холостой ход осуществляется отключением нагрузки – сопротивления R_{24} (переключатель SA13 устанавливается в положение «3»). При коротком замыкании нагрузки необходимо закоротить сопротивление R_{24}

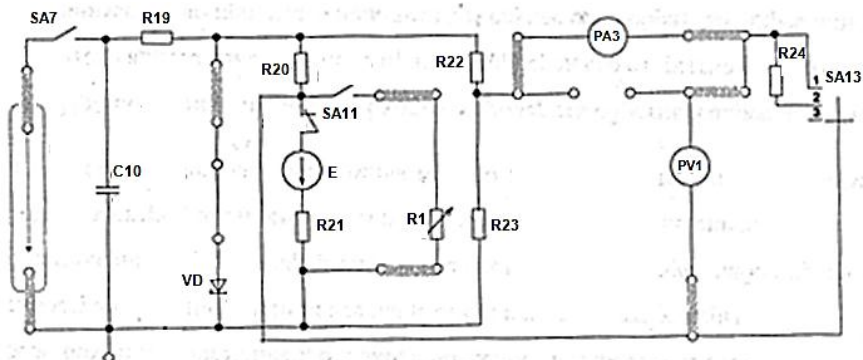


Рис.5. Принципиальная схема измерительного моста

(переключатель SA13 устанавливается в положение «1»). Для построения характеристики эквивалентного генератора $U_{\text{ВЫХ}}(R_1)$ необходимо снять показания приборов для нескольких значений сопротивления R_1 . По полученным экспериментальным данным определяются параметры эквивалентного генератора, а также строят график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(R_1)$.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Подготовить отчет, изучить теоретический материал и получить допуск на выполнение лабораторной работы у преподавателя.

2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.

3. Записать в таблицу 1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

4. Собрать схему электрической цепи согласно рис.5 и предоставить для проверки преподавателю.

5. Выполнить режим холостого хода, т.е. поставить переключатель SA13 в положение «3». Измерить вольтметром PV1 напряжение холостого хода $U_{\text{ХХ}}$ при двух значениях R_1 . Результаты записать в таблицу 2.

6. Осуществить режим короткого замыкания, т.е. поставить переключатель SA13 в положение «1». Измерить миллиамперметром PA3 силу тока короткого замыкания $I_{\text{КЗ}}$ при двух значениях R_1 . Результаты записать в таблицу 2.

Таблица 1. Сведения об измерительных приборах

	РА3	PV1
Наименование прибора		
Тип и номер прибора		
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)		
Предел измерений (номинальное значение)		
Класс точности		
Род тока		
Цена деления прибора		
Абсолютная погрешность измерения		

Таблица 2. Параметры эквивалентного генератора

R_1 , кОм	U_{XX} , В	I_{K3} , mA	$R_{ЭГ}$, кОм

Таблица 3. Метод эквивалентного генератора

R_1 , кОм	U, В	I, mA	R_{24} , кОм
	Опыт		
	Расчет		-
	Опыт		
	Расчет		-

7. По формуле (1.3) вычислить сопротивление эквивалентного генератора. $R_{ЭГ}$.

8. Переключатель SA13 поставить в положение «2» и при двух значениях R_1 измерить напряжение и силу тока на сопротивлении нагрузки R_{24} . По закону Ома вычислить величину R_{24} . Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 3.

9. Используя данные таблицы 2, по методу эквивалентного генератора вычислить силу тока и напряжение на сопротивлении нагрузки R_{24} . Результаты расчетов сравнить с опытными значениями.

10. Используя вольтметр PV1, снять экспериментальную зависимость выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от сопротивления R_1 . Результаты измерений занести в таблицу 4.

Таблица 4. Зависимость $U_{\text{ВЫХ}}$ от R_1

R_1 , кОм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ВЫХ}}$, В											

11. Выбрав соответствующий масштаб, построить график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(R_1)$. Используя условие равновесия моста, определить графическое значение R_1 и сравнить со значением, вычисленным по формуле (1.4).

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Для каких целей сложную линейную электрическую цепь представляют в виде эквивалентного генератора?
2. Что называется двухполюсником?
3. Что такое активный и пассивный двухполюсник?
4. Какими параметрами характеризуется эквивалентный генератор?
5. Какими методами можно определить параметры эквивалентного генератора?
6. В чём состоит расчет по методу эквивалентного генератора?
7. Какая зависимость называется внешней характеристикой генератора?
8. Как осуществить в работе опыт короткого замыкания и холостого хода и что при этом покажут амперметр и вольтметр?
9. Записать выражение для определения силы тока в ветви заданной электрической цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Закрепление на практике методов расчета электрических цепей постоянного тока.
2. Исследование режима работы электрической цепи с несколькими источниками питания.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Прежде чем приступить к выполнению данной лабораторной работы, следует изучить теоретическую часть лабораторной работы №1.

Цепи постоянного тока являются важной частью электрооборудования. Например, постоянный ток широко применяется для питания ванн гальванического покрытия, зарядных устройств для аккумуляторов, двигателей постоянного тока, устройств сигнализации и связи.

Под постоянным током понимают электрический ток, не изменяющийся во времени.

Электрической цепью называется связанная совокупность источников электроэнергии, ее потребителей и соединительных проводов.

Отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи и выполняющее в ней определенную функцию, называется элементом электрической цепи. Основными элементами являются источники и приемники электроэнергии, соединительные провода, измерительные приборы, коммутационная и защитная аппаратура.

В источниках электроэнергии различные виды энергии, например, химическая (гальванические элементы), механическая (электромеханические генераторы), тепловая (термопары), световая (солнечные батареи) преобразуются в электрическую. Важнейшим параметром источника электроэнергии является его электродвижущая сила э.д.с. (E).

В приемниках электрической энергии происходит обратное преобразование – электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии, например, в химическую, механическую, тепловую, световую.

Электрические цепи классифицируются по нескольким признакам:

1) по виду тока делят на цепи постоянного и переменного тока;

2) цепи делят на линейные и нелинейные. К линейным относят цепи, у которых электрическое сопротивление R каждого участка не зависит от значений и направлений тока и напряжения;

3) цепи бывают простые и сложные. К простым относят те цепи, все элементы которых соединены последовательно. Во всех элементах протекает один и тот же ток. К сложным цепям относят цепи с разветвлениями. Различают разветвленные цепи с одним источником энергии и с несколькими источниками.

Ветвь электрической цепи – участок, элементы которого соединены последовательно. Ток в элементах один и тот же.

Узел электрической цепи – точка соединения не менее чем 3-х ветвей.

Контур – любой путь вдоль ветвей электрической цепи, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же точке.

Участки электрической цепи делятся на пассивные и активные. Участок электрической цепи, содержащий источник электрической энергии, называется активным, не содержащий – пассивным.

Величина, характеризующая противодействие проводящей среды движению электрических зарядов, т.е. току, называется электрическим сопротивлением R . Элемент электрической цепи, параметром которого является его электрическое сопротивление R , называется **резистором**. Величина, обратная сопротивлению, называется **проводимостью G** .

Закон Ома. Для пассивных участков электрической цепи закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.1)$$

Напряжение на пассивном участке цепи U и равно ему произведение IR часто называют падением напряжения.

Внутреннее сопротивление источника. У реального источника энергии два параметра: э.д.с. E и внутреннее сопротивление R_0 , которое на схемах замещения показывается отдельным элементом. Если источник не подключен к внешней цепи, то напряжение на его выводах численно равно э.д.с. (напряжение холостого хода). Напряжение U на выводах нагруженного источника меньше э.д.с.:

$$U = E - IR_0 \quad (2.2)$$

Источник, внутренним сопротивлением которого можно пренебречь, называется идеальным источником ЭДС.

Методы расчета электрических цепей

Для расчета электрических цепей разработаны различные приемы. Наибольшее применение находят следующие методы:

- метод свертывания;
- метод непосредственного применения законов Кирхгофа;
- метод контурных токов;
- метод наложения.

Метод свертывания используется обычно для анализа цепей с одним источником энергии. Метод состоит в том, что участки электрической цепи заменяются более простыми по структуре, при этом токи и напряжения в непреобразованной части цепи не должны изменяться. В результате цепь “свертывается” до простейшего вида. При этом необходимо уметь преобразовывать последовательно и параллельно соединенные резистивные элементы.

Последовательное соединение резистивных элементов.

Ток во всех последовательно соединенных элементах один и тот же. Поэтому общее напряжение U , приложенное к батарее последовательно соединенных элементов, определяется по формуле:

$$U = (R_1 + R_2 + \dots + R_n)I = R_{\text{экв}} I, \quad (2.3)$$

где $R_{\text{экв}}$ – сопротивление, эквивалентное сопротивлению элементов, соединенных последовательно. Как видно из формулы, оно определяется как сумма всех последовательно включенных сопротивлений.

Параллельное соединение резистивных элементов. При параллельном соединении ко всем элементам приложено одно и то же напряжение U . На основании первого закона Кирхгофа можно записать: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ или, учитывая закон Ома,

$$\frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}. \quad (2.4)$$

Вводя понятие проводимости, получим

$$I = U(G_1 + G_2 + \dots + G_n) = UG_{\text{ЭКВ}} \quad (2.5)$$

Таким образом, эквивалентная проводимость $G_{\text{ЭКВ}}$ параллельно включенных резистивных элементов равна сумме их проводимостей. В частном случае, если параллельно соединены два резистора, их эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.6)$$

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа является наиболее общим приемом, используемым для анализа сложных электрических цепей.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи. Он гласит, что алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю, т.е.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.7)$$

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи. Он гласит, что алгебраическая сумма падений напряжения на сопротивлениях данного контура равна алгебраической сумме ЭДС источников в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k \quad (2.8)$$

Для заданной электрической цепи составляется система линейных алгебраических уравнений первого порядка относительно неизвестных токов. Уравнения составляются по обоим законам. По первому закону – для независимых узлов, по второму – для независимых контуров. Общее число уравнений равно числу неизвестных токов в цепи.

Метод наложения базируется на принципе суперпозиции, применимом для линейных физических систем. Применительно к линейным электрическим цепям он формулируется следующим образом: ток в любой ветви сложной электрической цепи, содержащей несколько э.д.с., равен алгебраической сумме токов от действия каждой из э.д.с. в отдельности.

В соответствии с этим принципом расчет сложной цепи сводится к нескольким (по числу источников э.д.с.) вариантам расчета схемы, в которой оставлен только один источник э.д.с.

Метод контурных токов.

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов сводится к решению системы уравнений, составленных только по второму закону Кирхгофа. Таких уравнений получается $N = B - (Y - 1)$, т.е. на $(Y - 1)$ меньше, чем при расчете электрической цепи методом уравнений Кирхгофа. В этом заключается преимущество метода контурных токов.

При расчете электрических цепей рассматриваемым методом кроме контурных токов вводят еще ряд понятий: контурные э.д.с., собственные и взаимные сопротивления.

Контурной э.д.с. называют алгебраическую сумму всех э.д.с. источников в данном контуре. При этом обход контура производят по направлению контурного тока и э.д.с. берут со знаком «+», если ее направление совпадает с направлением контурного тока, и со знаком «-», если эти направления противоположны. Контурные э.д.с. обозначают буквой E_{kk} с двойными индексами, соответствующими номеру контура.

Собственным сопротивлением контура называют сумму всех сопротивлений, входящих в данный контур. При этом каждое сопротивление берется с положительным знаком. Собственные сопротивления контуров обозначаются буквой R_{kk} с двойными индексами, соответствующими номеру контура.

Взаимным (или смежным) сопротивлением контуров называют сопротивление, входящее одновременно в два разных контура. Его обозначают буквой R_{ki} с двумя индексами, первый из которых соответствует номеру рассматриваемого контура, а второй - номеру контура, имеющего общее (смежное) сопротивление с рассматриваемым контуром.

Взаимные сопротивления берут со знаком «+», если контурные токи, проходящие по этим сопротивлениям, имеют одинаковое направление, и со знаком «-», если направления контурных токов противоположны. Взаимные сопротивления, отличающиеся одно от другого порядком индексов, равны между собой, т.е. $R_{ki} = R_{ik}$.

В общем случае для электрической цепи, содержащей 3 независимых контура, система контурных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} = E_{11}; \\ I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23} = E_{22}; \\ I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} = E_{33}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Здесь R_{11}, R_{22}, R_{33} - собственные сопротивления контуров; $R_{12} = R_{21}, R_{13} = R_{31}, R_{23} = R_{32}$ - взаимные сопротивления контуров, E_{11}, E_{22}, E_{33} - контурные э.д.с. соответствующих контуров.

Решая систему уравнений (2.9) с помощью определителей, находим контурные токи:

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta}. \quad (2.10)$$

где определитель системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}. \quad (2.11)$$

Этот определитель симметричен относительно его главной диагонали, так как любые взаимные сопротивления равны между собой.

Определитель Δ_k получается из определителя Δ путем замены элементов k -го столбца свободными членами системы (2.9), например:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_{11} & R_{12} & R_{13} \\ E_{22} & R_{22} & R_{23} \\ E_{33} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}. \quad (2.12)$$

Определители Δ_2, Δ_3 вычисляются аналогичным образом.

Алгоритм расчета по методу контурных токов:

1. Определяют число независимых контуров электрической цепи и произвольно задаются направлением контурных токов в них.

2. Вычисляют собственные и взаимные сопротивления контуров, а также контурные э.д.с.

3. Составляют систему уравнений для контурных токов в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

4. Решают полученную систему уравнений одним из известных методов, например с помощью определителей, и находят контурные токи.

5. Искомые токи вычисляют как алгебраическую сумму *контурных токов*, проходящих по данному участку.

