

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачёва»

Кафедра общей электротехники

Составитель
В. В. Дабаров

Теоретические основы электротехники

Методические указания к лабораторным работам

Рекомендовано учебно-методической комиссией
по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело»
специализации 21.05.04.10 «Электрификация и автоматизация
горного производства» в качестве электронного издания
для использования в учебном процессе

Кемерово 2022

Рецензенты:

Черникова Т. М., проф. кафедры общей электротехники;
Ананьев К. А., председатель учебно-методической комиссии по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело»

Дабаров Владимир Викторович. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам для студентов направления подготовки 21.05.04 «Горное дело» специализации 21.05.04.10 «Электрификация и автоматизация горного производства» очной формы обучения / сост. В. В. Дабаров ; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва – Кемерово, 2022. – Текст : электронный.

Даны краткие теоретические положения, облегчающие подготовку к занятиям, методические указания по выполнению лабораторных работ, требования к оформлению отчётов, правила техники безопасности при выполнении работ, ссылки на литературу. В работе предлагается студенту самостоятельно рассмотреть и решить вопросы подготовки к выполнению, оформлению и защите лабораторных работ по теоретическим основам электротехники.

© Кузбасский государственный
технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 2022

© В. В. Дабаров, составление, 2022

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа №1 Электроизмерительные приборы и измерения основных электрических величин	8
Лабораторная работа №2 Исследование простейших цепей постоянного тока	12
Лабораторная работа №3 Исследование последовательной цепи переменного тока	17
Лабораторная работа №4 Исследование параллельной цепи переменного тока	23
Лабораторная работа №5 Исследование трёхфазной цепи при соединении приёмников по схеме «звезда»	28
Лабораторная работа №6 Исследование трёхфазной цепи при соединении приёмников по схеме «треугольник»	34
Лабораторная работа №7 Исследование электрических цепей, содержащих источник несинусоидального напряжения	38
Список литературы	44

Введение

Выполнение лабораторных работ по теоретическим основам электротехники позволяет закрепить на практике знания, полученные на лекционных занятиях. Лабораторные проводятся на стендах в специально оборудованной для этого аудитории. При выполнении лабораторных работ следует соблюдать правила техники безопасности, на первом занятии преподаватель проводит инструктаж по технике безопасности, и каждый студент расписывается в журнале проведения инструктажа, чем он подтверждает, что он ознакомлен и согласен с правилами.

Общий порядок выполнения лабораторных работ

Перед выполнением лабораторной работы студент должен подготовить заготовку для отчёта, содержащую всё необходимое для выполнения работы: порядок выполнения работы, схемы, таблицы и т.д. Лабораторные выполняются один раз в два занятия, остальные занятия предназначены для консультирования по выполнению расчётной части лабораторной работы и для их защиты. Защита лабораторных работ производится после полного и правильного оформления отчёта по работе, проводится защита в письменной форме – решением задач по теме лабораторной работы. Своевременным выполнением лабораторной работы является защита работы в течении 2х недель после её выполнения.

Отчёт по лабораторной работе должен выполняться на листах формата А4 или на развороте тетрадного листа, при чём не допускается комбинирование этих способов. Графическая часть может быть выполнена на миллиметровой бумаге формата А4, при этом размер всех листов в отчёте должен быть одинаковый.

Отчёт состоит из следующих элементов:

- титульный лист – должен содержать полное название вуза и кафедры, название лабораторной работы, учебную группу студента, ФИО студента и проверяющего преподавателя, год, город;

- цель работы, указанная в методических указаниях к лабораторным работам;
- теоретические положения – добавляются те теоретические положения, которые необходимы для выполнения расчётов к лабораторной работе и для её защиты; этот пункт не является обязательным, и добавляется по усмотрению студента;
- порядок выполнения работы – добавляется по усмотрению студента;
- схемы и таблицы – являются обязательными пунктами, причём должны быть в наличии ещё до начала выполнения работы;
- расчёты – должны обязательно содержать все формулы, используемые в расчётах, а также желательно по одному подробному примеру вычисления для каждой из используемых формул; полностью расписывать все расчёты для всех величин не обязательно;
- графики, диаграммы – выполняются простым карандашом, желательно на миллиметровой бумаге, хотя могут выполняться и на обычных листах формата А4, должны содержать все надписи, а также должны быть выполнены в масштабе, который должен быть указан на рисунке; при построении графиков следует соединять точки плавными линиями.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

Выполнение лабораторных работ связано с опасностью поражения электрическим током. Определяющим фактором воздействия электричества на организм человека является не прикладываемое напряжение, а ток, протекающий через тело человека. Величину тока по характеру воздействия на организм человека можно условно разделить на несколько диапазонов. Это разделение является очень

приблизительным, т.к. воздействие тока зависит от очень многих факторов, таких как телосложение человека, его физическое здоровье, сопротивляемость, состояние кожного покрова, которым он соприкасается с электрооборудованием и т.д. Также помимо величины тока определяющим фактором является время его воздействия и вид тока (переменный или постоянный). Так, при длительном воздействии, последствия более опасны, чем при кратковременном. Переменный ток является более опасным для человека, т.к. он приводит к неконтролируемому сокращению мышц, в том числе и сердца.

- менее 5 мА – неощутимый ток;
- до 30-50 мА – осязаемый ток, не опасный для здоровья человека даже при длительном воздействии (в некоторой степени является даже полезным, такой ток используется в медицине – так называемый «электрофорез»);
- до 100-300 мА – опасный для здоровья ток, воздействие на человека от болевых ощущений до ожогов и повреждений внутренних органов при длительном воздействии; также существует вероятность остановки сердца и парализации органов дыхания;
- от 300-500 мА – опасный для жизни ток, даже при кратковременном воздействии может привести к несовместимым с жизнью повреждениям в организме, а переменный ток при меньших значениях может даже привести к остановке сердца от эффекта фибрилляции.

Чтобы оценить величину протекаемого тока через тела человека, можно приблизительно считать его сопротивление равным 1000 Ом, то есть при напряжении 220 В, ток будет приблизительно равен 220 мА, что является опасным. При выполнении работ напряжение в большинстве случаев не превышает 100 В. Однако, не смотря на уровень напряжения, нужно соблюдать технику безопасности

и свести к нулю вероятность соприкосновения с незаизолированными частями стенов, находящихся под напряжением.

При выполнении лабораторных работ следует пользоваться следующими правилами техники безопасности.

