

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

Институт энергетики
Кафедра электропривода и автоматизации

Татьяна Макаровна Черникова

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические материалы к лабораторным работам

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления
подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
в качестве электронного издания для использования
в образовательном процессе

Кемерово 2024

Рецензенты: Дабаров В.В. – канд. тех. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»
Захаров С. А. – канд. тех. наук, заведующий кафедрой электроснабжения горных и промышленных предприятий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», председатель учебно-методической комиссии направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Черникова, Т.М. Теоретические основы электротехники: Методические материалы к лабораторным работам для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / сост. Т.М. Черникова; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2024. – Текст: электронный.

Раскрыто содержание лабораторных работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины «Теоретические основы электротехники». В работе предлагается студентам самостоятельно рассмотреть и решить вопросы подготовки к выполнению, оформлению и защите лабораторных работ по электрическим цепям и электромагнитному полю. Даны краткие теоретические положения, облегчающие подготовку к занятиям, методические указания по выполнению и оформлению отчетов к лабораторным работам, ссылки на литературу.

© Кузбасский государственный
технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 2024
© Черникова Т.М.,
составление, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основное электрооборудование, используемое для лабораторных работ	4
Правила выполнения лабораторных работ	7
Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ	8
Лабораторная работа №1 электроизмерительные приборы и измерения основных электрических величин	10
Лабораторная работа №2 исследование простейших цепей постоянного тока	15
Лабораторная работа № 3 исследование последовательной цепи переменного тока	20
Лабораторная работа № 4 исследование параллельной цепи переменного тока	26
Лабораторная работа № 5 исследование трехфазной цепи при соединении приемников по схеме "звезда"	31
Лабораторная работа № 6 исследование трехфазной цепи при соединении приемников по схеме "треугольник"	37
Лабораторная работа № 7 исследование электрических цепей, содержащих источник несинусоидального напряжения.....	41
Лабораторная работа № 8 исследование переходных процессов в линейных электрических цепях	1
Лабораторная работа № 9 исследование пассивных четырехполюсников	1
Лабораторная работа № 10 исследование нелинейных цепей постоянного тока	5
Лабораторная работа № 11 исследование электрической цепи, содержащей катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником	9

Лабораторная работа № 12 исследование явления феррорезонанса напряжений.....	1
Лабораторная работа № 13. моделирование плоскопараллельного потенциального поля в электролитической ванне	5
Лабораторная работа № 14. исследование электромеханических сил в системе контуров с электрическими токами	12
Список рекомендуемой литературы	18

ОСНОВНОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Все лабораторные работы по исследованию электрических цепей постоянного и переменного тока выполняются на универсальном стенде №1, лицевая панель которого показана на рис. 1.

На стенд подается либо переменное напряжение 220 В, либо трехфазное регулируемое напряжение от 100 В до 380 В.

Стенд содержит силовой однофазный трансформатор, от которого запитаны автотрансформатор $T1$, позволяющий регулировать переменное напряжение в диапазоне (0-30) В, а также независимые стабилизированные источники постоянной ЭДС $E1$ и $E2$, значения напряжения которых можно изменять от 0 до 25 В. На клеммы от силового трансформатора подано также переменное напряжение 6 В, предназначенное для запитывания измерительных приборов.

Перечисленные источники питания работают после включения тумблера $QA1$, при этом загорается лампочка EL . В сеть 220 В включен предохранитель FU на 0,5 А. Источники $E1$ и $E2$ включаются с помощью тумблеров $QA2$, $QA3$ и $QA4$, $QA5$, регулируются переменными резисторами $R8$ и $R9$, напряжения источников регистрируются вольтметрами $PV1$ и $PV2$ соответственно.

Трехпозиционные переключатели $QA3$ и $QA5$ позволяют отключать $E1$ и $E2$ от выходных клемм (в среднем положении), а также закорачивать выходные клеммы источников.

Автотрансформатор $T1$ включается тумблером $QA6$, а регулируемое движком выходное напряжение регистрируется вольтметром $PV3$.

Стенд содержит трехфазный трансформатор $T2$, начала и концы всех обмоток которого выведены на лицевую панель. С помощью вольтодобавочных обмоток возможно независимое регулирование вторичного напряжения на каждой фазе. Регулирование осуществляется галетными переключателями $QA7$ - $QA9$, фазные напряжения регистрируются вольтметрами $PV4$ - $PV6$.

В качестве нагрузок на стенде используются три переменных резистора $R1$ - $R3$, максимальное сопротивление которых составляет 10 кОм, три постоянных резистора $R4$ - $R6$ и нелинейное сопротивление $R7$, катушка переменной индуктивности $L1$, катушки со