Для исследуемой электрической цепи, схема которой приведена на рис.6, собственные и взаимные сопротивления, а также контурные э.д.с. равны:

$$R_{12} = R_{21} = R_0; \quad R_{13} = R_{31} = R_1; \quad R_{23} = R_{32} = R_{24};$$

$$R_{11} = R_0 + R_1; \quad R_{22} = R_0 + R_{24} + R_2;$$

$$R_{33} = R_1 + R_3 + R_{24}; \quad E_{11} = E1 - E; \quad E_{22} = 0; \quad E_{33} = E.$$

Решив систему уравнений (2.9) и определив значения контурных токов, вычисляют силу тока I_3 через сопротивление нагрузки R_{24} :

$$I_3 = I_{33} - I_{22}. \quad (2.13)$$

Выходное напряжение на R_{24} : $U = I_3 \cdot R_{24}$.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения лабораторной работы используется упрощенная схема электрической цепи, представленная на рис.6. Вместо резистора R_1 тумблером S11 включается источник E (тумблер S11 должен находиться в нижнем положении). Полная схема цепи приведена на рис.5.

Исследуемая электрическая цепь питается от лабораторного автотрансформатора ЛАТР TV2. При этом тумблер SA3 устанавливается в верхнее положение – «Включено», тумблер переключения пределов регулирования напряжения ЛАТРа в положение «0-100В». Сила тока на сопротивлении нагрузки R_{24} измеряется миллиамперметром PA3.

Напряжение на выходе ЛАТРа регулируется двумя переключателями: левый с шагом 10В и правый с шагом 1В. Напряжение на выходе из ЛАТРа устанавливается таким, чтобы стабилитрон VD8 вошел в режим стабилизации, т.е. при повольном увеличении $U_{\text{ВЫХ}}$ ЛАТРа напряжение на вольтметре PV1 мало изменяется. Величина входного напряжения $U_{\text{ВХ}}=E1=U_{\text{СТ}}$ измеряется тестером при отключенных вольтметре PV1 и миллиамперметре PA3. Измерительный мост включается тумблером SA7.

Величина э.д.с. источника E устанавливается с помощью переключателя «Е», где деления указаны в вольтах.

На первом этапе работы определяются параметры эквивалентного генератора методом холостого хода и короткого замыкания. Холостой ход осуществляется отключением нагрузки – сопротивления R_{24} (переключатель SA13 устанавливается в положение «3»). При коротком замыкании нагрузки необходимо закоротить сопротивление R_{24} (переключатель SA13 устанавливается в положение «1»). Для построения характеристики эквивалентного генератора $U_{\text{ВЫХ}}(E)$ необходимо снять показания приборов для нескольких значений

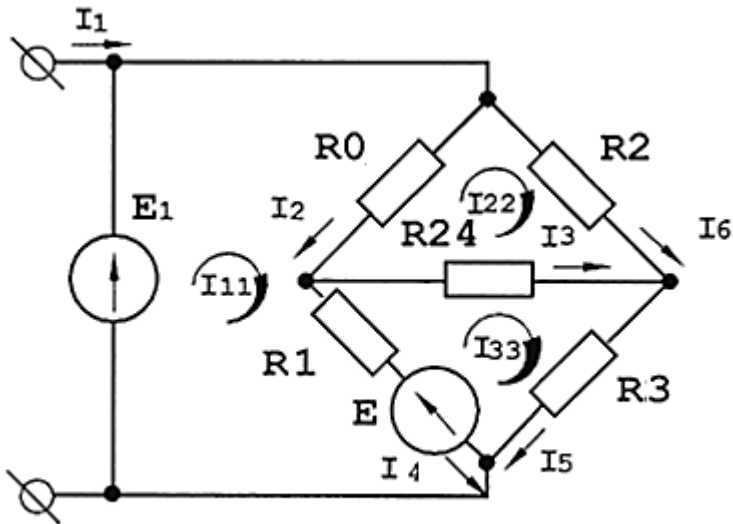


Рис.6. Упрощенная схема измерительного моста

э.д.с. E . По полученным экспериментальным данным определяются параметры эквивалентного генератора, а также строят график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(E)$.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Подготовить отчет, изучить теоретический материал и получить допуск на выполнение лабораторной работы у преподавателя.

2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.

3. Собрать схему электрической цепи согласно рис.5 и предоставить для проверки преподавателю. Тумблер SA11 должен находиться в нижнем положении.

4. Выполнить режим холостого хода, т.е. поставить переключатель SA13 в положение «3». Измерить вольтметром PV1 напряжение холостого хода U_{XX} при двух значениях э.д.с. E. Результаты записать в таблицу 5.

5. Осуществить режим короткого замыкания, т.е. поставить переключатель SA13 в положение «1». Измерить миллиамперметром PA3 силу тока короткого замыкания $I_{KЗ}$ при двух значениях э.д.с. E. Результаты записать в таблицу 5.

6. По формуле (1.3) вычислить сопротивление эквивалентного генератора $R_{ЭГ}$.

Таблица 5. Параметры эквивалентного генератора

E, В	U_{XX} , В	$I_{KЗ}$, mA	$R_{ЭГ}$, кОм
E_1			
E_2			

7. Переключатель SA13 поставить в положение «2» и при двух значениях э.д.с. E_1 и E_2 измерить напряжение и силу тока на сопротивлении нагрузки R_{24} . По закону Ома вычислить величину R_{24} . Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 6.

8. Используя данные таблицы 5, по методу эквивалентного генератора вычислить силу тока и напряжение на сопротивлении нагрузки R_{24} .

9. С помощью тестера измерить входное напряжение $U_{ВХ}=E1=U_{СТ}$, где $U_{СТ}$ – напряжение стабилизации. Решить систему уравнений метода контурных токов (2.1) и вычислить силу тока и напряжение на сопротивлении нагрузки R_{24} . Результаты расчетов занести в таблицу 6 и сравнить с опытными значениями.

10. Используя вольтметр PV1, снять экспериментальную зависимость выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ от э.д.с. E. Результаты измерений занести в таблицу 7.

11. Выбрав соответствующий масштаб, построить график зависимости $U_{ВЫХ}(E)$.

Таблица 6. Метод эквивалентного генератора и контурных токов

E, В		U, В	I, mA	R ₂₄ , кОм
E ₁	Опыт			
	Метод эквивалентного генератора			-
	Метод контурных токов			-
E ₂	Опыт			
	Метод эквивалентного генератора			-
	Метод контурных токов			-

Таблица 7. Зависимость U_{ВЫХ} от E

E, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _{ВЫХ} , В											

Примечание. R₀=R₃= 4,7кОм; R₂=10кОм; R₁=0,2кОм.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Объяснить следующие понятия: ветвь, узел, контур электрической цепи. Какой контур называется независимым?
2. Какие методы применяются для расчета электрических цепей? Объяснить сущность каждого метода.
3. В чем состоит алгоритм расчета по методу контурных токов?
4. Написать систему контурных уравнений для электрической цепи, содержащей 3 независимых контура.
5. Что называется собственным и взаимным сопротивлением, а также контурной э.д.с.?
6. Написать уравнения метода контурных токов для электрической цепи, представленной на рис.6.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением активных и реактивных приемников:

1. Научиться определять параметры электрической цепи переменного тока;
2. Опытным путем определить условия возникновения в данной цепи резонанса напряжения.
3. Построить векторные диаграммы и резонансные кривые при последовательном соединении катушки и конденсатора.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель переменного тока с активным сопротивлением R .

Простейшей цепью переменного тока является цепь, имеющая только сопротивление R . Сопротивление в цепи переменного тока и в цепи постоянного тока ведет себя по-разному.

Переменный ток хуже проходит через сопротивление, чем постоянный. Это объясняется следующими причинами:

- 1) поверхностный эффект;
- 2) вихревые токи;
- 3) перемещение ферромагнитных материалов;
- 4) изменение поляризации диэлектриков.

Все эти явления связаны с выделением тепла, и, значит, переменный электрический ток затрачивает дополнительную энергию. Постоянный ток ни одного из этих явлений не вызывает, поэтому не требует дополнительных затрат энергии.

Сопротивление постоянному току называют омическим. Сопротивление переменному току называют активным. На активном сопротивлении, так же как и на омическом, происходит выделение тепла, пропорциональное выделенной электрической энергии. Разница между омическим и активным

сопротивлением тем больше, чем больше частота переменного тока. Нормированное сопротивление резистора соответствует постоянному току.

Активными сопротивлениями в цепях переменного тока являются нагревательные и осветительные приборы, а так же, как активные сопротивления, проявляют себя все устройства, на которых выделяется полезная мощность в любом виде. Если через активное сопротивление R протекает переменный синусоидальный ток, то на нем действует переменное синусоидальное напряжение. Ток и напряжение имеют одинаковую частоту и совпадают по фазе, поэтому на активном сопротивлении нет сдвига фаз между напряжением и током: $\varphi_R = 0$.

Цепь переменного тока с индуктивностью L и емкостью C .

Индуктивность и емкость проявляют себя в электрических цепях переменного тока как сопротивления.

Катушка индуктивности оказывает переменному току сопротивление, которое называют реактивным сопротивлением индуктивности или индуктивным сопротивлением – X_L . При наличии в цепи одного индуктивного сопротивления сдвиг фаз между напряжением и током $\varphi_L = +90^\circ$. При этом

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (3.1)$$

Формула $X_L = \omega L$ показывает, что сопротивление индуктивности переменному току зависит от частоты. Это означает, что индуктивность по-разному пропускает ток низкой и ток высокой частоты.

Индуктивность не пропускает переменный ток высокой частоты (хуже пропускает). Чем больше частота, тем труднее проходит переменный ток. Катушка индуктивности часто используется для ограничения величины переменного тока.

Конденсатор в электрической цепи переменного тока оказывает сопротивление переменному току, которое называется реактивным сопротивлением емкости, или проще емкостным сопротивлением X_C :

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (3.2)$$

Сдвиг фаз в цепи с емкостью $\varphi_C = -90^\circ$.

Формула $X_C = 1/\omega C$ показывает, что сопротивление емкости переменному току зависит от частоты ω . Это означает, что емкость по разному пропускает ток низкой и высокой частоты. Емкость пропускает переменный ток тем лучше, чем выше частота.

Емкость вообще не пропускает постоянный ток, и это ее важнейшее свойство. Одно из применений конденсатора состоит в том, что его ставят на такие участки цепи, где нежелательно протекание постоянного тока.

Электрические цепи переменного тока

Реальные электрические цепи переменного тока содержат сопротивление R , индуктивность L и емкость C .

Особенностью цепей переменного тока является наличие в них сдвига фаз φ между напряжением и током. Это связано с наличием в электрической цепи реактивных сопротивлений X_L и X_C , что во многом усложняет расчет этих цепей обычными алгебраическими методами. В связи с этим для анализа цепей переменного тока широко используют графические методы с изображением напряжения и тока векторами, т.е. отрезками прямых, имеющих не только величину, но и направление. Такого рода графики называются векторными диаграммами, а сам расчет – методом векторных диаграмм.

Последовательная R-L-цепь.

Электрическую цепь, состоящую из нескольких последовательно соединенных элементов, называют неразветвленной электрической цепью, или просто последовательной электрической цепью (рис. 7).

Особенностью такой цепи является то, что через все элементы цепи независимо от их количества и характера сопротивлений протекает одинаковый общий ток. Общее напряжение питающей цепи равно не просто сумме напряжений на каждом сопротивлении, оно равно векторной сумме, т.е. вектор общего напряжения равен сумме векторов напряжений на каждом участке цепи. При этом вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по направлению с вектором тока, а векторы напряжения на реактивных сопротивлениях образуют с вектором тока угол сдвига фазы φ между током и напряжением.

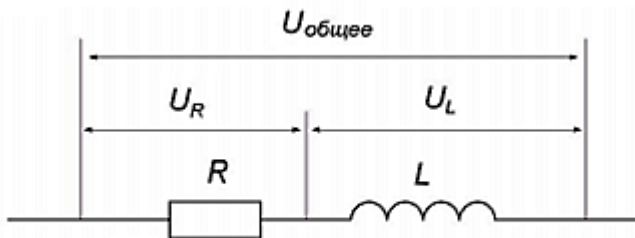


Рис.7. Последовательная R-L-цепь переменного тока

Для расчетов напряжений надо построить векторную диаграмму напряжений.

Треугольник напряжений для расчета R-L цепи

Векторная диаграмма напряжений представлена на рис.8. Для последовательного соединения полное напряжение цепи складывается из напряжений на элементах цепи. Значит, вектор суммарного напряжения $U_{общее}$ равен сумме напряжений на элементах цепи: вектору напряжения на сопротивлении U_R и вектору напряжения на катушке индуктивности U_L .

Алгоритм построения векторной диаграммы.

1. Вектор тока I изображается как горизонтальный вектор слева направо.

2. Откладывается вектор напряжения на активном сопротивлении U_R . Этот вектор направлен горизонтально, т.к. сдвиг фаз между током и напряжением на активном сопротивлении равен нулю.

3. Строится вектор напряжения на катушке индуктивности U_L . Его надо откладывать под углом 90° , т.к. напряжение на

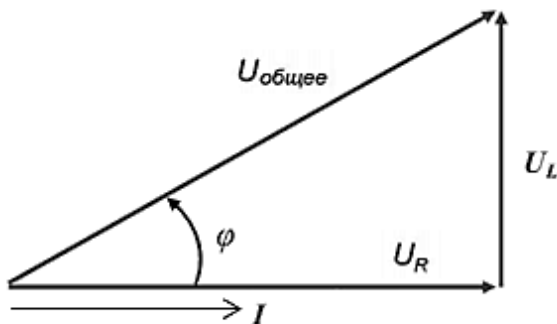


Рис.8. Векторная диаграмма R-L-цепи

катушке опережает ток на 90° .