- Перед началом выполнения лабораторной работы следует убедиться в том, что стенд не находится под напряжением, собирать схему следует на обесточенном стенде.
- Включать стенд можно только после проверки правильности сборки схемы преподавателем. Также рекомендуется включать стенд при положении регулятора ЛАТРа «0» (ручка регулятора должна быть выкручена до упора против часовой стрелки), а также при максимальном сопротивлении реостатов.
- В работе используются только целые провода без поврежденной изоляции. Браться за провода при работе следует только за изолированные части.
- Все переключения в цепи следует также выполнять при выключенном стенде.
- При выполнении работ запрещается прикасаться к незаизолированным частям стенов.
- Запрещается оставлять включенный стенд без присмотра. Также следует выключать стенд, если он длительное время не будет использоваться, т.е. стенд должен находиться во включенном состоянии только на время снятия показаний приборов.
- В случае возникновения непредвиденной или опасной ситуации (появился запах сгораемой изоляции, дым, искрение или звук, не соответствующий нормальной работе оборудования, возникла опасность поражения электрическим током и прочее) следует сразу же выключить стенд при помощи автоматического выключателя, расположенного слева на стенде.

После устранения опасной ситуации следует рассказать о случившемся преподавателю.

Лабораторная работа №1

Электроизмерительные приборы и измерения основных электрических величин

Цель работы: изучение принципа действия электроизмерительных приборов, измерение основных электрических величин и определение погрешностей измерений.

Основные теоретические положения

Электроизмерительными приборами называют технические средства с нормированными метрологическими характеристиками, предназначенные для выработки сигналов, функционально связанных с измеряемыми электрическими величинами, в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Различают аналоговые и цифровые приборы. В аналоговых приборах электрическая энергия измеряемой величины преобразуется в механическую энергию подвижной части прибора – стрелки. По способу преобразования различают: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические и др. приборы. Обозначения некоторых систем приборов приведено на рис. 1.1.

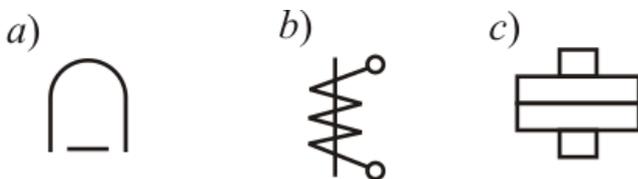


Рис. 1.1.

В магнитоэлектрическом приборе используется воздействие магнитного поля постоянного магнита на подвижную катушку с током I . Угловое перемещение α стрелки прибора:

$$\alpha = SI,$$

где S – чувствительность прибора.

Данные приборы имеют равномерную шкалу.

Для создания вращающего магнитного момента в электромагнитном приборе используется воздействие магнитного поля неподвижной катушки на подвижный сердечник:

$$\alpha = SI^2 \frac{dL}{d\alpha},$$

где L – индуктивность катушки.

Эти приборы имеют неравномерную шкалу.

В механизме электродинамического прибора используется взаимодействие магнитных полей подвижной и неподвижной катушек, по которым проходят токи I_1 и I_2 :

$$\alpha = SI_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}.$$

Электродинамические приборы имеют неравномерную шкалу.

Определение цены деления прибора C осуществляется делением рабочего предела измерения прибора A_m на количество делений шкалы прибора N :

$$C = \frac{A_m}{N}.$$

Для расширения диапазона измерения прибора используют шунты-резисторы, включаемые параллельно амперметру, а также добавочные резисторы, включаемые последовательно с вольтметром.

В этих случаях новые цены делений C' и C'' определяется по формулам:

$$C' = C \left(1 + \frac{R_A}{R_{ш}} \right), \quad (1.1)$$

$$C'' = C \left(1 + \frac{R_d}{R_V} \right), \quad (1.2)$$

где R_A и R_V – внутренние сопротивления амперметра и вольтметра соответственно; $R_{ш}$ – сопротивление шунта; R_d – добавочное сопротивление.

Отличие результатов измерения A от его действительного значения A_0 называется погрешностью измерения. Различают абсолютную погрешность

$$\Delta = A - A_0,$$

относительную

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} \cdot 100\%,$$

приведенную

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_n} \cdot 100\%,$$

где A_n – конечное значение диапазона измерения.

Класс точности приборов численно равен приведенной погрешности.

Задание для самостоятельной подготовки

1. Изучите конструкцию и принцип действия магнитоэлектрического, электромагнитного и электродинамического приборов.
2. Выведите формулы (1.1) и (1.2).
3. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

1. Запишите технические характеристики используемых измерительных приборов в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Название прибора	Тип системы	Род тока	Пределы измерения	Кол-во делений	Цена деления	Класс точности	Внутр. сопр, Ом
Амперметр							
Вольтметр							

2. Поочередно соберите электрические цепи, приведенные на рис. 1.2 и 1.3.

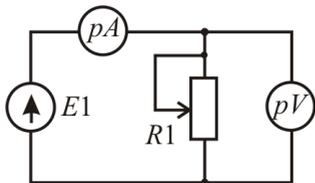


Рис. 1.2.

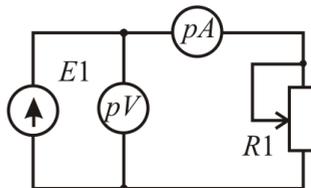


Рис. 1.3.

В каждом случае, задаваясь тремя значениями сопротивления переменного резистора R_1 , предварительно замеренными с помощью омметра, определите показания приборов.

Вычислите значения сопротивления R_1 по формулам:

для схемы рис. 1.2

$$R_1 = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}},$$

для схемы рис. 1.3

$$R_1 = \frac{U - IR_A}{I}.$$

Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности измерений, считая действительными значениями сопротивления R_{10} величины, определенные омметром. Результаты занесите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Схема измерений	Измерено			Вычислено		
	U , В	I , А	R_{10} , Ом	R_1 , Ом	Δ , Ом	δ , %
По рис. 1.2						
По рис. 1.3						

Лабораторная работа №2

Исследование простейших цепей постоянного тока

Цель работы: экспериментальная проверка основных теоретических соотношений и зависимостей между токами, напряжениями, мощностями и сопротивлениями в простейших электрических цепях постоянного тока.

Основные теоретические положения

Закон Ома для резистивного участка цепи, не содержащего источников энергии:

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

Активная мощность этого участка цепи:

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

В последовательной цепи, приведённой на рис. 2.1, через все элементы протекает один и тот же ток. Напряжение источника равно арифметической сумме напряжений на всех резистивных участках цепи:

$$U = \sum_{k=1}^n U_k.$$

Эквивалентное (общее) сопротивление последовательной цепи равно сумме сопротивлений всех участков этой цепи:

$$R_{\text{Э}} = \sum_{k=1}^n R_k.$$

Оно может быть найдено по экспериментальным значениям напряжения источника U и тока цепи I с помощью закона Ома:

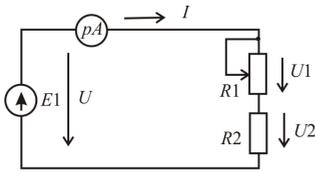


Рис. 2.1.

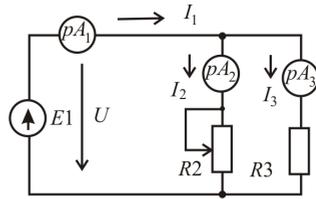


Рис. 2.2.

$$R_{\text{Э}} = \frac{U}{I}.$$

При изменении одного из сопротивлений последовательной цепи максимальная мощность выделяется на данном участке при равенстве данного сопротивления сумме всех остальных сопротивлений цепи.