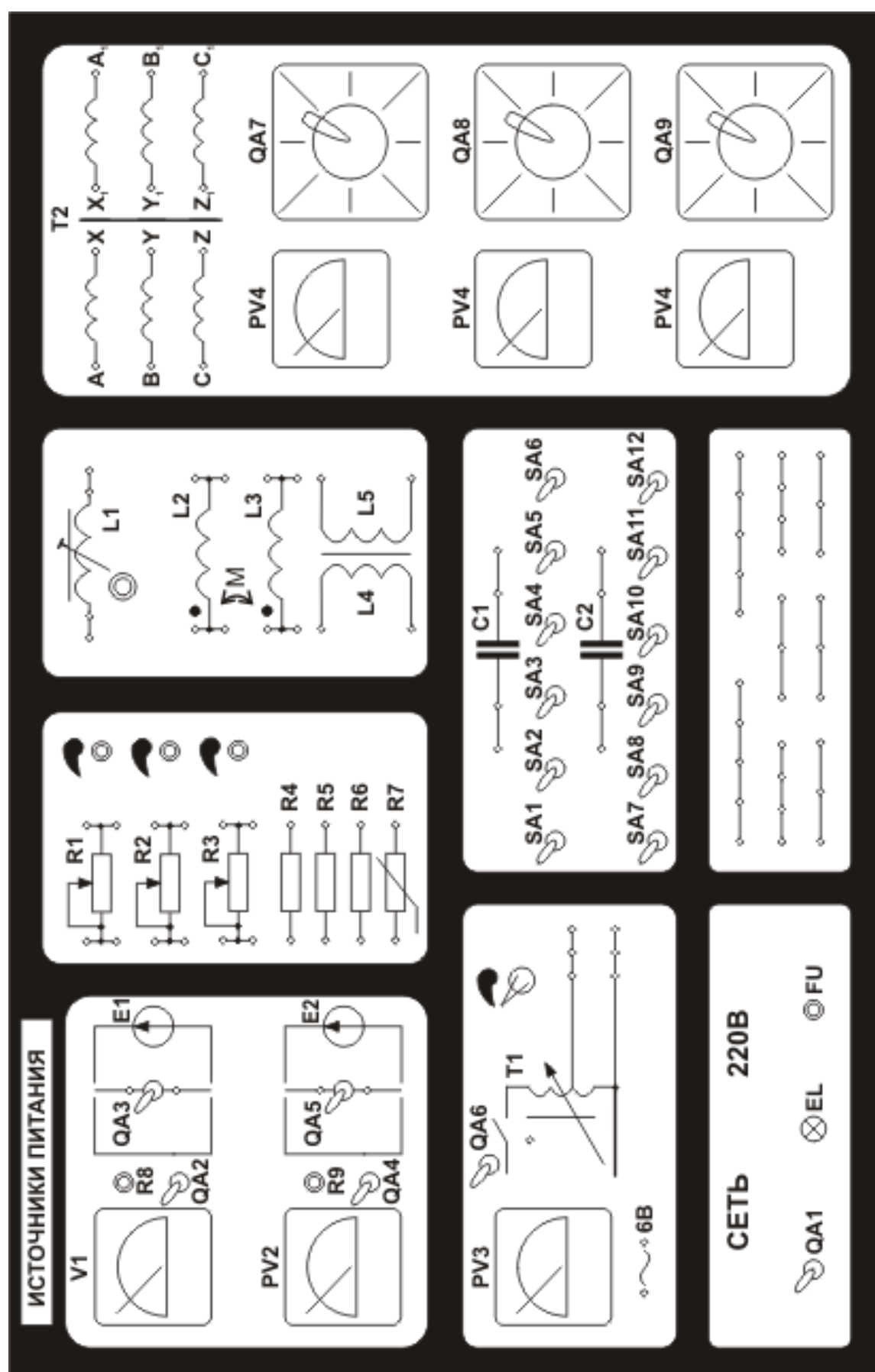


Рис. 1. Лицевая панель универсального стенда № 1

взаимоиндукцией $L2$, $L3$ и $L4$, $L5$, а также группы конденсаторов $C1$ и $C2$ - батареи параллельно подключаемых конденсаторов, емкость которых изменяется с помощью тумблеров $SA1 - SA12$.

Максимальный ток через нагрузку не должен превышать 300 мА.

Для обеспечения возможности параллельных соединений на стенде предусмотрены общие шины.

При выполнении лабораторных работ используются аналоговые и цифровые приборы: амперметры, вольтметры, ваттметры и омметры. При их использовании требуется изучить правила эксплуатации соответствующих приборов. При измерениях строго запрещается превышать номинальные значения приборов.

Действующие значения синусоидальных токов и напряжений измеряют цифровыми приборами, а также аналоговыми приборами электромагнитной и электродинамической систем. Для измерения активной мощности используются ваттметры электродинамической системы.

Приборы для измерения однофазных токов и напряжений имеют на лицевой стороне условный знак – волнистую линию (\sim).

У ваттметра имеются две обмотки и четыре зажима. Два из них, отмеченные звездочками, называются генераторными. При измерении активной мощности эти зажимы включаются в один узел. Второй зажим токовой обмотки подключается последовательно, а обмотки напряжения – параллельно измеряемому участку электрической цепи.

Цена деления ваттметра определяется по формуле

$$C_W = \frac{U_H \cdot I_H}{N}, \text{ Вт/дел.},$$

где U_H – номинальное напряжение прибора, В; I_H – номинальный ток, А; N – число делений шкалы.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В начале каждого занятия студент обязан представить преподавателю, ведущему лабораторные занятия, рабочую тетрадь с материалами предварительной подготовки к очередной лабораторной работе. Студент, не подготовившийся к занятию и показавший неудовлетворительные знания, к выполнению работы не допускается.

Допущенные к выполнению работы студенты приступают к сборке электрической цепи на лабораторном стенде. Перед началом работы на стенде необходимо убедиться, что стенд отключен от всех источников энергии.

В соответствии с указаниями к работе следует выбрать необходимое оборудование на стенде и измерительные приборы.

Сборку электрической цепи рекомендуется производить от одного из зажимов источника энергии к другому. При этом целесообразно сначала соединить участки по главной токовой последовательной цепи, а затем к собранной части цепи следует присоединять элементы параллельных ветвей. В последнюю очередь включаются вольтметры и обмотка напряжения у ваттметра. Для соединения нескольких ветвей в один узел рекомендуется использовать общие шины на стенде.

При сборке схемы цепи постоянного тока необходимо соблюдать требуемую полярность включения источников и измерительных приборов.

Сборку электрической цепи должен выполнять один студент, а второй обязан подготавливать соединительные провода и контролировать правильность сборки схемы. При сборке следующей схемы они меняются местами.