4. Строится вектор полного напряжения $U_{\text{общее}}$ как векторная сумма двух напряжений: U_R и U_L на элементах цепи.

Получается прямоугольный треугольник. Любую сторону этого треугольника можно найти по теореме Пифагора. Острый угол этого треугольника – это сдвиг фаз φ в этой цепи между током и общим напряжением:

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

Треугольник сопротивлений

Ток при последовательном соединении является общим для всех элементов цепи. Треугольник напряжений позволяет построить треугольник сопротивлений. Для этого каждую сторону треугольника напряжений надо разделить на ток. Полученный треугольник будет подобен треугольнику напряжений. Этот треугольник получается не векторный, а его стороны соответствуют сопротивлениям цепи.

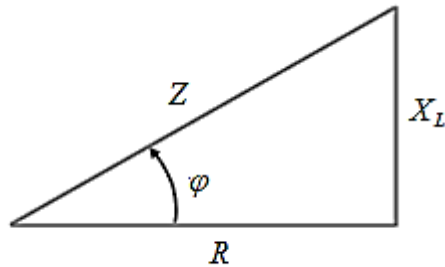


Рис.9. Треугольник сопротивлений R-L-цепи

На рис.9 показано построение треугольника сопротивлений для цепи, имеющей активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X_L .

По теореме Пифагора из треугольника сопротивлений находим полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} . \quad (3.3)$$

Треугольник мощностей

Если каждую сторону треугольника напряжений умножить на один и тот же ток, то получится подобный треугольник, стороны которого пропорциональны мощности (рис. 10).

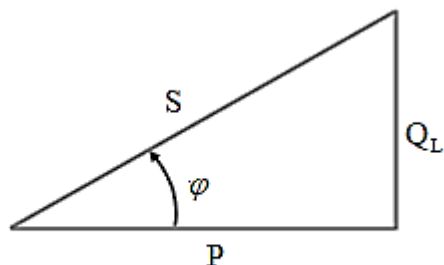


Рис.10. Треугольник мощностей R-L-цепи

Это значит, что расчет мощностей для переменного тока производится также геометрически, потому что необходимо учитывать сдвиг фаз между напряжением и током.

Из треугольника мощностей следует, что в цепях переменного тока различают три вида мощности: активную, реактивную и полную.

Активная мощность P равна произведению напряжения на активную составляющую тока:

$$P = U_R I = UI \cos \varphi. \quad (3.4)$$

Активная мощность расходуется на выполнение приемником полезной работы или выделяется в виде тепла на сопротивлении R .

Реактивная мощность Q_L равна произведению напряжения на реактивную составляющую тока:

$$Q_L = U_L I = UI \sin \varphi. \quad (3.5)$$

Реактивная мощность концентрируется на индуктивности и полезную работу не создает.

Полная мощность S определяется как геометрическая сумма активной и реактивной мощностей и равна

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q_L^2}. \quad (3.6)$$

Полная мощность – это та мощность, которую источник вынужден отдавать цепи. Источник отдает полную мощность, которая больше полезной мощности из-за того, что цепь обладает индуктивностью.

Последовательная R–C-цепь

Конденсаторы часто включают последовательно с сопротивлениями, но если даже специального сопротивления нет, любой конденсатор обладает

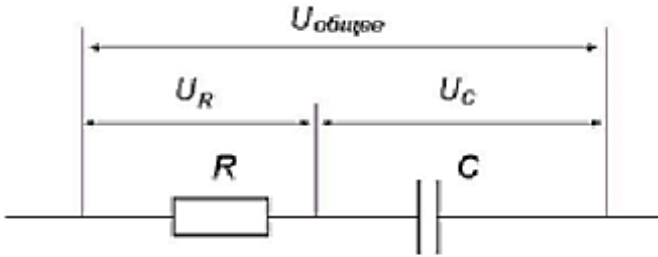


Рис.11. Последовательная R-C-цепь переменного тока

определенной величиной активного сопротивления, которую необходимо учитывать (рис. 11).

Векторная диаграмма напряжений представляет собой прямоугольный треугольник, аналогичный представленной на рис.8, который позволяет определить все составляющие по теореме Пифагора.

Для цепи, состоящей из активного сопротивления и емкости, полное сопротивление равно

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}. \quad (3.7)$$

Напряжение отстает от тока на угол φ , причем сдвиг фаз определяется по формуле

$$\varphi = \text{arctg} \frac{X_C}{R}.$$

Активное сопротивление R, включенное в цепь с катушкой или конденсатором, уменьшает угол сдвига фаз.

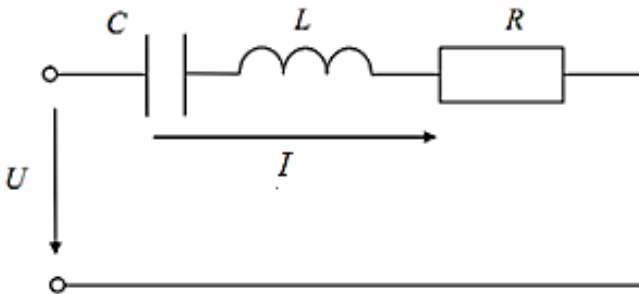


Рис.12. Последовательный колебательный контур

Резонанс напряжений.

Резонансом в электрических цепях называется режим работы электрической цепи переменного тока, содержащей индуктивный и емкостный элементы, при котором сдвиг фаз φ между напряжением и током равен нулю ($\varphi = 0$). Рассмотрим последовательное соединение элементов R , L и C (рис.12). Такую цепь иногда называют последовательным колебательным контуром.

Закон Ома для такой неразветвленной цепи имеет вид:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (3.8)$$

Знаменатель данного выражения есть значение полного сопротивления Z , которое зависит от частоты. При определенных условиях реактивная составляющая полного сопротивления $X = X_L - X_C$ становится равной нулю и полное сопротивление Z становится минимальным

$$Z_{PE3} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = Z_{MIN} = R. \quad (3.9)$$

Ток в цепи возрастает до максимального значения

$$I_{PE3} = \frac{U}{R} = I_{MAX}, \quad (3.10)$$

причем напряжение и ток совпадает по фазе ($\varphi = 0$). Это явление в цепи с последовательным соединением R - L - C элементов получило название резонанса напряжений. Условие, при котором возникает резонанс напряжений, записывается в виде

$$X_L = X_C \text{ или } \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (3.11)$$

где $\omega = \omega_0$ – резонансная угловая частота. Резонансная частота ω_0 определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.12)$$

Эта формула получила название формулы Томпсона. При резонансе напряжений сопротивление катушки индуктивности и конденсатора становятся равными и они полностью компенсируют друг друга. Следовательно,

будут равны и падения напряжений на катушке индуктивности и емкости: $U_L = U_C$.

Напряжение на активном сопротивлении $U_R = IR = U$, т.е. напряжение на активном сопротивлении равно полному напряжению, приложенному к цепи. Векторная диаграмма такого случая приведена на рис. 13.

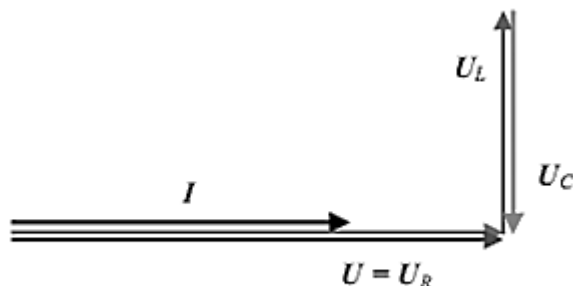


Рис.13. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

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 $P = R \cdot I^2$, а второй – величиной реактивной мощности $Q_L = X_L \cdot I^2 = X_C \cdot I^2 = Q_C$. Колебаний энергии между источником питания и участком цепи, включающим катушку и конденсатор, не происходит, и поэтому реактивная мощность всей цепи равна $Q = X \cdot I^2 = 0$.

Свойства цепи при резонансе напряжений

1. Общее сопротивление становится равным активному сопротивлению, а значит, становится наименьшим.

2. Ток становится наибольшим и совпадает по фазе с напряжением

3. Угол сдвига фаз становится равным нулю и, значит, цепь приобретает чисто активный характер.

4. Напряжение на колебательном контуре, то есть на реактивных элементах L и C , становится максимальным и может многократно превышать напряжение на активном сопротивлении. Вывод: для получения максимального

напряжения на колебательном контуре его необходимо ввести в состояние резонанса.

Колебательные контуры применяются в технике связи для выбора необходимой частоты передачи и приёма сигнала. Например, радиоприёмник принимает ту радиостанцию, частота которой соответствует резонансной частоте входного колебательного контура приёмника. Из условий возникновения резонанса (3.4) следует, что практически резонанс напряжений можно получить следующими способами:

- 1) изменением ёмкости $C = \frac{1}{\omega^2 L}$;
- 2) изменением индуктивности $L = \frac{1}{\omega^2 C}$;
- 3) изменением частоты $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Добротность контура

Во сколько раз напряжение на катушке и конденсаторе может превышать напряжение на активном сопротивлении при резонансе? Для оценки контура при резонансе вводится специальное понятие – добротность контура. Кроме того, добротность контура – параметр, показывающий, как долго в контуре могут сохраняться собственные колебания. Отношение напряжения на индуктивности или ёмкости к напряжению на входе в режиме резонанса называется добротностью контура

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}. \quad (3.13)$$

Чем меньше активное сопротивление, тем меньше потери, тем больше добротность контура.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_L I}{RI} = \frac{U_L}{U}; \quad (3.14)$$

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{X_C I}{RI} = \frac{U_C}{U}. \quad (3.15)$$

При $X_L \gg R$ напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе могут значительно превысить напряжение источника, что опасно для изоляции катушки и конденсатора. В промышленных сетях резонанс напряжений

является аварийным режимом, так как увеличение напряжения может привести к пробое цепи.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Упражнение 1. Определение параметров схемы замещения катушки индуктивности L1

1. Подготовить отчет, изучить теоретический материал и получить допуск на выполнение лабораторной работы у преподавателя.

2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.

3. Собрать электрическую цепь, схема которой представлена на рис. 14, и представить для проверки преподавателю.

4. Установить номинальное значение тока $I_H = 0,8A$ в цепи катушки и измерить входное напряжение и активную мощность, потребляемую цепью.

PA1 – ток через катушку,

PW2 – активная мощность,

PV3 – напряжение на катушке.

Результаты измерений занести в таблицу 8.

Таблица 8. Параметры катушки индуктивности L1

Опыт			Расчет					
U, B	I_H, A	$P, Вт$	$Z_{\Sigma}, Ом$	$X_L, Ом$	$R_K, Ом$	$\varphi, град$	$\cos \varphi$	$C_{PEЗ}, мкФ$

5. Вычислить параметры катушки:

- активное сопротивление цепи $R_{\Sigma} = \frac{P}{I_n^2}$;

- полное сопротивление цепи $Z_{\Sigma} = \frac{U}{I_n}$;

- активное сопротивление катушки $R_K = R_{\Sigma} - R_{17}$, где $R_{17} = 17 Ом$;

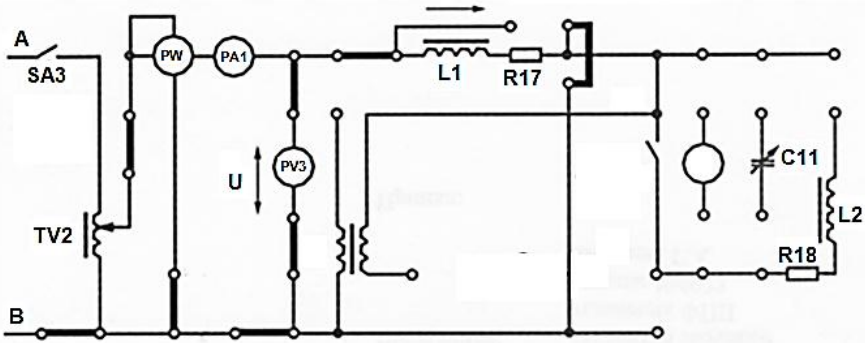


Рис.14. Схема цепи для определения параметров катушки L1

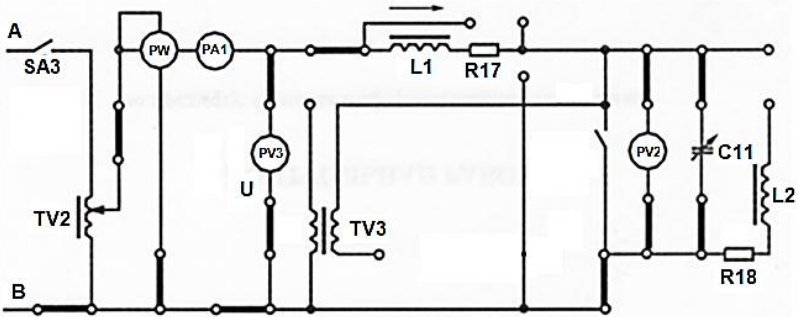


Рис.15. Схема цепи для исследования резонанса напряжений

- индуктивное сопротивление катушки $X_L = \sqrt{Z_{\Sigma}^2 - R_K^2}$;
- коэффициент мощности цепи $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$;
- емкость, при которой наступает резонанс напряжений: $C_{PE3} = \frac{I}{2\pi f X_L}$.

Упражнение 2. Исследование резонанса напряжений

1. Вычислить напряжение U_{\min} , при котором в режиме резонанса ток в цепи не превысит $I_n = 0,8A$:

$$U_{\min} = I_n R_{\Sigma} .$$

2. Установить номинальный ток I_n и экспериментально определить величину емкости C_{11} конденсатора, при которой в цепи наступает резонанс. Измерить входное напряжение U_{\min} и сравнить с расчетным значением в пункте 1.

3. Установить входное напряжение $U=60B$ и измерить силу тока и активную мощность цепи в соответствии с таблицей 9.