В параллельной цепи, приведенной на рис. 2.2, все ветви находятся под одним и тем же напряжением U , а токи в ветвях обратно пропорциональны их сопротивлениям.

Общий ток равен арифметической сумме токов ветвей:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k.$$

Эквивалентная резистивная проводимость параллельной цепи равна сумме проводимостей всех ветвей цепи:

$$g_{\text{Э}} = \sum_{k=1}^n g_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

Эквивалентное резистивное сопротивление в параллельной цепи

$$R_{\text{Э}} = \frac{1}{g_k} = \frac{I}{U},$$

где U и I – напряжение и ток источника.

Последовательно-параллельная электрическая цепь, приведенная на рис. 2.3, является комбинацией участков, соединенных последовательно и параллельно. К отдельным участкам такой цепи применимы соотношения между напряжениями, токами и сопротивлениями, имеющими место в последовательной и параллельной цепях.

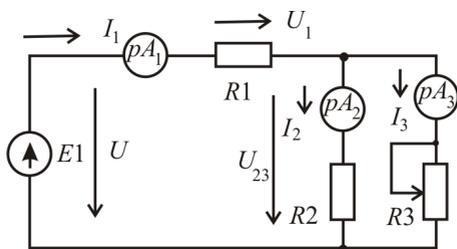


Рис. 2.3.

Ток в каждой из параллельных ветвей может быть найден по формуле разброса токов в параллельных ветвях, например, для схемы рис. 2.3:

$$I_2 = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3},$$

$$I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3},$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Для схемы на рис. 2.1 запишите формулы зависимостей $I = f(R_1)$, $P_1 = f(R_1)$, по полученным формулам постройте графики.
2. Для схемы на рис. 2.2 получите зависимости $I_2 = f(R_2)$, $P_2 = f(R_2)$ и постройте их графики.
3. Для схемы на рис. 2.3 запишите формулы зависимостей $I_1 = f(R_3)$, $I_2 = f(R_3)$, $I_3 = f(R_3)$, $P_3 = f(R_3)$. Постройте по этим формулам графики.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме на рис. 2.1. При неизменном напряжении источника исследуйте влияние на изменение тока и напряжений на элементах цепи величины сопротивления R_1 . Результаты измерений занесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№	Измерено				Вычислено						
	$I,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$U,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_Э,$ Ом	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P,$ Вт	
1											
2											
3											
4											
5											
6											

Постройте совмещенные графики зависимостей $I, U_1, U_2, P_1, P = f(R_1)$.

2. Соберите электрическую цепь по схеме на рис. 2.2.

При неизменном напряжении источника исследуйте зависимость тока источника (общего тока) и токов в параллельных ветвях от величины сопротивления R_2 . Результаты измерений занесите в табл. 2.2.

Постройте совмещенные графики зависимостей $I_1, I_2, I_3, P_3, P = f(R_2)$.

3. Соберите электрическую цепь по схеме на рис. 2.3.

При неизменном напряжении источника исследуйте влияние величины сопротивления R_3 на ток источника, токи в параллельных ветвях и напряжения на участках цепи. Результаты измерений занесите в табл. 2.3.

Постройте совмещенные графики зависимостей $I_1, I_2, I_3, U_1, U_{23}, P_1, P_2 = f(R_3)$.

Таблица 2.2

№	Измерено				Вычислено					
	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\Sigma},$ Ом	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Таблица 2.3

№	Измерено						Вычислено							
	$U,$ В	$U_1,$ В	$U_{23},$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\Sigma},$ Ом	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт
1														
2														
3														
4														
5														
6														

Лабораторная работа №3

Исследование последовательной цепи переменного тока

Цель работы: экспериментальная проверка основных теоретических соотношений между током, напряжениями и мощностями на участках цепи, сдвига фаз между приложенным напряжением и током при изменении одного из сопротивлений элементов цепи.

Основные теоретические положения

Элементами цепи переменного тока являются: активные сопротивления, катушки индуктивности и конденсаторы.

В катушке индуктивности, в свою очередь, выделяются индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ и собственное активное сопротивление R_k , обусловленное сопротивлением проводов обмотки.

Полное сопротивление катушки индуктивности Z_k определяется по треугольнику сопротивлений индуктивного элемента, приведенному на рис. 3.1:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}$$

Полное сопротивление последовательной цепи, состоящей из резистора R и катушки, можно определить по закону Ома:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{(R + R_k)^2 + X_L^2}$$

Напряжение на резисторе U_R совпадает по фазе с током I , а напряжение на катушке U_k опережает ток на угол φ_k . Действующие значения этих напряжений равны:

$$U_R = R \cdot I,$$

$$U_k = Z_k \cdot I.$$

Приложенное к цепи напряжение источника опережает ток на угол φ :

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

Активная мощность катушки P_k и активная мощность цепи P равны:

$$P_k = R_k \cdot I^2 = U_{ак} \cdot I,$$

$$P = (R + R_k) I^2 = UI \cos \varphi.$$

При изменении сопротивления резистора от 0 до ∞ активная мощность достигает максимума при $R + R_k = X_L$:

$$P_M = \frac{U^2}{2(R + R_k)}.$$

Реактивная мощность индуктивной катушки равна

$$Q_L = UI \sin \varphi = X_L I^2 = U_{\text{рк}} I.$$

При изменении X_L от 0 до ∞ реактивная мощность максимальна при $X_L = R + R_{\text{к}}$:

$$Q_{L\text{м}} = \frac{U^2}{2X_L}.$$

Полная мощность цепи определяется по формуле:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = ZI^2.$$

Полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора R и конденсатора с емкостным сопротивлением $X_C = \frac{1}{\omega C}$, можно найти по треугольнику сопротивлений, изображенному на рис. 3.2:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

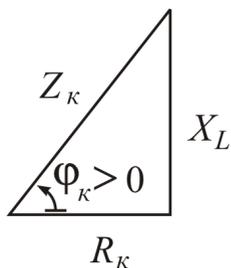


Рис. 3.1.

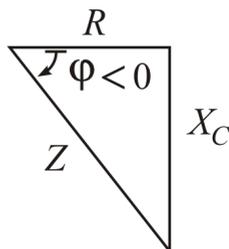


Рис. 3.2.

Напряжение на конденсаторе U_C отстает по фазе от тока в цепи на угол 90° , т. е. $\varphi_C = -90^\circ$.

Действующее значение напряжения U_C равно

$$U_C = X_C I.$$

Активная и полная мощности цепи определяются по формулам:

$$P = UI \cos \varphi = RI^2;$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = ZI^2.$$

Реактивная мощность конденсатора

$$Q_C = UI \sin \varphi = -X_C I^2 = -U_C I.$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Для исследуемой электрической цепи, схема которой показана на рис. 3.3, на основе анализа приведенных в работе формул постройте качественно:

а) графики $I = f_1(R)$, $P = f_2(R)$, $Q = f_3(R)$;

б) топографические диаграммы для случаев: $X_L > R > R_k$ и $R > X_L > R_k$;

в) треугольник мощностей.