Собранную цепь следует обязательно показать для проверки преподавателю. Перед включением цепи необходимо установить регулируемые источники энергии в нулевые положения, полностью ввести реостаты, у приборов установить максимальные пределы измерения. Убедившись в соблюдении данных условий и получив разрешение преподавателя, можно включить цепь под напряжение.

При возникновении неисправности в цепи сначала следует отключить источники, а затем обратиться к преподавателю.

Показания приборов в соответствии с порядком выполнения

работы записываются в таблицы рабочей тетради.

Размер листов отчета должен соответствовать формату А4. Начинается отчет с титульного листа. В самом отчете следует указать название, цель работы, привести схемы исследуемых цепей, таблицы с экспериментальными и вычисленными данными, требуемые графики.

Графики строятся на листах миллиметровой бумаги. При выполнении графиков по осям координат проставляются буквенные обозначения исследуемых величин, единицы их измерения, наносится масштабная сетка. При построении в одних осях нескольких графиков функций одной переменной необходимо провести дополнительные масштабные шкалы для каждой из них и построить эти кривые разноцветными карандашами. Графики следует строить в виде плавных непрерывных кривых, захватывающих наибольшее число опытных (расчетных) точек или занимающих среднее положение между ними.

Каждый студент обязан оформить отчет по выполненной работе к очередному занятию. Студент, не представивший отчет по предыдущей работе, к выполнению следующей не допускается.

ПРАВИЛА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Универсальные стенды лаборатории являются действующими электроустановками и при нарушении Правил техники безопасности могут оказаться источниками опасности поражения электрическим током. Прохождение тока через тело человека может привести к тяжелым поражениям нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем.

При одновременном прикосновении к двум неизолированным точкам цепи, находящейся под напряжением, тело человека становится звеном этой цепи и по нему протекает ток. Сопротивление тела человека как элемент электрической цепи определяется состоянием верхнего слоя кожи и зависит от многих факторов (влажность, состояние нервной системы и др.), поэтому оно может изменяться от нескольких сотен Ом до нескольких тысяч Ом.

При неблагоприятных обстоятельствах напряжение порядка

40-60 В может вызвать серьезную травму. Установлено, что прохождение переменного тока 50 мА через тело человека в течение 0,2-0,5 с является опасным, а прохождение тока 100 мА - смертельным. Опасность возрастает с увеличением напряжения.

Исходя из сказанного, следует руководствоваться следующими правилами безопасности:

- 1) доступ к стендам и аппаратуре во время занятий производится только с разрешения преподавателя;
- 2) перед началом сборки схемы необходимо убедиться в том, что все источники энергии отключены, регуляторы напряжения установлены в нулевое положение, состояние изоляции проводов исправное;
- 3) необходимо обеспечить надежный контакт наконечников проводов с клеммами стенда, ненужные провода со стола необходимо убирать;
- 4) включение схемы производить только после проверки преподавателем правильности сборки;
- 5) при возникновении неисправности (зашкаливание прибора, появление дыма, характерного запаха и др.) немедленно отключить все источники энергии и сообщить о случившемся преподавателю;
- 6) при выполнении работы запрещается касаться руками, ручкой, карандашом и другими предметами незаизолированных участков цепи, находящихся под напряжением;
- 7) любые присоединения к цепи, ее разборку производить при отключенных источниках;
- 8) при выполнении работы не разрешается отходить от стенда, находящегося под напряжением;
- 9) всем студентам до начала работ в лаборатории необходимо ознакомиться с настоящей инструкцией и расписаться в лабораторном журнале по технике безопасности.

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.

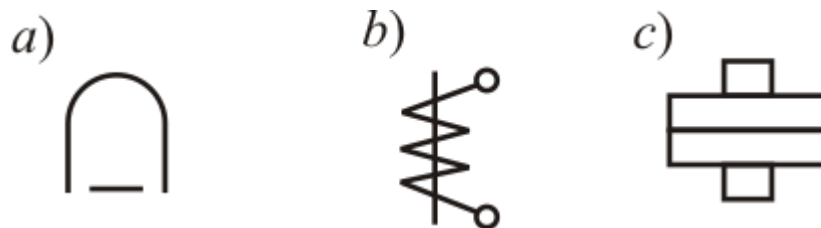


Рис. 1.1: *a)* магнитоэлектрический прибор; *b)* электромагнитный прибор; *c)* электродинамический прибор

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

$$\alpha = SI , \quad (1.1)$$

где S - чувствительность прибора.

Данные приборы имеют равномерную шкалу.

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

$$\alpha = SI^2 \frac{dL}{d\alpha}, \quad (1.2)$$

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 :

$$\alpha = SI_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}. \quad (1.3)$$

Электродинамические приборы имеют неравномерную шкалу.

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

$$C = \frac{A_m}{N}. \quad (1.4)$$

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:

$$C' = C \left(1 + \frac{R_A}{R_{ш}} \right), \quad (1.5)$$

$$C'' = C \left(1 + \frac{R_{д}}{R_V} \right), \quad (1.6)$$

где R_A и R_V - внутренние сопротивления амперметра и вольтметра со-

ответственно; $R_{ш}$ - сопротивление шунта; R_0 - добавочное сопротивление.

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

$$\Delta = A - A_0, \quad (1.7)$$

относительную

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} \cdot 100\%, \quad (1.8)$$

приведенную

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_n} \cdot 100\%, \quad (1.9)$$

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 1.5 и 1.6.
3. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

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

Таблица 1.1

Название прибора	Тип системы	Род тока	Пределы измерения	Количество делений шкалы	Цена деления	Класс точности	Внутреннее сопротивление, Ом
Амперметр							
Вольтметр							
Ваттметр							

2. Поочередно соберите электрические цепи, приведенные на

рис. 1.2 и 1.3.