4. Используя данные таблиц 8 и 9, вычислить

- емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$;

- угол сдвига фаз $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R_{\Sigma}}$;

- коэффициент мощности $\cos \varphi$;

- активную мощность $P = UI \cos \varphi$.

5. Построить векторную диаграмму напряжений при резонансе и резонансные кривые (графики зависимости силы тока I и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от электроемкости конденсатора C_{11}).

Таблица 9. Резонанс напряжений

Опыт				Расчет		
U, B	$C_{11},$ $мкФ$	I, A	$P, Вт$	$X_C, Ом$	$P, Вт$	$\cos \varphi$
80	5					
	10					
	20					
	30					
	40					
	60					

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Какие виды сопротивлений существуют в цепях переменного тока?

2. Что такое сдвиг фаз?

3. Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления, и в каких единицах их измеряют?
4. Что такое коэффициент мощности?
5. Что такое полное сопротивление цепи, и чему оно равно в случае цепи R–L, R–C.
6. Записать закон Ома для действующих значений однофазной цепи переменного тока.
7. Что такое векторная диаграмма, как она строится для последовательной однофазной цепи переменного тока?
8. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.
9. В какой цепи и при каком условии наступает резонанс напряжений?
10. Объясните энергетические процессы, протекающие в электрической цепи при резонансе напряжений.
11. Объясните, почему при резонансе напряжений ток в цепи максимален? Почему сдвиг фаз φ равен нулю?
12. К каким аварийным последствиям может привести резонанс напряжений в электрических цепях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОДНОФАЗНАЯ ЦЕПЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с параллельным соединением элементов:

- 1) опытное определение условий возникновения в данной цепи резонанса токов;
- 2) вычисление параметры цепи с параллельным соединением элементов;
- 3) построение векторных диаграмм и резонансных кривых при резонансе токов.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Параллельная цепь однофазного переменного тока.

На рис. 16 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

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}, \quad I_2 = \frac{U}{Z_2}, \quad (4.1)$$

где U – действующее значение напряжения источника электрической энергии; I_1, I_2 – токи в параллельных ветвях цепи; Z_1, Z_2 – полные сопротивления ветвей.

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_C^2}, \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2}, \quad (4.2)$$

где R_1, X_C – активное и емкостное сопротивление первой ветви; R_2, X_L – активное и индуктивное сопротивление второй ветви. Вектор тока источника электрической энергии равен сумме векторов токов приемников: $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

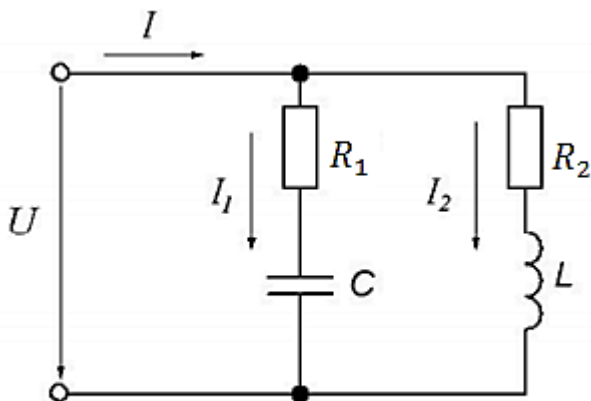


Рис.16. Параллельная цепь переменного тока

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 I_a совпадает по направлению с вектором напряжения U , а вектор реактивной составляющей I_p перпендикулярен этому вектору (рис. 17).

Из треугольника токов (рис. 17) величины активной и реактивной составляющих тока определяются

$$I_a = I \cos \varphi ; \quad I_p = I \sin \varphi , \quad (4.3)$$

где φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

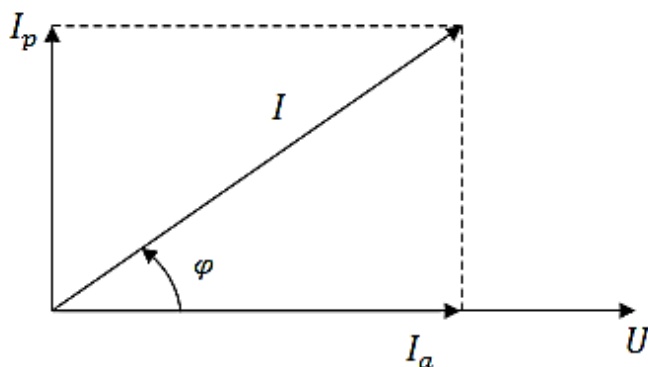


Рис. 17. Разложение тока на активную и реактивную составляющие

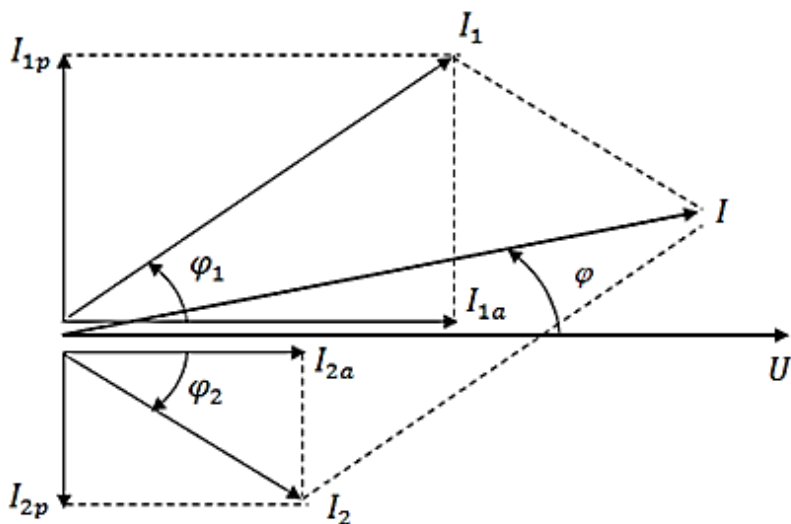


Рис.18. Векторная диаграмма напряжений и токов параллельной цепи переменного тока

На рис. 18 представлена векторная диаграмма напряжений и токов для параллельной цепи переменного тока, приведенной на рис. 16. Величины активной и реактивной составляющих токов приемника

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1; \quad (4.4)$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \quad (4.5)$$

где φ_1 и φ_2 – углы сдвига фаз между вектором напряжения U и векторами токов I_1 и I_2 .

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

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a}; \quad \dot{I}_p = \dot{I}_{1p} + \dot{I}_{2p}; \quad \dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \quad (4.6)$$

Из векторной диаграммы на рис. 18 следует

$$I_a = I_{1a} + I_{2a}; \quad I_p = I_{1p} - I_{2p}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (4.7)$$

Косинус угла сдвига фаз между вектором тока источника I и вектором напряжения источника U определяется из выражения

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} . \quad (4.8)$$

Иногда при расчетах параллельных цепей переменного тока используют понятия проводимости. Активная, реактивная и полная проводимости первой ветви электрической цепи на рис.16 определяются выражениями

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} = \frac{R_1}{R_1^2 + X_C^2}; \quad b_1 = \frac{-X_C}{R_1^2 + X_C^2}; \quad Y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2} . \quad (4.9)$$

Проводимость в комплексной форме:

$$\dot{Y}_1 = g_1 - jb_1 . \quad (4.10)$$

Аналогично, проводимость второй ветви

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{R_2}{R_2^2 + X_L^2}; \quad b_2 = \frac{X_L}{R_2^2 + X_L^2}; \quad Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2} . \quad (4.11)$$

В комплексной форме:

$$\dot{Y}_2 = g_2 + jb_2 . \quad (4.12)$$

Суммарная активная проводимость цепи $g = g_1 + g_2$.

Суммарная реактивная проводимость цепи $b = b_1 + b_2$.

Полная проводимость цепи $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$.

Угол сдвига фаз между общим током цепи и напряжением источника питания

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g} = \arctg \frac{b_1 + b_2}{g_1 + g_2} . \quad (4.13)$$

Величина общего тока, потребляемого цепью с параллельным соединением активных, индуктивных и емкостных сопротивлений, определяется выражением

$$I = U \cdot Y , \quad (4.14)$$

где U – напряжение на зажимах цепи; Y – полная проводимость всей цепи.

Параллельное соединение идеальной емкости и реальной катушки индуктивности.

Рассмотрим электрическую цепь параллельно соединенных идеальной емкости и реальной катушки индуктивности. В большинстве случаев такие допущения делаются на практике (рис. 19).

Рассмотрим три возможных случая.

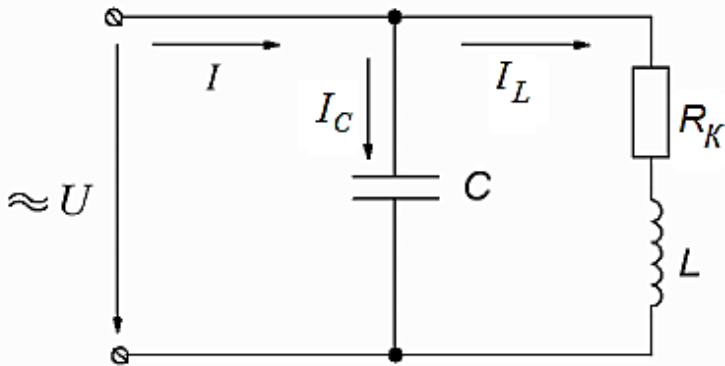


Рис.19. Параллельная цепь однофазного переменного тока

1. При $b_L > b_C$ нагрузка имеет индуктивный характер. Вектор общего тока I отстает по фазе от вектора напряжения U на угол φ (рис. 20).

Ток через конденсатор $I_C = b_C \cdot U$. Ток через индуктивность $I_L = b_L \cdot U$. При этом ток через конденсатор по величине меньше тока через катушку индуктивности $I_C < I_L$.

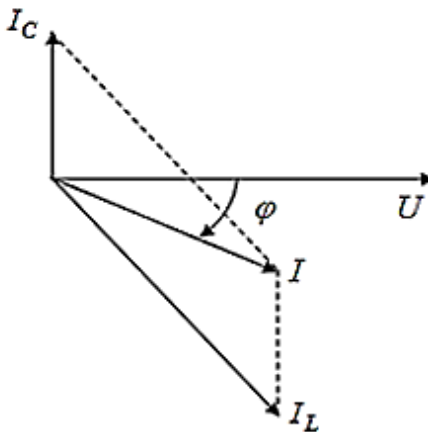


Рис. 20. Векторная диаграмма при $b_L > b_C$

2. При $b_L < b_C$ цепь имеет емкостной характер. Вектор общего тока I опережает по фазе вектор напряжения U

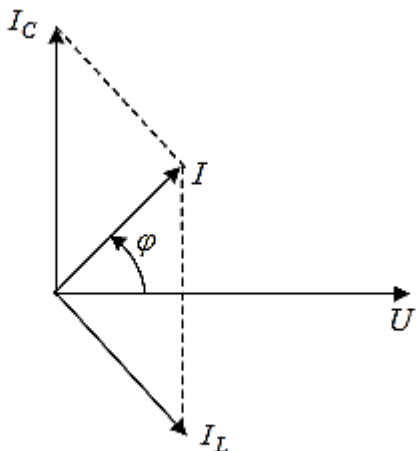


Рис. 21. Векторная диаграмма при $b_L < b_C$

источника на угол φ (рис. 21) Ток через конденсатор по величине больше тока через катушку индуктивности $I_C > I_L$.

3. Если $b_L = b_C$, в цепи наступает *резонанс токов*, при котором сдвиг фаз между общим напряжением и общим током оказывается равным нулю (рис. 22).

Условие резонанса в такой цепи – равенство индуктивной проводимости ветви с катушкой b_L и емкостной проводимости ветви с конденсаторами b_C . Так как $b_L = \frac{X_L}{Z_L^2}$ и $b_C = \frac{1}{X_C}$, то

условие резонанса токов выражается формулой

$$\frac{\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2} = \omega C. \quad (4.16)$$

Частота, при которой в контуре с заданными величинами L и C достигается резонанс токов, называется *резонансной частотой* контура. Из формулы (4.16) следует, что

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}}. \quad (4.17)$$

Здесь $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ называется волновым или характеристическим сопротивлением.

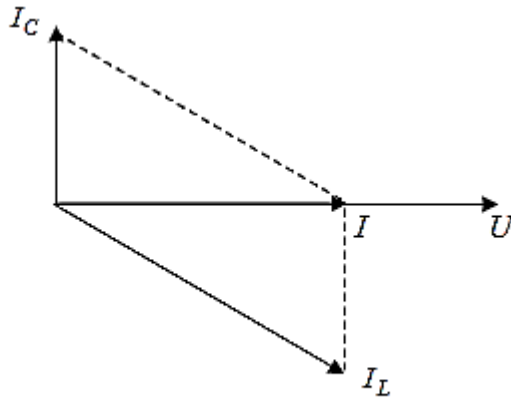


Рис. 22. Векторная диаграмма при $b_L = b_C$

Если пренебречь активным сопротивлением R_K катушки индуктивности (что можно сделать при условии $R_K \ll \omega L$), из уравнения (4.17) находим

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (4.18)$$

т.е. при указанном допущении ($R_K \rightarrow 0$) резонансная частота в разветвленной цепи определяется по такой же формуле, как и резонансная частота в последовательной цепи.

Общее сопротивление цепи при резонансе резко увеличивается, а общий ток I уменьшается и становится минимальным

$$I = U \cdot I = U \cdot \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = U \cdot g. \quad (4.19)$$

Таким образом, полное сопротивление цепи оказывается чисто активным и очень высоким (g – малая величина, определяемая омическим сопротивлением проводов катушки. Энергетический процесс при резонансе можно рассматривать как наложение двух процессов: необратимого преобразования потребляемой от источника энергии в тепло, выделяемое в активном сопротивлении, и процесса, представляющего собой колебание энергии внутри цепи – между магнитным полем катушки индуктивности и электрическим полем конденсатора. Первый процесс характеризуется величиной активной мощности P , а второй – величиной реактивной мощности Q_L и Q_C .