2. Для исследуемой электрической цепи, схема которой показана на рис. 3.4, постройте качественно:

а) графики $I = f_4(R)$, $P = f_5(R)$, $Q = f_6(R)$;

б) топографические диаграммы для случаев: $R < X_C$, $R = X_C$, $R > X_C$;

в) треугольник мощностей.

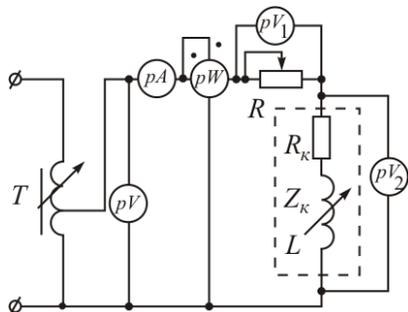


Рис. 3.3.

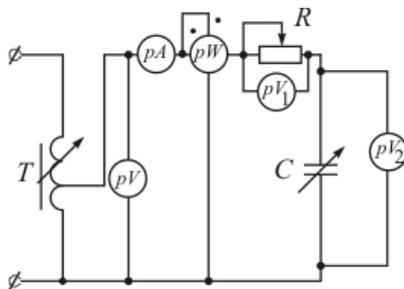


Рис. 3.4.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.3. При полностью выведенном сопротивлении резистора R ($R = 0$) измерьте показания приборов и рассчитайте параметры катушки индуктивности.

Результаты занесите в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ опыта	Измерено					Вычислено										
	U	U_1	U_2	I	P	Z	R	Z_K	$R + R_K$	R_K	X_L	$\cos \varphi$	φ	Q	S	
	В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	–	град	ВАр	ВА	
Опыт для определения Z_K, R_K, X_L		0														
1																
2																
3																
4																
5																
6																

2. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимость тока, напряжений на участках цепи и активной мощности от величины R , изменяя ее от 0 до ∞ (режим холостого хода). Результаты опытов занесите в табл. 3.1.

3. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимость тока, напряжений на участках цепи и активной мощности от сопротивления катушки X_L . Результаты опытов занесите в табл. 3.2.

4. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.4. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимость тока, напряжений на элементах цепи и активной мощности от величины R . Результаты опытов занесите в табл. 3.3.

Таблица 3.2

№ опыта	Измерено					Вычислено									
	U	U_1	U_2	I	P	Z	R	Z_k	$R + R_k$	R_k	X_L	$\cos \varphi$	φ	Q	S
	В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	–	град	ВАр	ВА
1															
2															
3															
4															
5															
6															

Таблица 3.3

№ опыта	Измерено					Вычислено						
	U	U_1	U_2	I	P	Z	R	X_C	$\cos \varphi$	φ	Q	S
	В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	–	град	ВАр	ВА
1												
2												
3												
4												
5												
6												

5. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимость тока, напряжений на элементах цепи и активной мощности от сопротивления конденсатора X_C . Результаты занесите в табл. 3.4.

6. На основании опытных данных выполните необходимые расчеты и заполните табл. 3.1 – 3.4.

7. Постройте графики зависимостей I , U_1 , P , Q , $\cos \varphi$ от величины $(R + R_k)$ по данным табл. 3.1; I , U_2 , P , Q , $\cos \varphi$ от величины X_L по данным табл. 3.2; I , U_1 , P , Q , $\cos \varphi$ от величины R по данным табл. 3.3; I , U_2 , P , Q , $\cos \varphi$ от величины X_C по данным табл. 3.4.

8. Постройте векторные (топографические) диаграммы для одного из опытов по данным табл. 3.1 или табл. 3.2 и для одного из опытов по данным табл. 3.3 или табл. 3.4.

9. Постройте треугольники мощностей для тех же опытов, что

Таблица 3.4

№ опыта	Измерено					Вычислено						
	U	U_1	U_2	I	P	Z	R	X_C	$\cos \varphi$	φ	Q	S
	В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	–	град	ВАр	ВА
1												
2												
3												
4												
5												
6												

и в предыдущем пункте. Найдите по ним полную мощность и сравните ее с расчетной. Сравните угол φ в треугольниках мощностей с $\angle \varphi$ в векторных диаграммах, построенных для соответствующих опытов.

Лабораторная работа №4

Исследование параллельной цепи переменного тока

Цель работы: экспериментальная проверка основных теоретических соотношений и зависимостей между напряжением, токами и мощностями при изменении проводимости активной или реактивной ветви.

Основные теоретические положения

Полную, активную и реактивную проводимости катушки индуктивности по схеме рис. 4.1 можно определить по формулам:

$$y_k = \frac{I_k}{U},$$

$$g_k = \frac{P}{U^2},$$

$$b_L = \sqrt{y_k^2 - g_k^2}.$$

Катушке индуктивности будет соответствовать треугольник проводимостей, показанный на рис. 4.2.

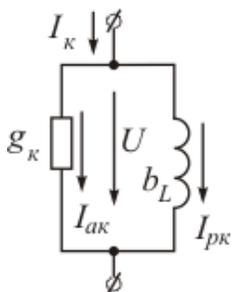


Рис. 4.1.

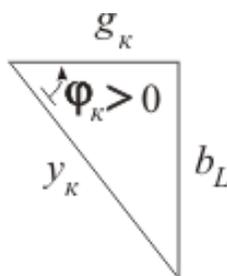


Рис. 4.2.

При параллельном соединении резистора и катушки индуктивности полная проводимость цепи

$$y = \frac{I}{U} = \sqrt{(g_R + g_k)^2 + b_L^2},$$

где g_k – активная проводимость резистора.

Ток катушки

$$I_k = \sqrt{I_{ак}^2 + I_{рк}^2},$$

$$I_{ак} = g_k U,$$

$$I_{рк} = b_L U.$$

Общий ток цепи

$$I = \sqrt{(I_R + I_{ак})^2 + I_{рк}^2}.$$

Мощности цепи определяются по формулам:

$$P = (g_R + g_k) U^2,$$

$$Q_L = I_{рк} U = b_L U^2,$$

$$S = UI = yU^2.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I_R + I_{ак}}{I}.$$

Активная проводимость конденсатора обычно не учитывается, так как его активные потери малы. При параллельном включении резистора и конденсатора полная проводимость цепи равна

$$y = \frac{I}{U} = \sqrt{g_R^2 + b_C^2},$$

где $b_C = \omega C$.

Общий ток цепи

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2},$$

где $I_R = g_R U$, $I_C = b_C U$.