В каждом случае, задаваясь тремя значениями сопротивления переменного резистора $R1$, предварительно замеренными с помощью омметра, определите показания приборов.

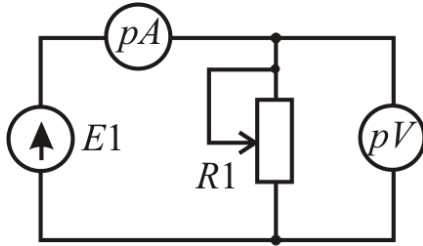


Рис. 1.2

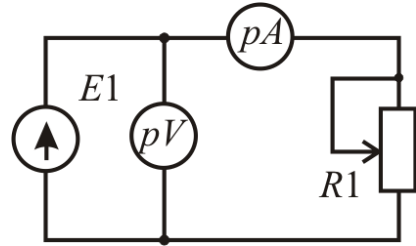


Рис. 1.3

Вычислите значения сопротивления $R1$ по формулам:
для схемы рис. 1.2

$$R1 = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}, \quad (1.10)$$

для схемы рис. 1.3

$$R1 = \frac{U - I \cdot R_A}{I} \quad (1.11)$$

Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности, считая действительными значениями сопротивления $R1_0$ величины, определенные омметром. Результаты занесите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Схема измерений	Измерено			Вычислено		
	$U, В$	$I, А$	$R1_0, Ом$	$R1, Ом$	$\Delta, Ом$	$\delta, \%$
По рис. 1.2						
По рис. 1.3						

4. Соберите цепь по схеме рис. 1.4.

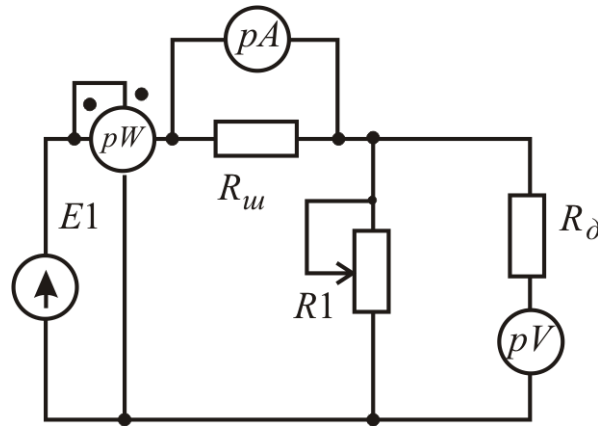


Рис. 1.4

Замерьте с помощью омметра действительные значения сопротивлений $R_{ш}$, $R_{д}$ и $R1$ и определите новую цену деления приборов. Снимите показания приборов для трех значений сопротивления $R1$.

Рассчитайте значения сопротивления $R1$, мощности и погрешностей в измерении $R1$ для каждого замера. Результаты занесите в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Измерено				Вычислено			
$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$R1_0, Ом$	$R1, Ом$	$P=RI^2, Вт$	$\Delta, Ом$	$\delta, \%$

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:

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

Активная мощность этого участка цепи:

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}. \quad (2.2)$$

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

$$U = \sum_{k=1}^n U_k. \quad (2.3)$$

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

$$R_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n R_k. \quad (2.4)$$

Оно может быть найдено по экспериментальным значениям

напряжения источника U и тока цепи I с помощью закона Ома:

$$R_{\Sigma} = \frac{U}{I} . \quad (2.5)$$

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:

$$I = \sum_{k=1}^n I_k . \quad (2.6)$$

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

$$g_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n g_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} . \quad (2.7)$$

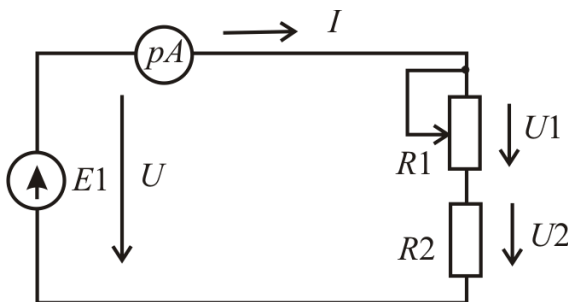


Рис. 2.1

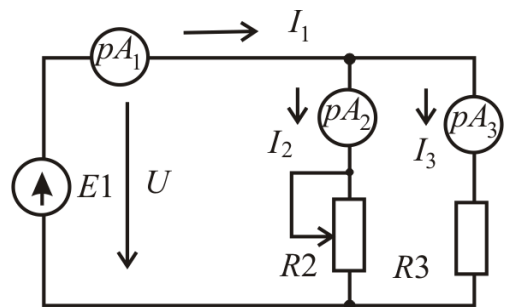


Рис. 2.2

Эквивалентное резистивное сопротивление параллельной цепи

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{g_{\Sigma}} = \frac{U}{I} , \quad (2.8)$$

где U и I - напряжение и ток источника.

Последовательно-параллельная 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.

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

$$I_2 = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (2.9)$$

$$I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3}. \quad (2.10)$$

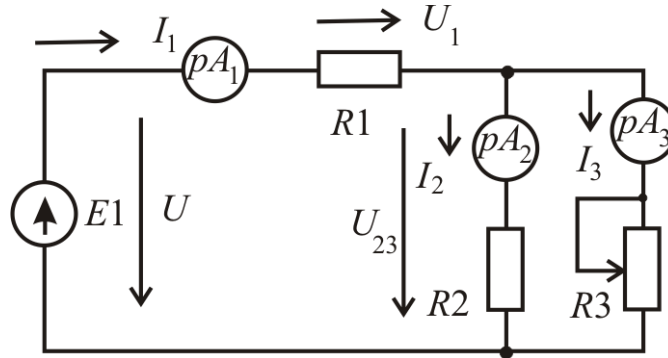


Рис. 2.3

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.