Колебания энергии между источником и цепью не происходит. Если активная проводимость катушки меньше ее индуктивной проводимости, то токи через катушку и конденсатор могут многократно превышать общий ток I . Превышение токов I_C и I_L над общим током характеризует параметр цепи, который называется коэффициентом добротности

$$q = \frac{b_L}{g} = \frac{b_C}{g} = \frac{I_1}{I} \approx \frac{I_2}{I}. \quad (4.20)$$

Резонансные явления широко применяются в электротехнике и радиотехнических устройствах.

Приведенная на рисунке 4.4 схема включения статических конденсаторов параллельно приемникам служит для решения важной энергетической задачи – повышения коэффициента мощности ($\cos \varphi$) заводских установок. Естественный коэффициент мощности большинства промышленных электрических установок не превышает 0,7-0,8 из-за значительного индуктивного тока, потребляемого асинхронными двигателями, наиболее распространенными на предприятиях. При таком коэффициенте мощности установленная мощность трансформаторов на подстанциях использовалась бы только на 70-80 %, так как активная мощность цепи переменного тока зависит в том числе и от $\cos \varphi$:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (4.21)$$

где $UI = S$ – полная мощность трансформаторов, выражаемая в кВА (киловольт-ампер). Ток, потребляемый электрической установкой

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (4.22)$$

Следовательно, чем меньше $\cos \varphi$, тем больший ток потребуется для передачи той же активной мощности P , а значит, необходимо и большее сечение проводов электрической сети. Потери мощности в электрических сетях определяются как:

$$\Delta P = I^2 R = \frac{P^2 R}{U^2 (\cos \varphi)^2}. \quad (4.23)$$

При передаче одной и той же активной мощности потери мощности будут обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности.

Повышение коэффициента мощности ($\cos \varphi$) на промышленных электрических установках дает следующие преимущества:

- возможность подключения дополнительных приемников при той же мощности трансформаторов, установленных на заводских подстанциях;

- возможность уменьшения при той же передаваемой мощности величины тока и соответственно сечений проводов электрических сетей;

- уменьшение при прочих равных условиях потерь мощности и энергии в электрических сетях, а значит увеличение КПД.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Упражнение 1. Определение параметров схемы замещения катушки индуктивности L2

1. Подготовить отчет, изучить теоретический материал и получить допуск на выполнение лабораторной работы у преподавателя.

2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.

3. Собрать электрическую цепь, схема которой представлена на рис. 23, и представить для проверки преподавателю.

4. Установить номинальное значение тока $I_H = 0,8A$ в цепи катушки и измерить входное напряжение и активную мощность, потребляемую цепью. Назначение измерительных приборов:

PA1 – ток через катушку L2,

PW – активная мощность,

PV3 – напряжение на катушке L2.

Результаты измерений занести в таблицу 10.

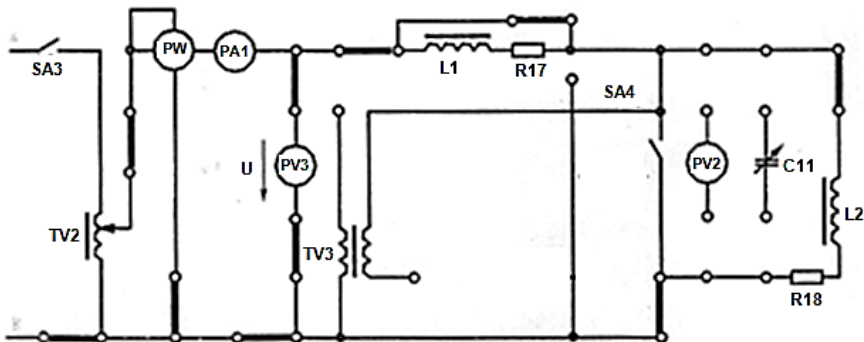


Рис. 23. Схема цепи для определения параметров катушки L_2

Таблица 10. Параметры катушки индуктивности L_2

Опыт			Расчет						
U, В	I, А	P, Вт	$S, B \cdot A$	$Z_{L2}, \text{Ом}$	$X_{L2}, \text{Ом}$	$R_{18}, \text{Ом}$	$\cos \varphi$	$C_{\text{рез}}, \text{мкФ}$	$b_L, \text{мСм}$

5. Вычислить параметры катушки:

- полная мощность цепи $S = U \cdot I$;

- полное сопротивление катушки $Z_{L2} = \frac{U}{I}$;

- активное сопротивление катушки $R_{18} = \frac{P}{I^2}$;

- индуктивное сопротивление катушки $X_{L2} = \sqrt{Z_{L2}^2 - R_{18}^2}$;

- коэффициент мощности цепи $\cos \varphi = \frac{R_{18}}{Z_{L2}}$;

- емкость, при которой наступает резонанс токов

$$C_{\text{рез}} = \frac{X_{L2}}{2\pi f Z_{L2}^2};$$

- реактивная проводимость катушки $b_L = \frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2}$.

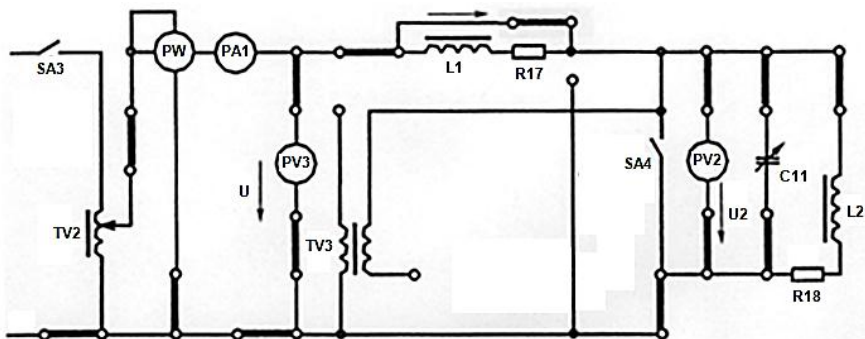


Рис.24. Схема цепи для исследования резонанса токов

Упражнение 2. Исследование резонанса токов

1. Собрать электрическую цепь, схема которой представлена на рис. 24, и представить для проверки преподавателю.

2. Установить номинальное напряжение на входе $U_n = 110\text{ В}$ и измерить силу тока и мощность, потребляемую цепью, в соответствии с таблицей 11.

Таблица 11. Резонанс токов

Опыт				Расчет		
$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$C, \text{мкФ}$	$b_C, \text{мСм}$	$\cos \varphi$	$Y, \text{мСм}$
110			0			
110			4			
110			12			
110			16			
110			20			
110			25			

3. Используя данные таблицы 10, вычислить

- емкостную проводимость $b_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$;

- коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$;

- полную проводимость цепи $Y = \frac{I}{U}$.

4. На одной системе координат построить графики зависимости $b_L, b_C, I, \cos \varphi$ от величины емкости C_{II} .

5. Построить векторную диаграмму токов при $b_C < b_L$ и $b_C > b_L$. Сделать вывод по работе.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое параллельная цепь?
2. Что такое активная и реактивная составляющие тока?
3. Что такое полная, активная и реактивная проводимости?
4. Как выглядит векторная диаграмма для цепи с индуктивной, емкостной нагрузкой и при резонансе токов?
5. Назовите условие резонанса в электрических цепях.
6. Каковы признаки явления резонанса в параллельной цепи?
7. Что такое добротность контура и способы ее измерения?
8. Что определяет добротность конденсатора и катушки индуктивности?
9. Как получить резонанс параллельного колебательного контура на заданной частоте $\omega_{рез}$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ «ЗВЕЗДОЙ»

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой», определение соотношений между линейными и фазными напряжениями при различных режимах работы, построение векторных диаграмм. Выяснение роли нулевого провода в четырехпроводной системе трехфазного тока.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Трехфазная электрическая цепь – это совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга и создаваемые общим источником электрической энергии.

Фаза – отдельная электрическая цепь, входящая в состав трехфазной цепи, в которой может протекать один из токов трехфазной системы. Фазными называют отдельные элементы этой цепи, например, фазные обмотки трехфазного источника и др. общепринятое обозначение фаз трехфазной цепи приведено в таблице 12.

Источник электрической энергии и потребитель соединяются при помощи линейных проводов.

Таблица 12. Обозначение фаз в трехфазных электрических цепях

Фаза	Источник		Приемник	
	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>A</i>	<i>A</i>	<i>X</i>	<i>a</i>	<i>x</i>
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Y</i>	<i>b</i>	<i>y</i>
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Z</i>	<i>c</i>	<i>z</i>

Линейные провода – провода, соединяющие начала одноименных фаз источника и приемника.

В трехфазной электрической цепи различают фазные и линейные токи и напряжения.

Фазное напряжение U_{ϕ} – напряжение между началом и концом фазы источника энергии или приемника.

Фазный ток I_{ϕ} – ток в фазе трехфазной цепи.

Линейный ток $I_{л}$ – ток в линейных проводах.

Линейное напряжение $U_{л}$ – напряжение между линейными проводами или между началами разных фаз.

Если три фазы потребителя имеют одинаковые сопротивления $Z_a = Z_b = Z_c$ и сдвиг фаз φ в фазах одинаковый, то такой приемник (потребитель) называют *симметричным (равномерным)*. Если не соблюдается хотя бы одно из условий равенства, то такой приемник называют несимметричным (неравномерным). В качестве примера симметричной нагрузки можно назвать трехфазные трансформаторы, трехфазные асинхронные двигатели и др. Несимметричной нагрузкой является осветительная сеть. Основными способами соединения фаз генератора и приемника являются соединения звездой и треугольником. В данной лабораторной работе исследуется трехфазная цепь соединения «звездой».

2.2. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ «ЗВЕЗДОЙ»

Соединение, при котором все концы фаз приемника или источника соединены в один узел, а к началам фаз присоединяются линейные провода, называют соединением «звездой». Узел, в котором соединяются концы фаз, называют нулевой или нейтральной точкой.

На рисунке 25 показано соединение «звездой» фаз приемника:

- А-а, В-в, С-с – линейные провода;
- точка N – нулевая (нейтральная) точка генератора, соответственно точка n – нулевая (нейтральная) точка

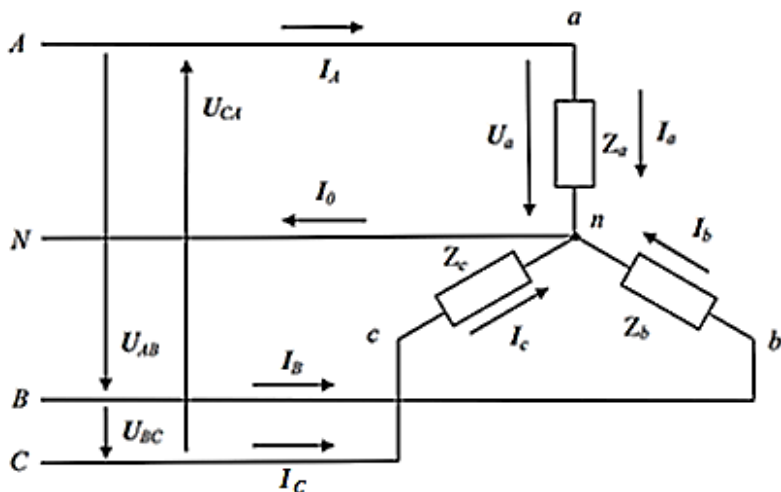


Рис.25. Схема трехфазной цепи при соединении потребителя «звездой»

приемника или потребителя;

- N-n – нулевой или нейтральный провод;
- I_0 – ток в нейтральном проводе (называют нулевым или нейтральным током);
- U_a, U_b, U_c – фазные напряжения приемника (на рисунке показано только одно фазное напряжение – U_a);
- I_a, I_b, I_c – фазные токи потребителя;
- U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – линейные напряжения;
- I_A, I_B, I_C – линейные токи;
- Z_a, Z_b, Z_c – сопротивления фаз нагрузки.

Как видно из рис. 25, если потребители соединены в звезду с нулевым проводом, то фазный ток равен линейному току

$$I_{\Phi} = I_{Л}. \quad (5.1)$$

Тогда ток в нулевом проводе

$$I_0 = I_a + I_b + I_c. \quad (5.2)$$

Линейные напряжения равны разности фазных напряжений

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad (5.3)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad (5.4)$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (5.5)$$

Сложив левые и правые части равенств 5.3–5.5, получим:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0 . \quad (5.6)$$

Соотношения (5.3–5.5) связывают фазные и линейные напряжения при соединении трехфазных приемников звездой и используются для определения значений этих напряжений. Они справедливы для любых видов нагрузки.

2.3. СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

В случае симметричной нагрузки токи в фазах равны и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\dot{Z}_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\dot{Z}_c}; \quad (5.7)$$

Углы сдвига фаз также будут равны и определяются для каждой фазы

$$\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a}; \quad \varphi_b = \arctg \frac{X_b}{R_b}; \quad \varphi_c = \arctg \frac{X_c}{R_c}. \quad (5.8)$$

Векторная диаграмма для случая симметричной нагрузки строится следующим образом (рис. 26).

1. Выбирается масштаб напряжения $M_U = B/см$ и тока $M_I = A/см$.

2. Откладывают в масштабе вектора фазных напряжений U_a, U_b, U_c под углом 120° друг относительно друга.

3. Строят векторы фазных токов I_a, I_b, I_c , которые повернуты относительно векторов соответствующих напряжений U_a, U_b, U_c на углы сдвига фаз $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ (на рис. 5.2 показан случай активно-индуктивной нагрузки).