Мощности цепи определяются по формулам:

$$P = I_R U = g_R U^2,$$

$$Q_C = -I_C U = -b_C U^2,$$

$$S = UI = yU^2.$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Для цепи, схема которой показана на рис. 4.3, качественно постройте:

а) векторную диаграмму и треугольник мощностей при $g_1 = b_L = 0,2g_k$;

б) графики I_1 , P , $\cos \varphi$ в зависимости от величины $(g_1 + g_k)$ при $b_L = \text{const}$;

в) графики I_2 , I , Q_L в зависимости от b_L при $(g_1 + g_k) = \text{const}$.

2. Для цепи, схема которой показана на рис. 4.4, качественно постройте:

а) векторную диаграмму и треугольник мощностей при $g_1 = 2b_C$;

б) графики I , P , $\cos \varphi$ в зависимости от величины g_1 при $b_C = \text{const}$;

в) графики I_2 , I , Q_C в зависимости от b_C при $g_1 = \text{const}$.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 4.3. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимости токов и активной мощности от величины g_1 . Результаты опытов занесите в табл. 4.1.

2. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимости токов и активной мощности от величины b_L . Результаты опытов занесите в табл. 4.2.

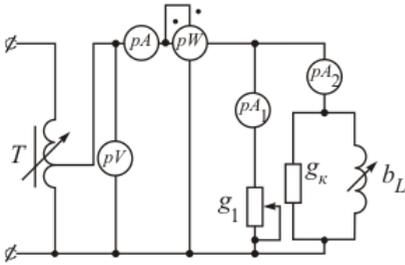


Рис. 4.3.

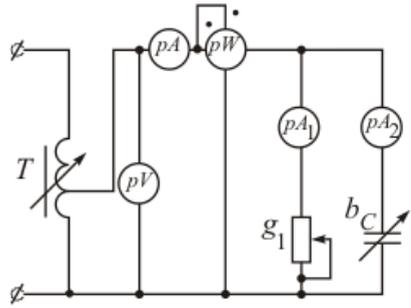


Рис. 4.4.

Таблица 4.1

№ опыта	Измерено					Вычислено									
	U В	I А	I_1 А	I_2 А	P Вт	y См	g_1 См	y_k См	$g_1 + g_k$ См	g_k См	b_L См	$\cos \varphi$ -	φ град	Q ВАр	S ВА
1															
2															
3															
4															
5															
6															

Таблица 4.2

№ опыта	Измерено					Вычислено									
	U В	I А	I_1 А	I_2 А	P Вт	y См	g_1 См	y_k См	$g_1 + g_k$ См	g_k См	b_L См	$\cos \varphi$ -	φ град	Q ВАр	S ВА
1															
2															
3															
4															
5															
6															

3. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 4.4. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимости токов и активной мощности от величины g_1 . Результаты опытов занесите

в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ опыта	Измерено					Вычислено						
	U	I	I_1	I_2	P	y	g_1	b_C	$\cos \varphi$	φ	Q	S
	В	А	А	А	Вт	См	См	См	–	град	ВАр	ВА
1												
2												
3												
4												
5												
6												

4. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимости токов и активной мощности от величины b_C . Результаты опытов занесите в табл. 4.4.

Таблица 4.4

№ опыта	Измерено					Вычислено						
	U	I	I_1	I_2	P	y	g_1	b_C	$\cos \varphi$	φ	Q	S
	В	А	А	А	Вт	См	См	См	–	град	ВАр	ВА
1												
2												
3												
4												
5												
6												

5. На основании опытных данных выполните необходимые расчеты и заполните табл. 4.1 – 4.4.

6. Постройте графики зависимостей I , I_1 , P , $\cos \varphi$ от величины $(g_1 + g_k)$ по данным табл. 4.1; I , I_2 , Q , S от величины b_L по данным табл. 4.2; I , I_1 , P , $\cos \varphi$ от величины g_1 по данным табл. 4.3; I , I_2 , Q , S от величины b_C по данным табл. 4.4.

7. Постройте векторные (топографические) диаграммы для одного из опытов по данным табл. 4.1 или табл. 4.2 и для одного из опытов по данным табл. 4.3 или табл. 4.4.

8. Постройте треугольники мощностей для тех же опытов, что и в предыдущем пункте. Найдите по ним полную мощность и сравните ее с расчетной. Сравните угол φ в треугольниках мощностей с $\angle\varphi$ в векторных диграммах, построенных для соответствующих опытов.

Лабораторная работа №5

Исследование трёхфазной цепи при соединении приёмников по схеме «звезда»

Цель работы: анализ режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки по схеме «звезда» с нейтральным и без нейтрального провода.

Основные теоретические положения

В данной работе трехфазные источник и приемник соединены по схеме «звезда».

Выводы, к которым присоединены зажимы ЭДС с высоким потенциалом, обозначаются точками A , B и C , высокие потенциалы нагрузки – точками a , b и c . Узловые точки источника N и приемника n называются нейтральными (нулевыми) точками, а соединяющий их провод (в четырехпроводной схеме) – нейтральным проводом. Остальные провода, соединяющие источник с приемником, называются линейными. Лучи звезд источника и приемника называются фазами.

При соединении по схеме «звезда» линейные токи равны фазным.

Напряжения между линейными проводами называются линейными, напряжения между точками A , B и C и нейтральной точкой источника N – фазными напряжениями источника, напряжения между точками a , b и c и нейтральной точкой приемника n – фазными напряжениями приемника.

При симметричном режиме работы цепи между линейными U_L и фазными U_ϕ напряжениями существует соотношение

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi.$$

Анализ режимов работы трехфазной цепи удобно производить с помощью векторной диаграммы, пример которой показан на рис. 5.1.

Принято векторную диаграмму трехфазной цепи строить на комплексной плоскости, вещественная ось которой вертикальна.

Порядок построения векторной диаграммы следующий.

Первоначально на комплексной плоскости откладываются фазные напряжения симметричного источника, имеющие выражения:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ}; \\ \dot{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C = U_\phi e^{-j120^\circ}. \end{cases}$$

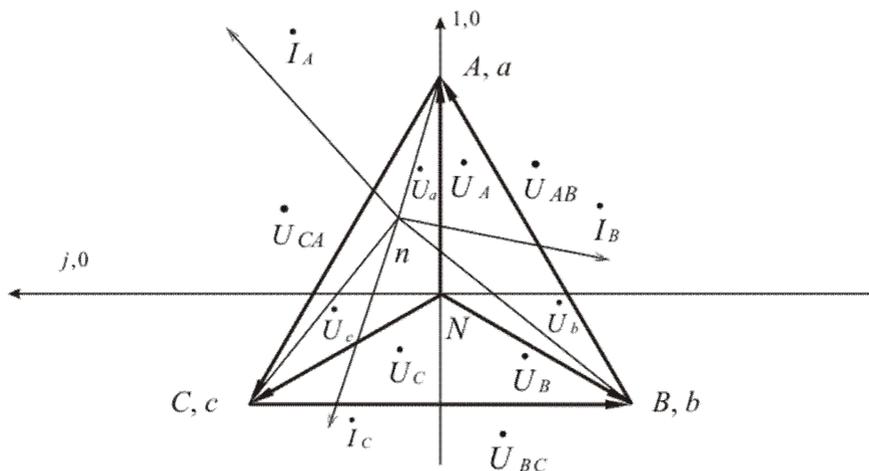


Рис. 5.1.