5. 4. Составьте бланк отчета.

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_{Σ} , Ом	P_1 , Вт	P_2 , Вт	P , Вт
1										
2										
3										

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.

Таблица 2.2

№	Измерено				Вычислено					
	U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_{Σ} , Ом	P_2 , Вт	P_3 , Вт	P , Вт
1										
2										
3										

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 влия-

ние величины сопротивления R_3 на ток источника, токи в параллельных ветвях и напряжения на участках цепи. Результаты измерений занесите в табл. 2.3.

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_{Σ} Ом	P_1 Вт	P_2 Вт	P_3 Вт	P Вт
1														
2														
3														

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

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 Z_k определяется по треугольнику сопротивлений индуктивного элемента, приведенному на рис. 3.1:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}. \quad (3.1)$$

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

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{(R + R_k)^2 + X_L^2}. \quad (3.2)$$

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:

$$U_R = R \cdot I, \quad (3.3)$$

$$U_K = Z_K \cdot I. \quad (3.4)$$

Приложенное к цепи напряжение источника опережает ток на угол φ :

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R + R_K}. \quad (3.5)$$

Активная мощность катушки P_K и активная мощность цепи P равны:

$$P_K = R_K \cdot I^2 = U_{aK} \cdot I, \quad (3.6)$$

$$P = (R + R_K) \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (3.7)$$

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

$$P_M = \frac{U^2}{2 \cdot (R + R_K)}. \quad (3.8)$$

Реактивная мощность индуктивной катушки равна

$$Q_L = U I \sin \varphi = X_L I^2 = U_{pK} I. \quad (3.9)$$

При изменении X_L от 0 до ∞ реактивная мощность максимальна при $X_L = (R + R_K)$:

$$Q_{L_M} = \frac{U^2}{2X_L}. \quad (3.10)$$

Полная мощность цепи определяется по формуле:

$$S = U I = \sqrt{P^2 + Q^2} = Z I^2. \quad (3.11)$$

Полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора R и конденсатора с емкостным сопротив-

лением $X_C = \frac{1}{\omega C}$, можно найти по треугольнику сопротивлений, изображенному на рис. 3.2:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}. \quad (3.12)$$

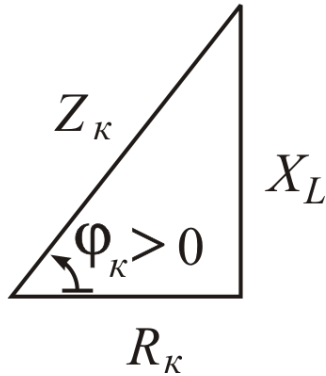


Рис. 3.1

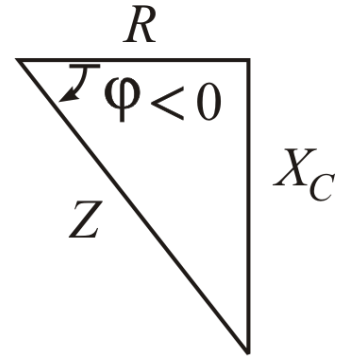


Рис. 3.2

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

$$U_C = X_C \cdot I. \quad (3.13)$$

Активная и полная мощности цепи определяются по формулам:

$$P = U I \cos \varphi = R I^2; \quad (3.14)$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = Z I^2. \quad (3.15)$$

Реактивная мощность конденсатора

$$Q_C = U I \cdot \sin \varphi = -X_C \cdot I^2 = -U_C I. \quad (3.16)$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Для исследуемой электрической цепи, схема которой показана на рис. 4.3, 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:

$$X_L > R > R_k \quad \text{и} \quad R > X_L > R_k;$$

в) треугольник мощностей.

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

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

б) топографические диаграммы для случаев:

$$R < X_C, \quad R = X_C, \quad R > X_C;$$

в) треугольник мощностей.

3. Составьте бланк отчета.

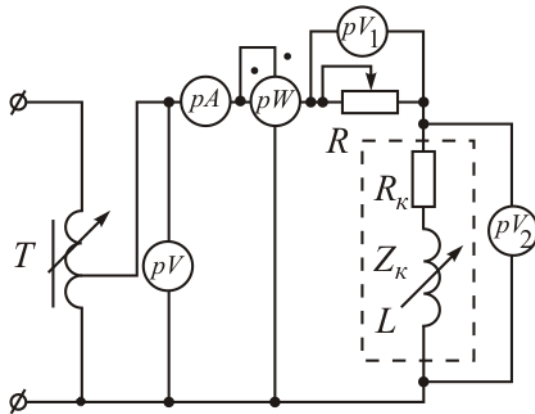


Рис. 3.3

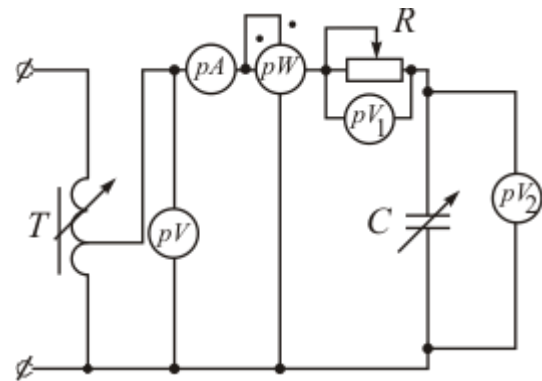


Рис. 3.4

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															
...															
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.

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															
...															
6															

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 3.3

№ 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												
...												
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.