4. Строят векторы линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Векторы линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} определяются по формулам (5.3–5.5) и равны разности соответствующих фазных напряжений. Из рис. 26 видно, что звезда линейных напряжений опережает звезду фазных напряжений на угол 30° .

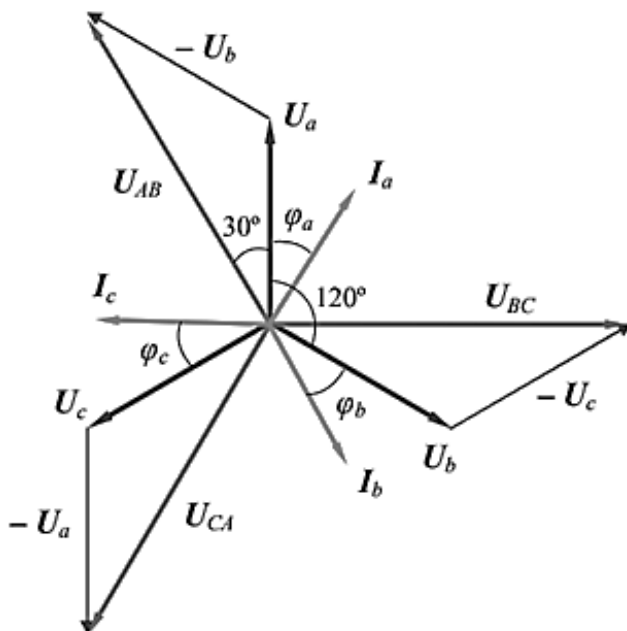


Рис.26. Полярная векторная диаграмма для режима симметричной нагрузки при соединении потребителей «звездой»

Если произвести вычитание векторов фазных напряжений U_a, U_b, U_c по способу параллелограмма, то векторная диаграмма симметричной трехфазной системы будет выглядеть как равнобедренный треугольник (рис.27) и называется топографической векторной диаграммой.

Из топографической векторной диаграммы можно получить соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении «звездой» в случае симметричной нагрузки:

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi. \quad (5.9)$$

Запишем первый закон Кирхгофа для нулевого узла потребителя n

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (5.10)$$

В случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе будет равен нулю (это можно доказать, сложив

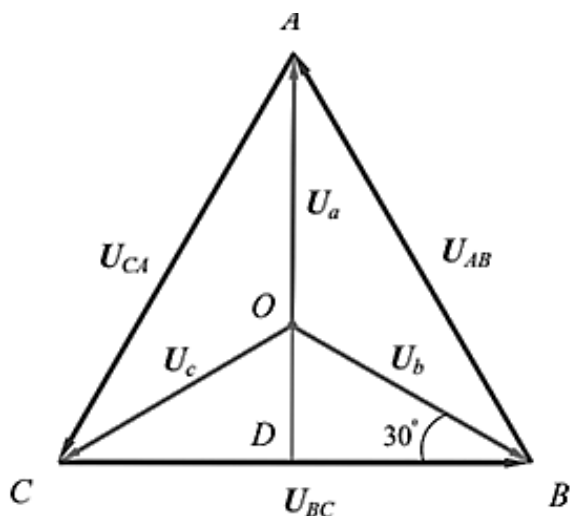


Рис.27. Топографическая векторная диаграмма для симметричной нагрузки при соединении потребителей «звездой»

геометрически вектора фазных токов I_a, I_b, I_c)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (5.11)$$

Если ток в нулевом проводе равен нулю, следовательно, нулевой провод можно не ставить. Поэтому в случае симметричной нагрузки иногда применяется трехпроводное соединение звездой, т.е. соединение потребителей звездой без нулевого провода.

2.4. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Если три фазы потребителя имеют разные сопротивления Z_a, Z_b, Z_c , то фазные токи также будут неравны: $I_a \neq I_b \neq I_c$. Токи могут быть неравными как по величине, так и по направлению. Ток в нулевом проводе в этом случае будет отличен от нуля и определяется по векторной диаграмме (рис. 28) или аналитическим путем.

Из рис. 28 видно, что ток в нулевом проводе I_0 не равен нулю. Значит, возникает падение напряжения между нулевыми точками генератора и приемника U_{Nn} . Это напряжение

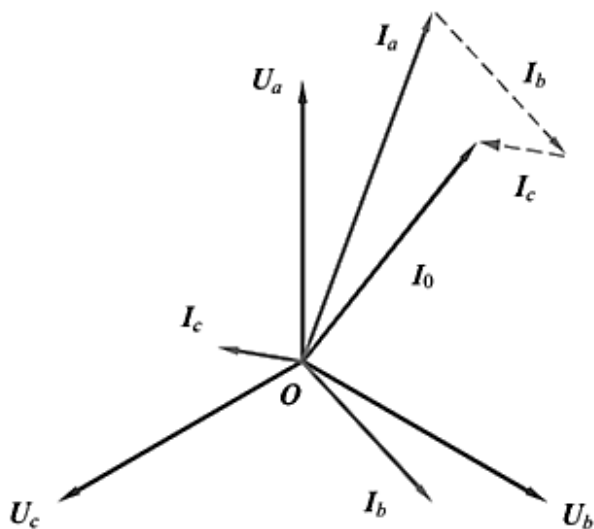


Рис.28. Графический метод определения тока в нулевом проводе при несимметричной нагрузке

называется нулевым напряжением или напряжением смещения нейтрали. Нулевое напряжение позволяет сохранить равенство фазных напряжений U_a, U_b, U_c в условиях неравенства фазных токов.

Нейтральный провод предотвращает возможность возникновения явления «перекоса фаз». Это такое явление, когда в одних фазах напряжение будет повышено, а в других – понижено. Это видно по векторной диаграмме напряжений при несимметричной нагрузке (рис. 29). На этой диаграмме пунктирными линиями обозначены векторы фазных напряжений при симметричной нагрузке. При несимметричной нагрузке нулевая точка при отсутствии нулевого провода смещается в точку O_1 . Напряжение между точками O и O_1 является нулевым напряжением между нулевыми точками генератора и приемника U_{Nn} . Из диаграммы видно, что фазные напряжения U_a, U_b, U_c изменились и неодинаковы как по величине, так и по фазе. Это явление и называется перекосом фаз.

Перекос фаз является нежелательным явлением, так как приводит к неодинаковой работе фазных потребителей трехфазной системы. Например, в случае осветительной сети это

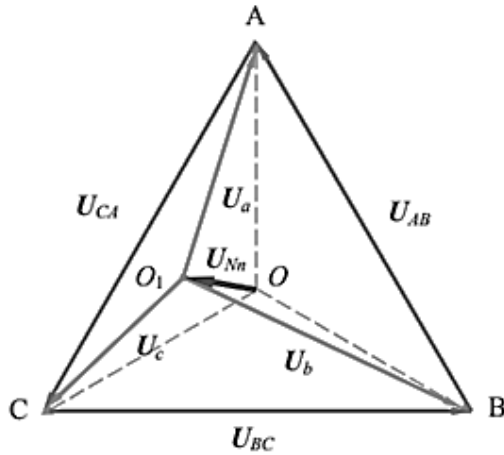


Рис.29. Векторная диаграмма напряжений при несимметричной нагрузке

может привести к тому, что одни лампы дадут незначительную освещенность, а другие могут перегореть из-за повышенного напряжения в фазе. Для обеспечения симметричной системы напряжений во всех фазах и независимой работе отдельных приемников в случае несимметричной нагрузки используется схема «звезда» с нулевым проводом (рис. 25). По технике безопасности на нулевой провод запрещается ставить выключатель, предохранитель. Эта мера применяется для устранения возможности разрыва нулевого провода и, следовательно, возникновения перекоса фаз.

2.5. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ФАЗЫ ПРИЕМНИКА

Короткое замыкание фазы приемника является частным случаем неравномерной нагрузки фаз генератора. При наличии нулевого провода короткое замыкание любой фазы приводит к аварийной ситуации, так как ток в этой фазе резко увеличивается. Короткое замыкание одной из фаз приемника при отсутствии нулевого провода не приводит к аварийной ситуации, так как линейные напряжения сети прикладываются в этом случае к двум другим фазам приемника.

При коротком замыкании одной из фаз, например фазы А, потенциал точки А становится равным потенциалу точки

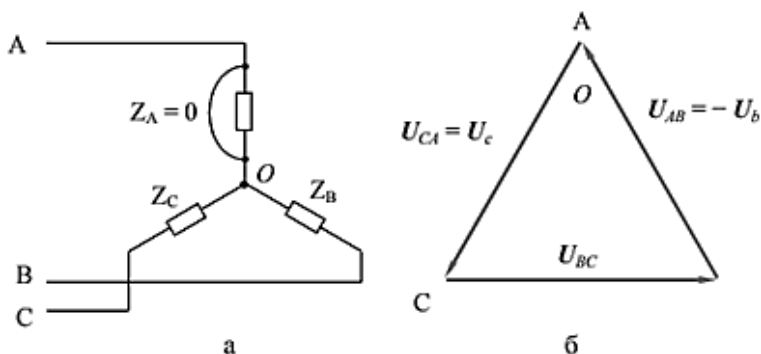


Рис.30. Схема (а) и топографическая диаграмма (б) при коротком замыкании в фазе А

О, тогда напряжение фазы А будет равно нулю, т.е. $U_a = 0$. Следовательно, ток фазы А также будет равен нулю: $I_a = 0$ (рис. 30, а). Нулевая точка О потребителя при этом смещается в точку А. Видно, что напряжения двух других фаз становятся равным линейным напряжениям $U_b = -U_{AB}, U_c = U_{CA}$, т.е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз. Нулевое напряжение становится равным фазному напряжению генератора $U_0 = E_A$.

2.6. ОБРЫВ ЛИНЕЙНОГО ПРОВОДА

При обрыве линейного провода также нужно различать два случая. При обрыве одного линейного провода в трехфазной трехпроводной цепи (т.е. без нулевого провода), например провода А, (рис. 31, а), цепь превращается в однофазную с последовательным соединением приемников и подключенной к одному линейному напряжению, т.е. $U_{AB} = U_b - U_c$. При этом напряжения на фазах В и С распределяются пропорционально их сопротивлениям Z_b и Z_c . Например, если $Z_b = Z_c$, то $U_b = U_c = 0,5U_{BC}$ (рис. 31, б). Нулевая точка О смещается вниз и делит вектор U_{BC} на две равные части.

Если произойдет обрыв одного линейного провода (перегорание предохранителя в фазе, отключение фазы от сети и

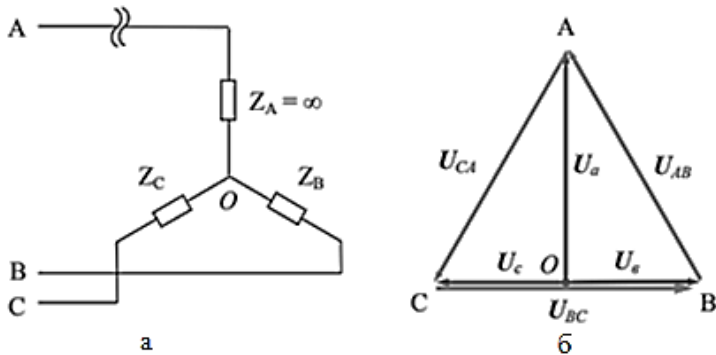


Рис.31. Схема (а) и топографическая векторная диаграмма (б) при обрыве линейного провода А

т.д.) в трехфазной цепи с нулевым проводом, то это приведет к исчезновению тока и напряжения в этой фазе. Напряжения на неповрежденных фазах не изменятся $U_b = U_c = U_\phi$. Так, например, при обрыве фазы А ток в этой фазе становится равным нулю ($I_a = 0$). Ток в нулевом проводе будет равен $I_0 = (I_b + I_c)$.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Подготовить отчет, изучить теоретическую часть и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Собрать схему электрической цепи, показанной на рис. 32, и представить для проверки преподавателю.

Упражнение 1. Исследование симметричной резистивной нагрузки при наличии нейтрального провода

1. Для получения симметричной нагрузки $R_{37} = R_{39} = R_{40}$ необходимо переключками закортить следующие элементы цепи: $R_{38}, C_{11}, L_2, R_{18}$.

2. Подать напряжение на схему включением тумблеров SA14 и SA15, расположенных на передней панели лабораторного стенда.

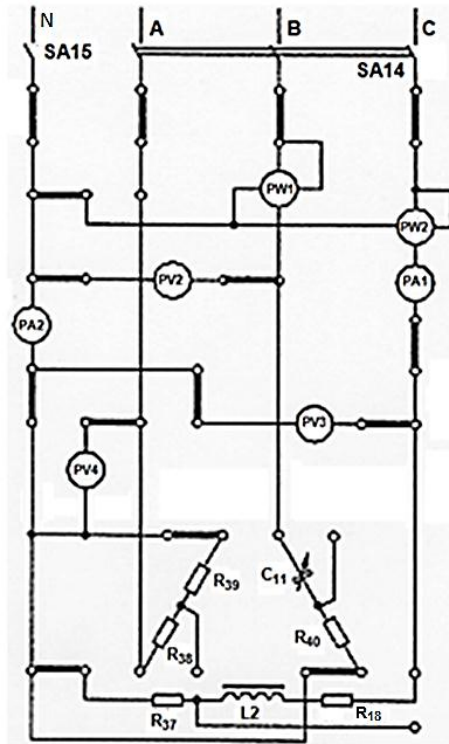


Рис.32. Принципиальная схема исследования трехфазной цепи при соединении потребителей «звездой»

3. Измерить фазные напряжения, силу тока и мощность в соответствии с таблицей 13.