Тем самым определяется положение на плоскости точек A , B и C . Нейтральная точка источника N располагается в центре координат. Соединив между собой точки A , B и C , можно получить линейные напряжения:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = U_\Delta e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} = U_\Delta e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} = U_\Delta e^{j150^\circ}. \end{cases}$$

Затем откладываются фазные напряжения приёмника при условии идеальности линейных проводов (сопротивления проводов между источником и приёмником равны нулю), т.е. $\dot{\varphi}_A = \dot{\varphi}_a$, $\dot{\varphi}_B = \dot{\varphi}_b$, $\dot{\varphi}_C = \dot{\varphi}_c$.

Замеренные вольтметром на лучах звезды приемника величины этих напряжений \dot{U}_a , \dot{U}_b и \dot{U}_c в масштабе откладываются из соответствующих точек диаграммы A , B и C с помощью циркуля. Точка пересечения дуг окружностей, радиусы которых равны фазным напряжениям приемника, является нейтральной точкой приемника n .

Положение точки n определяется сопротивлением и наличием или отсутствием нейтрального провода. При симметричной нагрузке точки N и n совпадают на диаграмме независимо от того, включен нейтральный провод или нет, при включенном нейтральном проводе точки N и n совпадают всегда, даже при несимметричной нагрузке.

При отсутствии нейтрального провода и несимметричной нагрузке нулевая точка приёмника может находиться как в площади треугольника ABC , так и вне её. В случае аварийных режимов – обрыва или короткого замыкания фазы точка n перемещается соответственно либо по сторонам треугольника ABC , либо занимает положение точек A , B или C (при отключенном нейтральном проводе).

После нахождения положения точки n от неё под углом φ_i к соответствующим фазным напряжениям приемника откладываются фазные токи. В случае четырехпроводной схемы ток нейтрального провода определяется векторным суммированием фазных токов.

Задание для самостоятельной подготовки

1. Постройте качественные векторные диаграммы для трех- и четырехпроводных трехфазных цепей для однородной активной нагрузки и равномерной (элементы L , C , R в любых фазах) нагрузки.

2. Постройте качественную векторную диаграмму при учёте сопротивления нейтрального провода для несимметричного приемника.

Порядок выполнения работы

1. На универсальном стенде №1 запитайте первичную обмотку трансформатора $T2$. С помощью галетных переключателей $QA7$ –

QA9 установите одинаковые значения фазных напряжений источника на вторичных обмотках трансформатора, замеры их цифровым вольтметром.

2. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 5.2.

Произведите замеры показаний приборов при различных режимах трехфазной цепи, которые указаны в табл. 5.1.

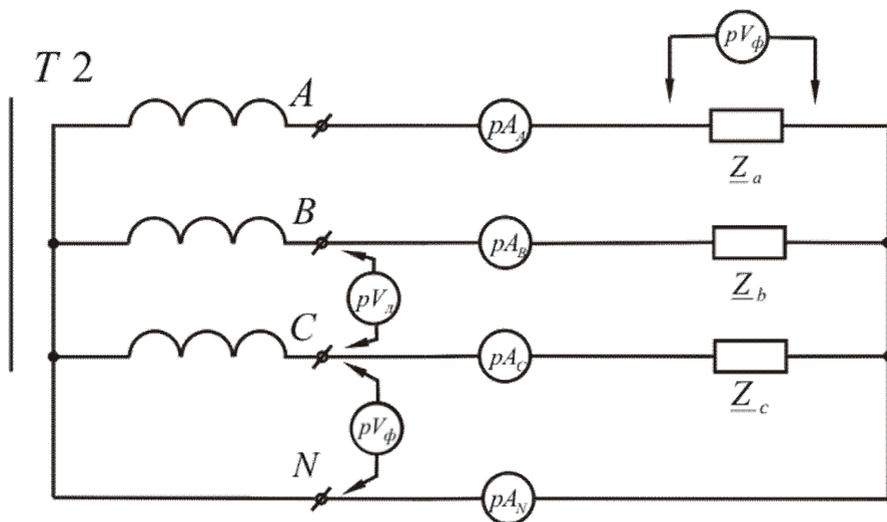


Рис. 5.2.

Симметрия или равномерность нагрузки фаз достигается изменением фазных сопротивлений при равенстве фазных токов.

Для определения угла сдвига фаз между напряжением и током в опытах №8 и №9 в фазы B и C включите ваттметры.

3. Для каждого опыта постройте в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов. Из построенных диаграмм определите для каждого опыта напряжение между нейтральными точками U_{nN} и ток в нейтральном проводе I_N . Данные расчетов запишите в табл. 5.1 и сравните их с опытными данными.

Таблица 5.1

№	Измерено									Из векторной диаграммы		Состояние приёмника	Система цепи
	$U_{лВ}$	$U_{aВ}$	$U_{bВ}$	$U_{cВ}$	$U_{nNВ}$	$I_{AА}$	$I_{BА}$	$I_{CА}$	$I_{NА}$	$U_{nNВ}$	$I_{NА}$		
1												Симметричная активная нагрузка $\underline{Z}_a = R_1,$ $\underline{Z}_b = R_2,$ $\underline{Z}_c = R_3$	Четырёхпроводная (с нейтральным проводом)
2												--/	Трёхпроводная (без нейтрального провода)
3												Несимметричная активная нагрузка	Четырёхпроводная
4												--/	Трёхпроводная
5												Обрыв фазы А, в других фазах – активная нагрузка	Четырёхпроводная
6												--/	Трёхпроводная
7												Короткое замыкание фазы А, в других фазах – активная нагрузка	Трёхпроводная
8												Равномерная нагрузка $\underline{Z}_a = R_1,$ $\underline{Z}_b = X_C$ $(\varphi_C < 0),$ $\underline{Z}_c = \underline{Z}_к$ $(\varphi_к > 0)$	Четырёхпроводная
9												--/	Трёхпроводная

Лабораторная работа №6

Исследование трёхфазной цепи при соединении приёмников по схеме «треугольник»

Цель работы: анализ режимов работы трехфазной цепи, при соединении нагрузки по схеме «треугольник».

Основные теоретические положения

В данной работе трехфазный источник включен по схеме «звезда», а приемник – по схеме «треугольник», при этом фазами приемника являются ветви треугольника.

Линейное напряжение равно фазному напряжению на приемнике, а между линейным I_L и фазным I_Φ токами при симметричном режиме существует соотношение

$$I_L = \sqrt{3}I_\Phi.$$

Построение векторной диаграммы начинается с треугольника линейных напряжений источника

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = U_\Delta e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} = U_\Delta e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} = U_\Delta e^{j150^\circ}. \end{cases}$$

Затем под углами φ_i к соответствующим напряжениям приёмника откладываются фазные токи \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} .