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												
...												
6												

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. 1.1; I , U_2 , P , Q , $\cos\varphi$ от величины X_L по данным табл. 1.2; 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 и табл. 3.2 или табл. 3.3 и табл. 3.4.

9. Постройте треугольники мощностей для одного из опытов по данным табл. 3.1 и табл. 3.2 или табл. 3.3 и табл. 3.4. Найдите по ним полную мощность и сравните ее с расчетной.

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:

$$y_K = \frac{I_K}{U}, \quad (4.1)$$

$$g_K = \frac{P}{U^2}, \quad (4.2)$$

$$b_L = \sqrt{y_K^2 - g_K^2}. \quad (4.3)$$

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

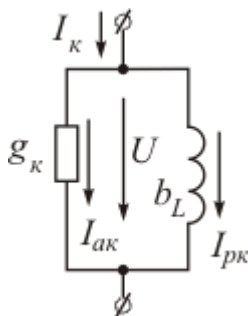


Рис. 4.1

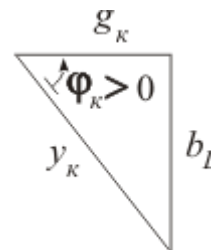


Рис. 4.2

При параллельном соединении резистора и катушки индуктивности полная проводимость цепи

$$y = \frac{I}{U} = \sqrt{(g_R + g_k)^2 + b_L^2}, \quad (4.4)$$

где g_k – активная проводимость резистора.

Ток катушки

$$I_k = \sqrt{I_{ak}^2 + I_{pk}^2}, \quad (4.5)$$

$$I_{ak} = g_k \cdot U, \quad (4.6)$$

$$I_{pk} = b_L \cdot U. \quad (4.7)$$

Общий ток цепи

$$I = \sqrt{(I_R + I_{ak})^2 + I_{pk}^2}. \quad (4.8)$$

Мощности цепи определяются по формулам:

$$P = (g_R + g_k)U^2, \quad (4.9)$$

$$Q_L = I_{pk}U = b_L U^2, \quad (4.10)$$

$$S = UI = yU^2. \quad (4.11)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I_R + I_{ak}}{I}. \quad (4.12)$$

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

$$y = \frac{I}{U} = \sqrt{g_R^2 + b_C^2}, \quad (4.13)$$

где $b_C = \omega C$.

Общий ток цепи

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}, \quad (4.14)$$

где $I_R = g_R U$, $I_C = b_C U$.

Мощности цепи определяются по формулам:

$$P = I_R U = g_R U^2, \quad (4.15)$$

$$Q_C = -I_C U = -b_C U^2, \quad (4.16)$$

$$S = U I = y U^2. \quad (4.17)$$

Задание для самостоятельной подготовки

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

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

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 $g_1 = \text{const}$.

3. Составьте бланк отчета.

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.

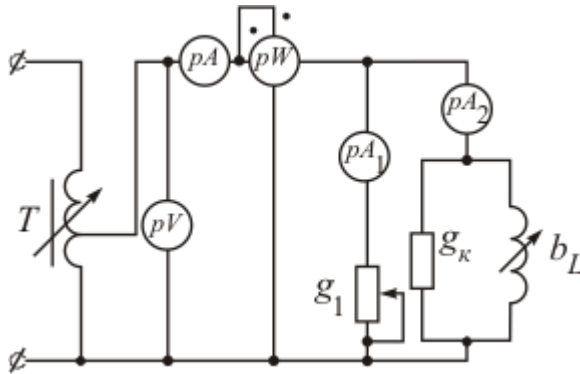


Рис. 4.3

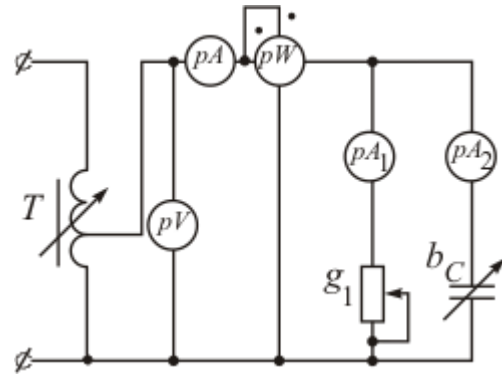


Рис. 4.4

Таблица 4.1

[illegible]

2. При неизменном напряжении на входе цепи исследуйте зависимости токов и активной мощности от величины b_L . Результаты опытов занесите в табл. 5.2.

Таблица 4.2

[illegible]

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.

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

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. 2.1; I, I_2, Q, S от величины b_L по данным табл. 5.2; $I, I_1, P, \cos\varphi$ от величины g_1 по данным табл. 4.3; I, I_2, Q, S от величины b_C по данным табл. 4.4.

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												
...												
6												

7. Постройте векторные диаграммы для одного из опытов по данным табл. 4.1 и табл. 4.2 или табл. 4.3 и табл. 4.4. По диаграммам определите угол φ и сравните его с расчетным.

8. Постройте треугольники мощностей для одного из опытов по данным табл. 4.1 и табл. 4.2 или табл. 4.3 и табл. 4.4. Найдите по ним полную мощность и сравните ее с расчетной.

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												
...												
6												

Литература: [1, § 3.12–3.14, 3.20; 2, § 2.1-2.10, 3.8; 8, § 6.4, 6.5].

Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ 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

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi. \quad (5.1)$$

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:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_\phi \cdot e^{j0^\circ}; \\ \dot{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C = U_\phi \cdot e^{j120^\circ}. \end{cases} \quad (5.2)$$

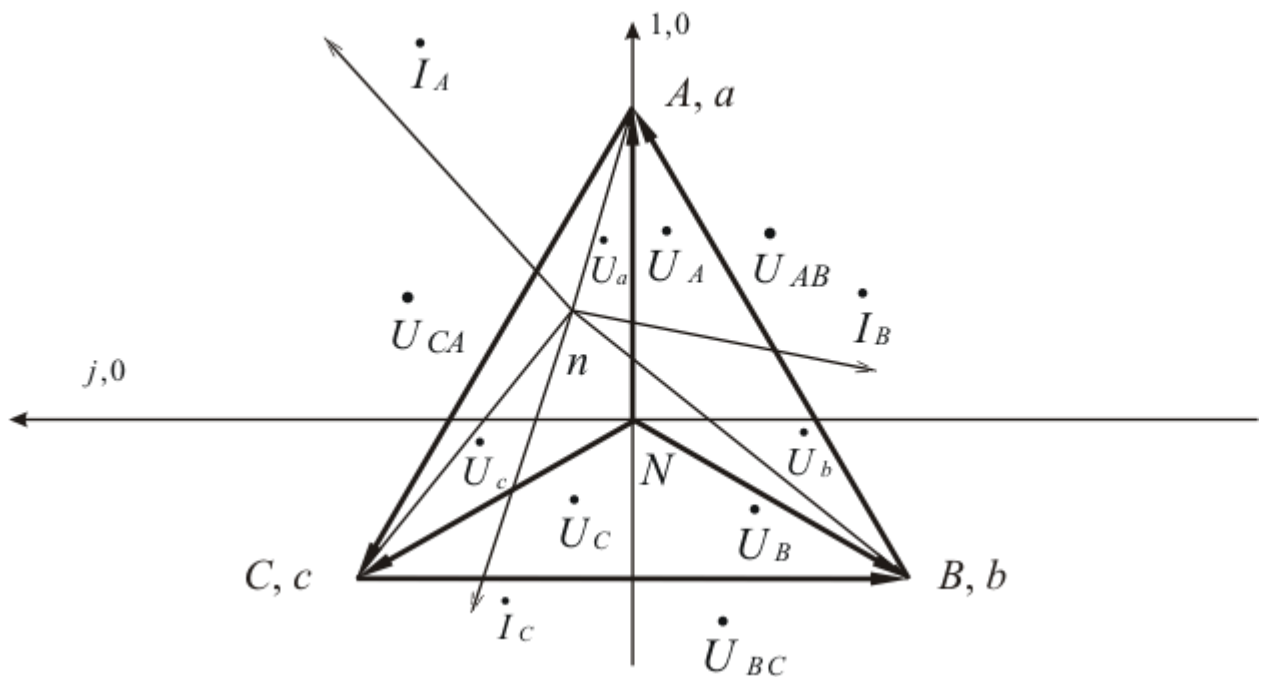


Рис. 5.1

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:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = U_{\text{л}} \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} = U_{\text{л}} \cdot e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} = U_{\text{л}} \cdot e^{j150^\circ}. \end{cases} \quad (5.3)$$

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 приёмника 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 приёмника, является нейтральной точкой приёмника 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 приёмника 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.
3. Составьте бланк отчета.

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, измеряя их цифровым вольтметром.
2. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 5.2.