Таблица 13. Опыт симметричной нагрузки (общая точка PW на N)

ОПЫТ					РАСЧЕТ	
$U_{A,B}$	$U_{B,B}$	$U_{C,B}$	I_b, A	$P_{b+c}, Вт$	$R_{37}, Ом$	$P_{b+c}, Вт$

4. Вычислить значения сопротивлений резисторов R_{37}, R_{39}, R_{40} по закону Ома:

$$R_{37} = R_{39} = R_{40} = \frac{U_B}{I_b}.$$

5. Мощность, потребляемая нагрузкой

$$P_{b+c} = 2 \cdot I_b^2 \cdot R_{37}.$$

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 13.

Упражнение 2. Исследование равномерной нагрузки без нейтрального провода

1. Сопротивления фаз нагрузки:

$$Z_a = R_{38} + R_{39};$$

$$Z_b = \sqrt{(R_{37} + R_{18})^2 + X_{L2}^2};$$

$$Z_c = \sqrt{R_{40}^2 + X_C^2}.$$

Приняв $Z_a = Z_b = Z_c$, вычислить значение электроемкости C_{11} для получения равномерной нагрузки по формулам:

$$X_C = \sqrt{(R_{37} + R_{18})^2 + X_{L2}^2 - R_{40}^2};$$

$$C_{11} = \frac{1}{\omega X_C}.$$

2. Вычислить значение сопротивления R_{38} :

$$R_{38} = Z_b - R_{39}.$$

Принять $R_{18} = 70,31 \text{ Ом}$; $X_{L2} = 146,5 \text{ Ом}$.

3. Разомкнуть переключки, шунтирующие элементы $R_{38}, C_{11}, L_2, R_{18}$ и таким образом получить равномерную нагрузку. Тумблером SA15 отключить нейтральный провод, общую точку ваттметра PW подключить к фазе «A».

4. Измерить фазные напряжения, фазный ток в фазе «B» и мощность, потребляемую нагрузкой, в соответствии с таблицей 14.

5. Вычислить напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A \dot{Y}_a + \dot{U}_B \dot{Y}_b + \dot{U}_C \dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c} = \frac{\dot{U}_A / \dot{Z}_a + \dot{U}_B / \dot{Z}_b + \dot{U}_C / \dot{Z}_c}{1 / \dot{Z}_a + 1 / \dot{Z}_b + 1 / \dot{Z}_c}.$$

Таблица 14. Опыт равномерной нагрузки без нейтрального провода (общая точка PW на фазу «А»)

ОПЫТ					РАСЧЕТ			
$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B	$P,$ $Вт$	$I_b,$ A	$I_a,$ A	$I_b,$ A	$I_c,$ A	$P,$ $Вт$

6. Вычислить силу тока в фазах:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}}{Z_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}}{Z_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}}{Z_c}.$$

7. Вычислить активную мощность, потребляемую нагрузкой:

$$P = I_a^2(R_{38} + R_{39}) + I_b^2(R_{37} + R_{18}) + I_c^2 R_{40}.$$

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 14.

Упражнение 3. Исследование равномерной нагрузки с нейтральным проводом

1. Подключить тумблером SA15 нейтральный провод, общую точку ваттметра PW соединить с нейтральным проводом.

2. Измерить фазные напряжения, мощность, силу тока в фазе «B» и нейтральном проводе в соответствии с таблицей 15.

Таблица 15. Опыт равномерной нагрузки с нейтральным проводом (общая точка PW на «N»)

ОПЫТ						РАСЧЕТ			
$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B	$P_{b+c},$ $Вт$	$I_B,$ A	$I_n,$ A	$I_A,$ A	$I_B,$ A	$I_C,$ A	$I_n,$ A

3. Вычислить фазные значения токов и силу тока в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{\dot{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{\dot{Z}_c};$$

$$\dot{I}_n = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

4. Вычислить мощность

$$P_{b+c} = I_b^2 (R_{37} + R_{18}) + I_c^2 R_{40} .$$

Результаты расчетов и измерений занести в таблицу 15.

5. Для каждого режима работы построить в масштабе векторные диаграммы.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Нарисовать электрическую схему соединения трех однофазных приемников «звездой», обозначить все токи и напряжения.

2. Чем отличается симметричная нагрузка от несимметричной?

3. Какие два вида напряжений и токов различают в трехфазных цепях? Дать их определение.

4. Какие существуют соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «звездой»?

5. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «звездой» в случае симметричной нагрузки?

6. Докажите, что в трехфазной цепи при соединении потребителей «звездой» сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

7. Какова роль нулевого провода в четырехпроводной трехфазной цепи?

8. Как определить силу тока в нулевом проводе, если известна сила тока в каждой из фаз?

9. Объяснить построение векторных диаграмм при различных видах нагрузки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки «треугольником», определение соотношений между линейными и фазными токами при различных режимах работы, построение векторных диаграмм.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Трехфазный генератор обеспечивает симметричное напряжение со сдвигом фаз 120° . Обмотки такого генератора обычно соединяются «звездой». Приемники электроэнергии могут быть соединены как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник». Схема включения приемников «треугольником» представлена на рис. 33.

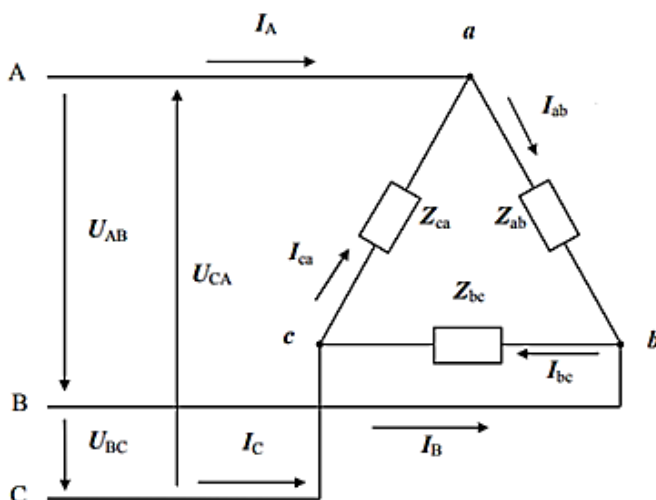


Рис.33. Соединение трехфазного потребителя по схеме «треугольник»

Соединение трёхфазной цепи переменного тока, при котором конец первой фазы соединяется с началом второй, конец второй фазы с началом третьей и конец третьей фазы с началом первой, образуя замкнутый треугольник, к вершинам которого подсоединяются линейные провода, называется соединением типа «треугольник».

В трёхфазных электрических цепях различают линейные, фазные напряжения и токи (рис. 33).

Провода, соединяющие генератор с потребителем, называются линейными. Токи, протекающие в них, обозначаются I_A, I_B, I_C и называются линейными.

Линейные напряжения $U_{Л}$ (напряжения между линейными проводами) принято обозначать U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Они образуют симметричную систему векторов, при этом сумма линейных напряжений в режиме холостого хода равна нулю.

Из схемы, представленной на рис. 33, видно, что при соединении «треугольником» фазные напряжения U_{ϕ} (напряжения между началом и концом фаз) равны линейным напряжениям

$$U_{\phi} = U_{Л}. \quad (6.1)$$

При подключении нагрузки появляются токи в фазах нагрузки I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , которые называются фазными. Они могут быть найдены из следующих соотношений:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_{ab}}, \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\dot{Z}_{bc}}, \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\dot{Z}_{ca}}. \quad (6.2)$$

Условные положительные направления линейных и фазных напряжений, линейных и фазных токов показаны на рисунке 33 стрелками.

В соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов в узле равна нулю. Поэтому, записав для узлов a, b, c первый закон Кирхгофа (рис. 33), можно установить связь между линейными и фазными токами:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad (6.3)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad (6.4)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ac} - \dot{I}_{bc}. \quad (6.5)$$

Сложив эти равенства, получим:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (6.6)$$

Выражения 6.3–6.6 используются при расчетах трехфазной цепи соединением «треугольником», а также для построения векторных диаграмм.

Если нагрузка во всех фазах одинаковая

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}, \quad (6.7)$$

то трехфазная система называется симметричной. Токи в фазах будут равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° относительно друг друга. Тогда при симметричной системе ЭДС получится также симметричная система токов в соответствии с рисунком 6.2.

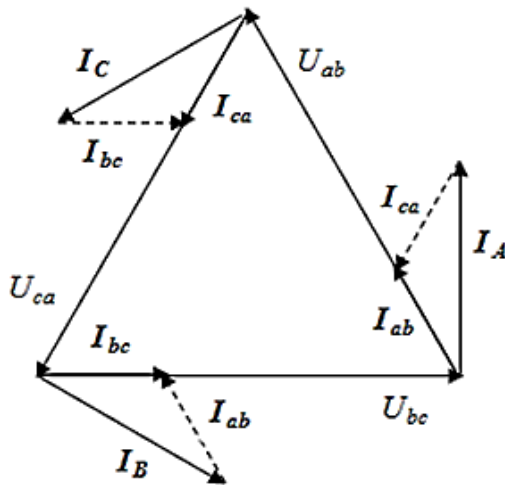


Рис. 34. Векторная диаграмма при соединении симметричной нагрузки «треугольником»

Можно показать, что в случае симметричной системы токов между линейными и фазными токами получается соотношение

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi. \quad (6.7)$$

При несимметричной нагрузке фаз симметрия токов в трехфазной системе с соединением приемника треугольником будет нарушена, но это не отразится на фазных напряжениях, так как здесь на фазы приемника подается непосредственно линейное напряжение, определяемое источником энергии.

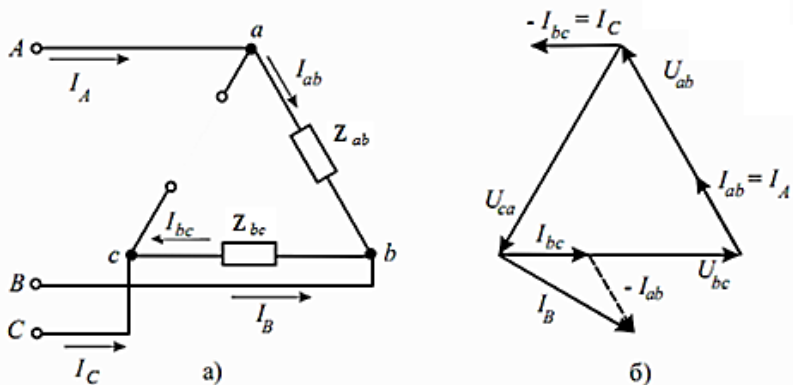


Рис.35. Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при обрыве фазы *ca*

Линейные токи в этом случае определяются графически по векторным соотношениям (6.3) – (6.5).

Несимметричный режим возникает также при обрыве одной из фаз приемника и обрыве линейного провода.

При обрыве одной из фаз, например фазы *ca* (рис.35, а), режим работы двух других фаз не нарушается, так как на них по-прежнему подаются соответствующие линейные напряжения. Для построения векторной диаграммы (рис. 35, б) в этом случае можно воспользоваться соотношениями (6.3) – (6.5), приняв в них ток фазы, в которой произошел обрыв, равным нулю.

При обрыве одного из линейных проводов, например провода *C* (рис.36,а), режим работы одной фазы (в данном случае фазы *ab*) не изменится, а две другие окажутся включенными последовательно на линейное напряжение. Трехфазная система превращается в однофазную с двумя параллельными ветвями. Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, представлена на рис. 36,б.

Зная фазные напряжения и токи, а также углы сдвига фаз между ними, можно определить активные, реактивные и полные мощности фаз приемника:

$$P_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \cos \varphi_{ab}; \quad P_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc} \cdot \cos \varphi_{bc};$$

$$P_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca} \cdot \cos \varphi_{ca}.$$

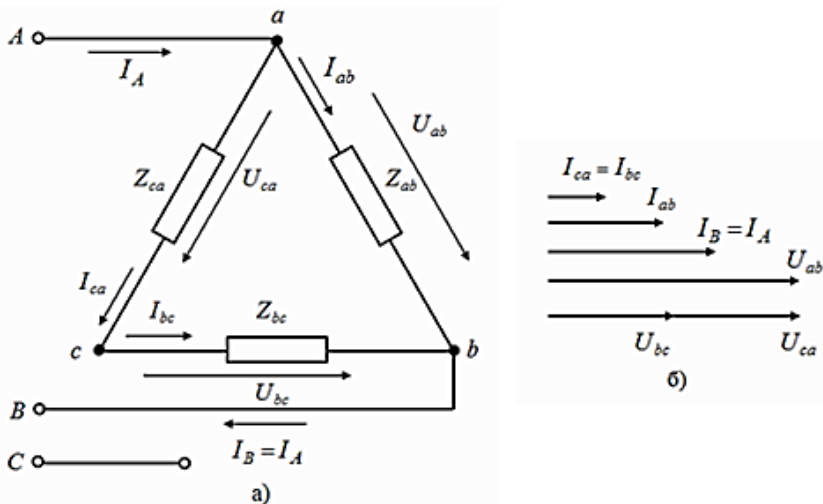


Рис.36. Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при обрыве линейного провода С

$$Q_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \sin \varphi_{ab} ; Q_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc} \cdot \sin \varphi_{bc} ;$$

$$Q_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca} \cdot \sin \varphi_{ca} .$$

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Подготовить отчет, изучить теоретическую часть и получить допуск к выполнению лабораторной работы.

2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.

3. Собрать схему электрической цепи, показанной на рис. 37, и представить для проверки преподавателю.

4. На основании расчетов, сделанных в лабораторной работе №5, набрать на стенде равномерную нагрузку:

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} , \quad \text{где}$$

$$\dot{Z}_{ab} = (R_{37} + R_{18}) + jX_{L2} ; \dot{Z}_{bc} = R_{40} - jX_C ; \dot{Z}_{ca} = R_{38} + R_{39} .$$

5. Измерить активную мощность P , потребляемую нагрузкой, и линейный ток I_B на линии B нагрузке. Линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} измерить приборами PV2 и PV3, устанавливая переключку в положения п.1 или п.2.