На рис. 6.1 построена векторная диаграмма для случая, когда в фазе ab включена активная нагрузка, в фазе bc – индуктивная и в фазе ca – ёмкостная нагрузка.

В общем случае линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа:

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

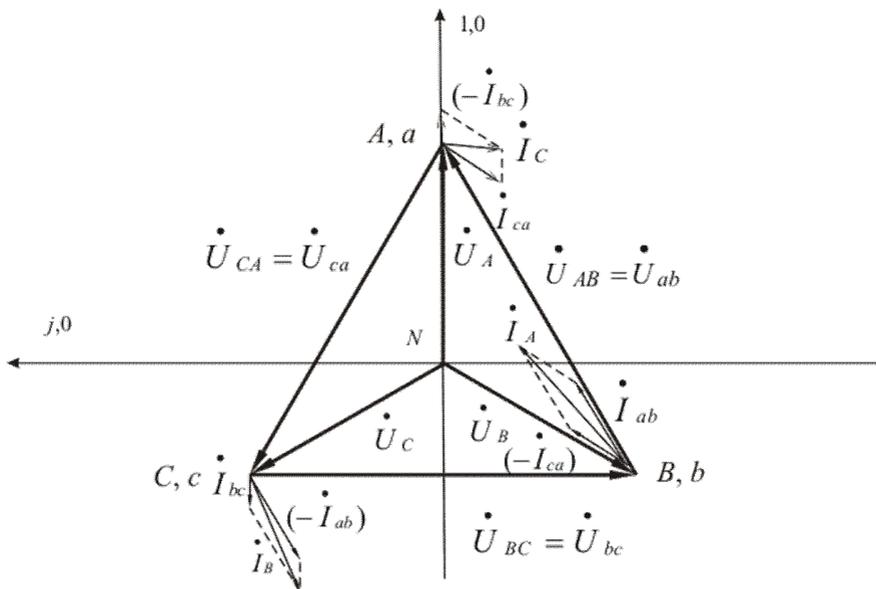


Рис. 6.1.

При обрыве фазы изменяются лишь два линейных тока, при обрыве линии цепь становится однофазной.

Задание для самостоятельной подготовки

1. Постройте качественные векторные диаграммы для однородной и равномерной нагрузок.
2. Постройте качественную векторную диаграмму для случая двухфазного короткого замыкания при наличии реального источника энергии.

Порядок выполнения работы

1. На универсальном стенде №1 запитайте первичную обмотку трансформатора $T2$. С помощью галетных переключателей $QA7 - QA9$ установите одинаковые значения фазных напряжений на вто-

ричных фазных обмотках трансформатора, измеряя их цифровым вольтметром.

2. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 6.2. Произведите замеры показаний приборов при различных режимах трехфазной цепи, которые указаны в табл. 6.1.

Симметрия или равномерность нагрузки фаз достигается изменением фазных сопротивлений при равенстве фазных токов.

Для определения угла сдвига фаз между напряжением и током в опыте №5 в фазы *bc* и *ca* включите ваттметры.

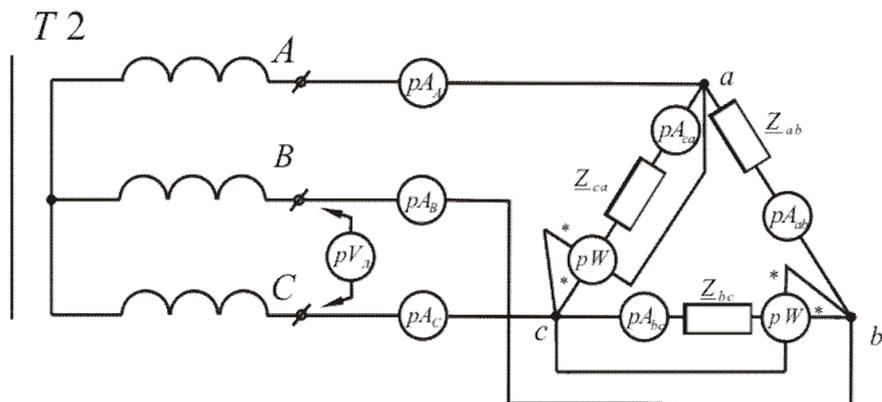


Рис. 6.2.

3. Для каждого опыта постройте в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов. Из построенных диаграмм определите для каждого опыта линейные токи. Данные расчетов занесите в табл. 6.1 и сравните их с опытными данными.

Таблица 6.1

№	Измерено							Из векторной диаграммы			Состояние приёмника
	$U_{л}$ В	I_A А	I_B А	I_C А	I_{ab} А	I_{bc} А	I_{ca} А	I_A А	I_B А	I_C А	
1											Симметричная активная нагрузка $\underline{Z}_{ab} = R_1,$ $\underline{Z}_{bc} = R_2,$ $\underline{Z}_{ca} = R_3$
2											Несимметричная активная нагрузка
3											Обрыв фазы ab , в других фазах – активная нагрузка
4											Обрыв линии, несимметричная активная нагрузка
5											Равномерная нагрузка, $\underline{Z}_{ab} = R_1,$ $\underline{Z}_{bc} = X_C$ ($\varphi_C < 0$), $\underline{Z}_{ca} = Z_k$ ($\varphi_k > 0$)

Лабораторная работа №7

Исследование электрических цепей, содержащих источник несинусоидального напряжения

Цель работы: изучение влияния катушки индуктивности и конденсатора на кривые тока и напряжения, рассмотрение разложения несинусоидальных кривых в ряд Фурье графоаналитическим методом.

Основные теоретические положения

Любая периодическая функция, удовлетворяющая условиям Дирихле, может быть представлена в виде бесконечного гармонического ряда – ряда Фурье:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k).$$

Иначе

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A'_{km} \sin k\omega t + A''_{km} \cos k\omega t),$$

где

$$A'_{km} = A_{km} \cos \psi_k; \quad A = \sqrt{(A'_{km})^2 + (A''_{km})^2};$$
$$A''_{km} = A_{km} \sin \psi_k; \quad \psi_k = \arctg \frac{A''_{km}}{A'_{km}}.$$

Разложение в ряд Фурье кривых геометрически правильной формы приводится в справочниках. Так, например, кривую напряжения на выходе мостового выпрямителя можно разложить в ряд Фурье по формуле

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t \right).$$

Кривые произвольной формы можно разложить в ряд Фурье графо-аналитическим методом, для чего период функции $f(t)$ разбивается на n равных частей. Постоянная составляющая амплитуды синусной и косинусной составляющих k -х гармоник определяются по формулам:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(t);$$

$$A'_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(t) \sin_p(k\omega t);$$

$$A''_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(t) \cos_p(k\omega t),$$

где $f_p(t)$ – значение функции $f(t)$ в середине p -го интервала; $\sin_p(k\omega t)$, $\cos_p(k\omega t)$ – значение функции синуса и косинуса в середине p -го интервала.

При разложении следует учесть, что кривые, симметричные относительно оси абсцисс, не содержат постоянной составляющей и чётных гармоник, а, кроме того, разложение таких кривых можно произвести, исследуя лишь первый полупериод функции $f(t)$. Для случая разбивки периода функции $f(t)$ на $n = 24$ части в табл. 7.1 приведены значения аргумента $k\omega$ для первого полупериода функции.

Таблица 7.1

№ гар- моники	Значения аргумента $k\omega t$ (в градусах) для интервала №:											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Первая	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5	112,5	127,5	142,5	157,5	172,5
Третья	22,5	67,5	112,5	157,5	202,5	247,5	292,5	337,5	22,5	67,5	112,5	157,5
Пятая	37,5	112,5	187,5	262,5	337,5	52,5	127,5	202,5	277,5	352,5	67,5	142,5

Действующее значение несинусоидальной величины (тока или напряжения) равно квадратному корню из суммы квадратов посто-

янной составляющей и действующих значений отдельных гармоник.

$$A = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}$$

Активная мощность в несинусоидальной цепи определяется по формуле:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k,$$

реактивная мощность – по формуле:

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k.$$

В данных цепях возникает мощность искажения:

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}, \text{ ВА.}$$

Расчёт цепи несинусоидального тока заключается в разложении источника несинусоидальной ЭДС на гармонические составляющие, составление для каждой гармоники схемы замещения и определения в них токов. При расчёте необходимо учитывать, что индуктивные сопротивления с ростом номера гармоник возрастают, а ёмкостные – уменьшаются:

$$X_{Lk} = k\omega L = kX_{L1},$$

$$X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{X_{C1}}{k}.$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Перечислите свойства периодических несинусоидальных симметричных функций, относящиеся к составу гармоник.

2. Объясните причины возникновения мощности искажения в цепях с высшими гармониками.

3. В чём отличие явления резонанса в цепях синусоидального тока и несинусоидальных цепях?

4. Составьте бланк отчёта.

Порядок выполнения работы

Данная работа выполняется на стенде №2.

1. Проградуируйте осциллограф, для чего, подав от автотрансформатора T известное напряжение U , измерьте амплитуду синусоидальной кривой на экране осциллографа. Масштаб в единицах напряжения определите по формуле

$$m_U = \frac{\sqrt{2}U}{y}, \text{ В/мм},$$

Для определения масштаба в единицах тока m_i в активном элементе R достаточно взять отношение:

$$m_i = \frac{m_U}{R}, \text{ А/мм}.$$

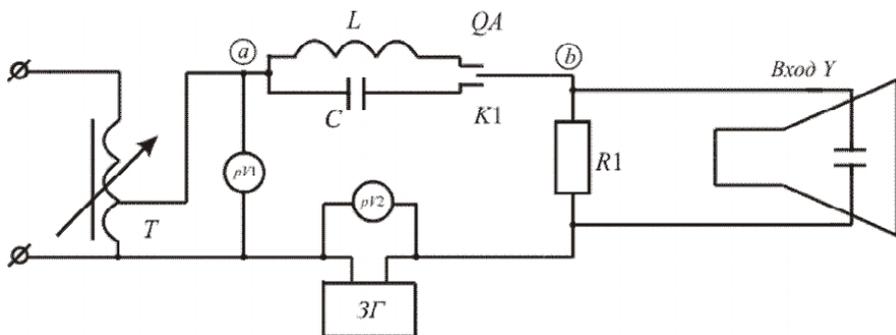


Рис. 7.1.

2. Соберите цепь по схеме рис. 7.1.

3. Установите закоротку на точки a и b . Подайте заданное преподавателем напряжение частотой 50 Гц от звукового генератора (ЗГ)

на сопротивление нагрузки R_1 . Амплитуда напряжения пятой гармоники должна составлять не более 20% от амплитуды напряжения первой гармоники. Снимите осциллограмму несинусоидального напряжения.

4. Уберите закоротку между точками a и b и снимите осциллограмму тока в цепи при включённой с помощью контакта QA коммутатора $K1$ индуктивности L .

5. Переключите контакт QA на ёмкость C и снимите осциллограмму тока в полученной схеме.

6. Разложите кривую напряжения и токов, полученные в опытах пунктов 3-5, на гармоники до пятой включительно.

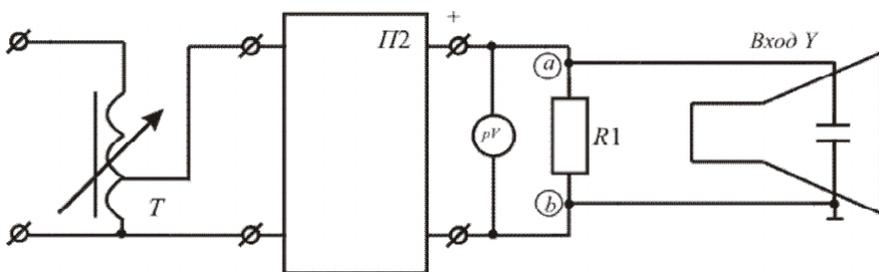


Рис. 7.2.

7. Соберите цепь по схеме рис. 7.2, включив мостовой выпрямитель П2.

8. Снимите осциллограмму напряжения u_{ab} и определите амплитуду напряжения.

9. Соберите цепь по схеме рис. 7.3, добавив сглаживающий фильтр П1 (фильтр второй гармоники).

10. Снимите осциллограмму напряжения u_{cd} и определите амплитуду напряжения второй гармоники.

11. Разложите напряжения u_{ab} в тригонометрический ряд. Результаты данных пункта 10 сравните с расчётными.

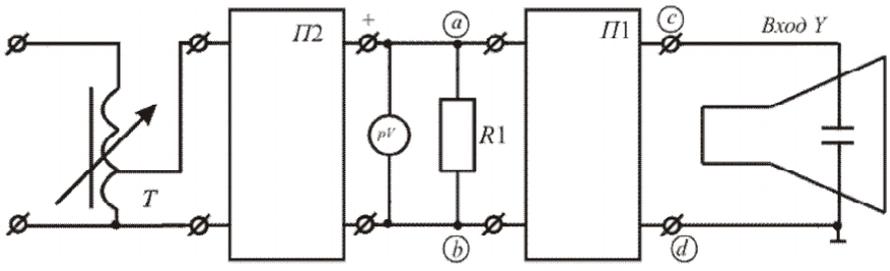


Рис. 7.3.

Список литературы

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. — М. : Гардарики, 2007. — 701 с.
2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие для вузов / Г. И. Атабеков — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 592 с.
3. Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. – 10-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 736 с. – ISBN 978-5-8114-0523-7. – URL: <https://e.lanbook.com/book/112073> (дата обращения: 01.09.2022). – Текст : электронный.
4. Курехин, В. В. Лекции по теоретическим основам электротехники : учебник. Ч. 1 / В. В. Курехин, В. Н. Матвеев ; Кузбас. гос. техн. ун-т. — Кемерово, 2000. — 132 с.