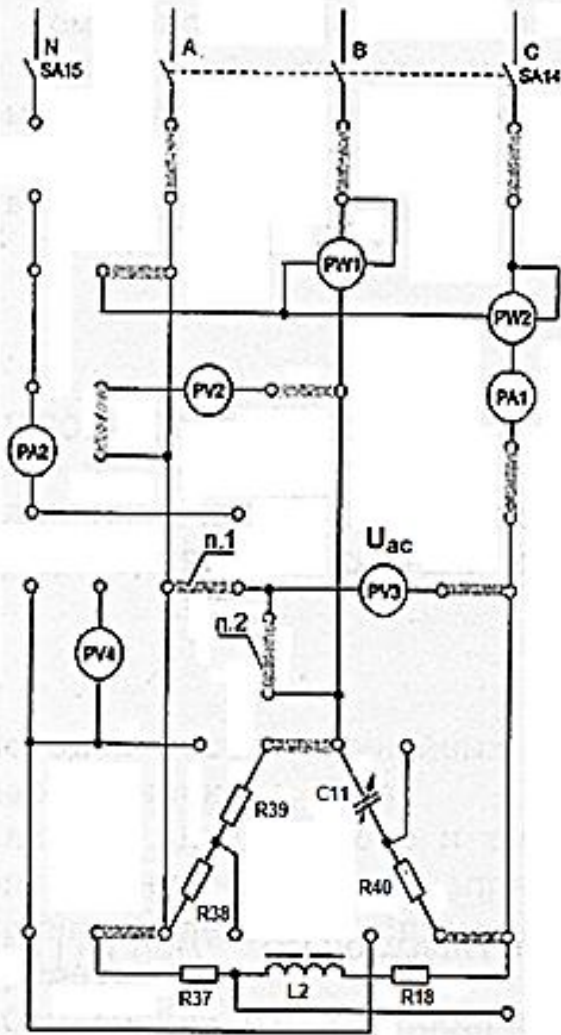


Рис.37. Схема для исследования трехфазной цепи при соединении потребителя «треугольником»

6. Приняв комплексы линейных напряжений равными:

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB} e^{j30^\circ}; \quad \dot{U}_{BC} = U_{BC} e^{-j90^\circ}; \quad \dot{U}_{CA} = U_{CA} e^{j150^\circ},$$

вычислить комплексные значения фазных токов:

$$\dot{i}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{ab}} ; \quad \dot{i}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{bc}} ; \quad \dot{i}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{ca}}.$$

7. Вычислить потребляемую цепью активную мощность:

$$P = I_{ab}^2 (R_{37} + R_{18}) + I_{bc}^2 R_{40} + I_{ca}^2 (R_{38} + R_{39}) .$$

Результаты расчетов и измерений занести в таблицу 16.

8. Используя первый закон Кирхгофа, вычислить комплексные значения линейных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} ; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} ; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} .$$

Таблица 16. Опыт равномерной нагрузки

О П Ы Т					Р А С Ч Е Т			
$U_{AB},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$P,$ $Вт$	$I_B,$ A	$I_{ab},$ A	$I_{bc},$ A	$I_{ca},$ A	$P,$ $Вт$

Вычислить модуль линейного тока I_B и сравнить с экспериментальным значением этого тока. Сделать вывод по работе.

9. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Нарисовать электрическую схему соединения трех однофазных приемников «треугольником».

2. Какая нагрузка в трехфазной цепи называется симметричной и какая несимметричной?

3. Какие два вида напряжений и токов различают в трехфазных цепях? Дать их определение.

4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «треугольником» (нагрузка симметричная и несимметричная)?

5. Докажите, что в трехфазной цепи при соединении потребителей «треугольником» сумма линейных токов всегда равна нулю.

6. Почему при соединении «треугольником» нельзя осуществлять режим короткого замыкания в фазе приемника?

7. Каковы преимущества и недостатки соединения нагрузки «треугольником»?

8. Объяснить построение векторных диаграмм при различных видах нагрузки.

9. Чему равны активная, реактивная и полная мощности трехфазной системы? В каких единицах они измеряются?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин М.В. Электротехника и электроника: учебник / М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2019. - 480 с.

2. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие/ СПб.:СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.

3. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника: учебное пособие /М.: Энергоатомиздат, 1987. – 528 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Элементы электрических цепей

Электромагнитные процессы, протекающие в электротехнических устройствах, как правило, достаточно сложны. Однако во многих случаях их основные характеристики можно описать с помощью таких интегральных понятий, как: напряжение, ток, электродвижущая сила (э.д.с.). При таком подходе совокупность электротехнических устройств, состоящую из соответствующим образом соединенных источников и приемников электрической энергии, рассматривают как электрическую цепь. Электрическая цепь состоит из отдельных частей, выполняющих определенные функции и называемых элементами цепи. Основными элементами цепи являются источники и приемники электрической энергии. Электротехнические устройства, производящие электрическую энергию, называются генераторами или источниками электрической энергии, а устройства, потребляющие ее – приемниками (потребителями) электрической энергии.

У каждого элемента цепи можно выделить определенное число зажимов (полюсов), с помощью которых он соединяется с другими элементами. Различают двух- и многополюсные элементы. Двухполюсники имеют два зажима. К ним относятся источники энергии (за исключением управляемых и многофазных), резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы. Многополюсные элементы – это, например, триоды, трансформаторы, усилители и т.д.

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на активные и пассивные. Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия. К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики, описываемые дифференциальными или алгебраическими уравнениями. Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они

называются линейными, в противном случае они относятся к классу нелинейных. Строго говоря, все элементы являются нелинейными. Возможность рассмотрения их как линейных, что существенно упрощает математическое описание и анализ процессов, определяется границами изменения характеризующих их параметров.

Если параметры элемента не являются функциями пространственных координат, определяющих его геометрические размеры, то он называется элементом с сосредоточенными параметрами. Если элемент описывается уравнениями, в которые входят пространственные переменные, то он относится к классу элементов с распределенными параметрами. Классическим примером последних является линия передачи электроэнергии.

Цепи, содержащие только линейные элементы, называются линейными. Наличие в схеме хотя бы одного нелинейного элемента относит ее к классу нелинейных.

1. Резистивный элемент (резистор)

Условное графическое изображение резистора приведено на рис.П1. Резистор – это пассивный элемент, характеризующийся резистивным сопротивлением. Последнее определяется геометрическими размерами тела и свойствами материала: удельным сопротивлением ρ , ($\text{Ом} \cdot \text{м}$) или обратной величиной – удельной электропроводимостью σ , ($\text{См}/\text{м}$).

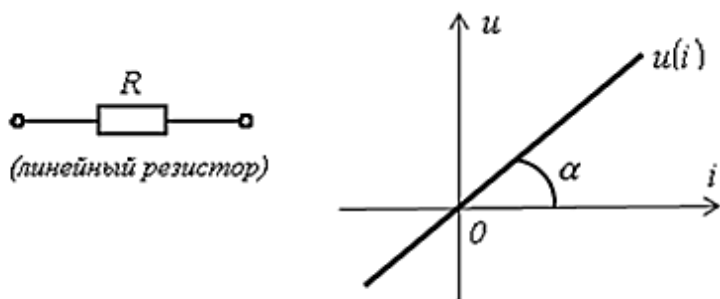


Рис. П1. Условное графическое изображение резистора и его вольт-амперная характеристика

В простейшем случае проводника длиной l и сечением S его сопротивление определяется выражением

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{П. 1})$$

Основной характеристикой резистивного элемента является зависимость, называемая вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Если зависимость представляет собой прямую линию, проходящую через начало системы координат (рис.П1), то резистор называется линейным и описывается соотношением

$$i = \frac{U}{R} = GU, \quad (\text{П. 2})$$

где G – электропроводимость элемента. При этом $R = \text{const}$.

2. Индуктивный элемент (катушка индуктивности)

Условное графическое изображение катушки индуктивности приведено на рис. П2. Катушка – это пассивный элемент, характеризующийся индуктивностью. Для расчета индуктивности катушки необходимо рассчитать созданное ею магнитное поле.

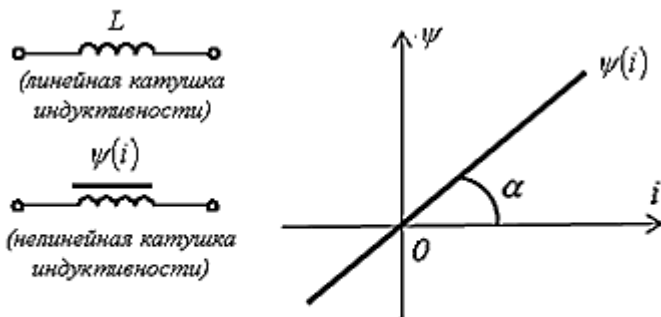


Рис.П2. Условное графическое изображение катушки индуктивности и его вебер-амперная характеристика

Индуктивность определяется отношением потокосцепления к току, протекающему по виткам катушки:

$$L = \frac{\Psi}{i}. \quad (\text{П. 3})$$

В свою очередь потокосцепление равно сумме произведений магнитного потока, пронизывающего витки, на число этих

ВИТКОВ:

$$\Psi = W\Phi. \quad (\text{П.4})$$

Основной характеристикой катушки индуктивности является зависимость $\Psi = \Psi(i)$, называемая вебер-амперной характеристикой. Для линейных катушек индуктивности зависимость представляет собой прямую линию, проходящую через начало системы координат (см. рис. П2).

3. Емкостный элемент (конденсатор)

Условное графическое изображение конденсатора и его кулон-вольтная характеристика приведено на рис. П3.

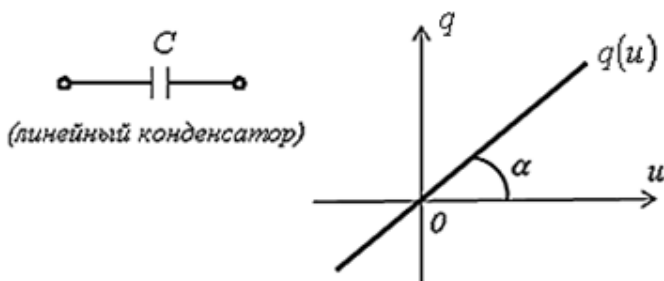


Рис.П3. Условное графическое изображение конденсатора и его кулон-вольтная характеристика

Конденсатор – это пассивный элемент, характеризующийся электроемкостью. Для расчета последней необходимо рассчитать электрическое поле в конденсаторе. электроемкость определяется отношением заряда q на обкладках конденсатора к напряжению U между ними:

$$C = \frac{q}{U} \quad (\text{П. 5})$$

и зависит от геометрии обкладок и свойств диэлектрика, находящегося между ними. Большинство диэлектриков, используемых на практике, линейны, т.е. у них относительная диэлектрическая проницаемость ϵ слабо зависит от напряженности электрического поля. В этом случае зависимость $q(U)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало системы координат (см. рис. П3).

4. Схемы замещения источников электрической энергии

Свойства источника электрической энергии описываются зависимостью $U(I)$, называемой внешней характеристикой источника. В общем случае эта зависимость близка к линейной. Она имеет две характерные точки, которые соответствуют:

a – режиму холостого хода ($U = U_{xx}, I = 0$);

b – режиму короткого замыкания ($U = 0, I = I_{кз}$).

Для большинства источников режим короткого замыкания (иногда холостого хода) является недопустимым. Токи и напряжения источника обычно могут изменяться в определенных пределах, ограниченных сверху значениями, соответствующими номинальному режиму (режиму, при котором изготовитель гарантирует наилучшие условия его эксплуатации в отношении экономичности и долговечности срока службы). Следует отметить, что многие источники (гальванические элементы, аккумуляторы) имеют линейные ВАХ (рис. П4).

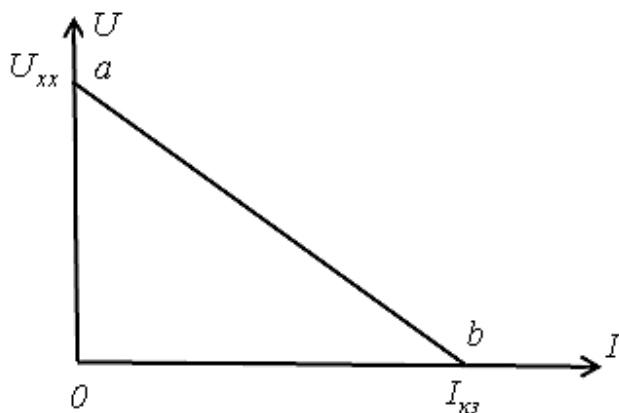


Рис. П4. Вольт-амперная характеристика источника э.д.с.

График на рис. П4 описывается линейным уравнением

$$U = \varepsilon - I \cdot R_{вн} \quad (\text{П. 6})$$

где ε – э.д.с. источника; U – напряжение на зажимах источника; $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника. Отметим, что направления ЭДС и напряжения на зажимах источника противоположны.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Методические указания к выполнению лабораторных работ.....	4
Лабораторная работа № 1. Исследование эквивалентного генератора.....	10
Лабораторная работа № 2. Исследование и расчет линейной электрической цепи с двумя источниками питания.....	17
Лабораторная работа № 3. Последовательное соединение приемников однофазного переменного тока. Резонанс напряжений.....	27
Лабораторная работа № 4. Однофазная цепь с параллельным соединением элементов. Резонанс токов.....	41
Лабораторная работа № 5. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей «звездой».....	53
Лабораторная работа № 6. Трехфазная цепь переменного тока при соединении приемников «треугольником».....	67
Список литературы.....	74
Приложение	75