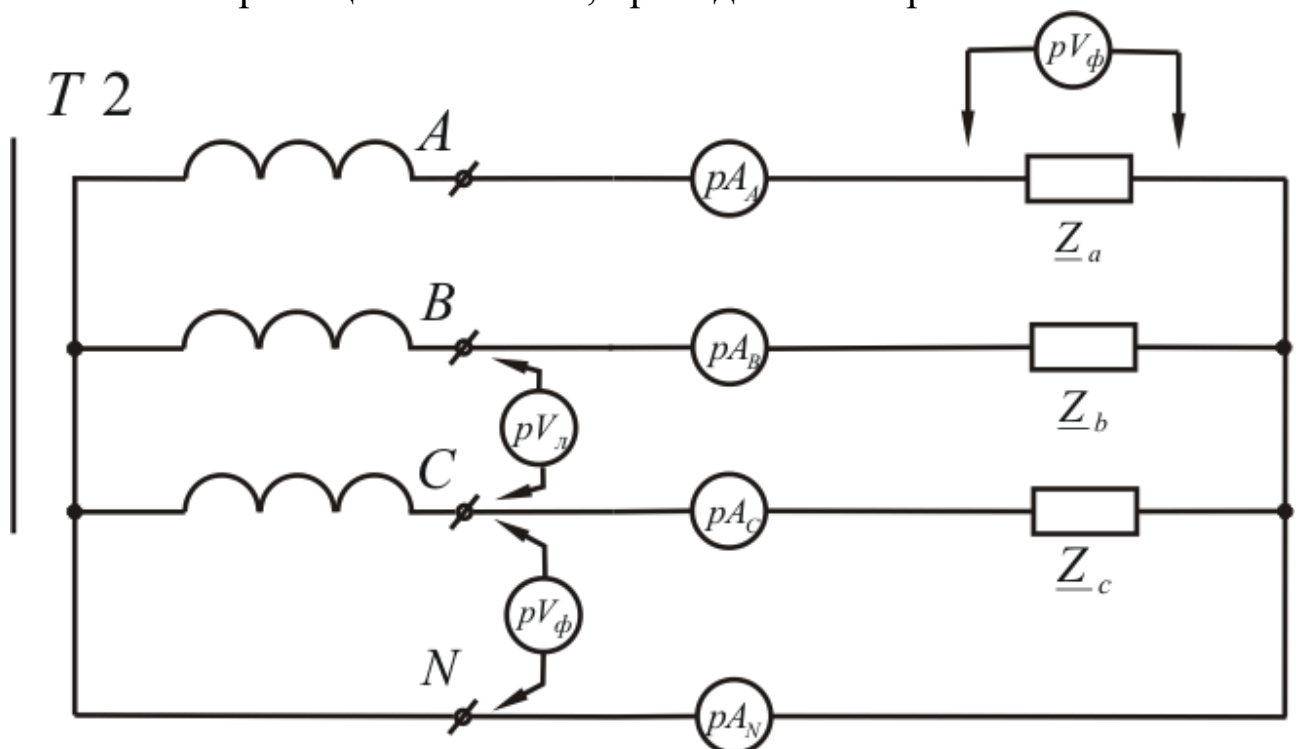


Рис. 5.2

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

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_L В	U_a В	U_b В	U_c В	U_{nN} В	I_A А	I_B А	I_C А	I_N А	U_{nN} В	I_N А		
1												Симметричная активная нагрузка $\underline{Z}_a = R1$, $\underline{Z}_b = R2$, $\underline{Z}_c = R3$	Четырехпроводная (с нейтральным проводом)
2												— // —	Трехпроводная (без нейтрального провода)
3												Несимметричная активная нагрузка	Четырехпроводная
4												— // —	Трехпроводная
5												Обрыв фазы A , в других фазах – активная нагрузка	Четырехпроводная
6												— // —	Трехпроводная
7												Короткое замыкание фазы A , в других	Трехпроводная

			фазах – активная нагрузка	
8			Равномерная нагрузка $\underline{Z}_a = R1,$ $\underline{Z}_b = X_c$ $(\varphi_c < 0),$ $\underline{Z}_c = \underline{Z}_k$ $(\varphi_k > 0)$	Четырехпроводная
9			— // —	Трехпроводная

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ 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

$$I_l = \sqrt{3} \cdot I_\phi. \quad (6.1)$$

Построение векторной диаграммы начинается со звезды фазных напряжений и треугольника линейных напряжений источника

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = U_l \cdot e^{j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} = U_l \cdot e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} = U_l \cdot e^{j150^\circ}. \end{cases} \quad (6.2)$$

Затем под углами φ_i к соответствующим напряжениям приемника 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.

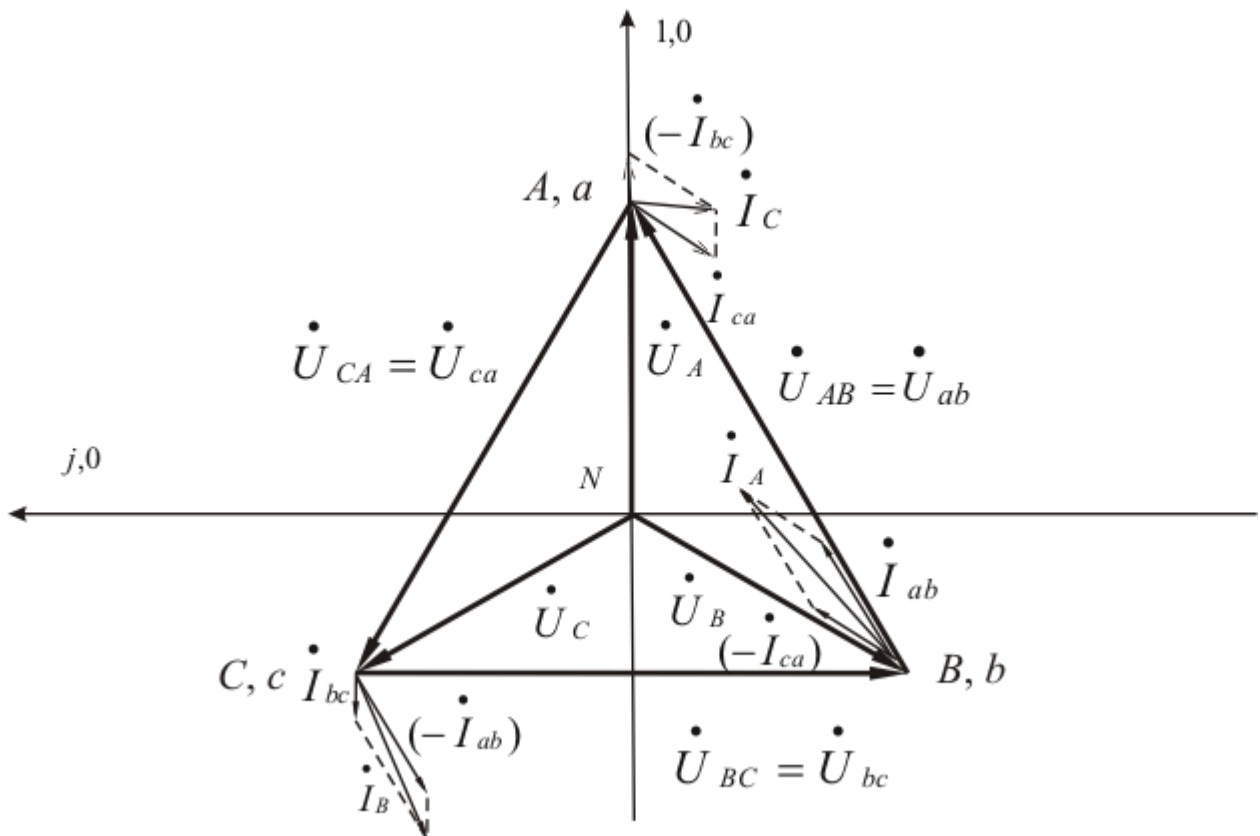


Рис. 6.1

В общем случае линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{cases} \quad (6.3)$$

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 слу-

чая двухфазного короткого замыкания при наличии реального источника энергии.

3. Составьте бланк отчета.

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 вторичных фазных обмотках трансформатора, замеряя 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.

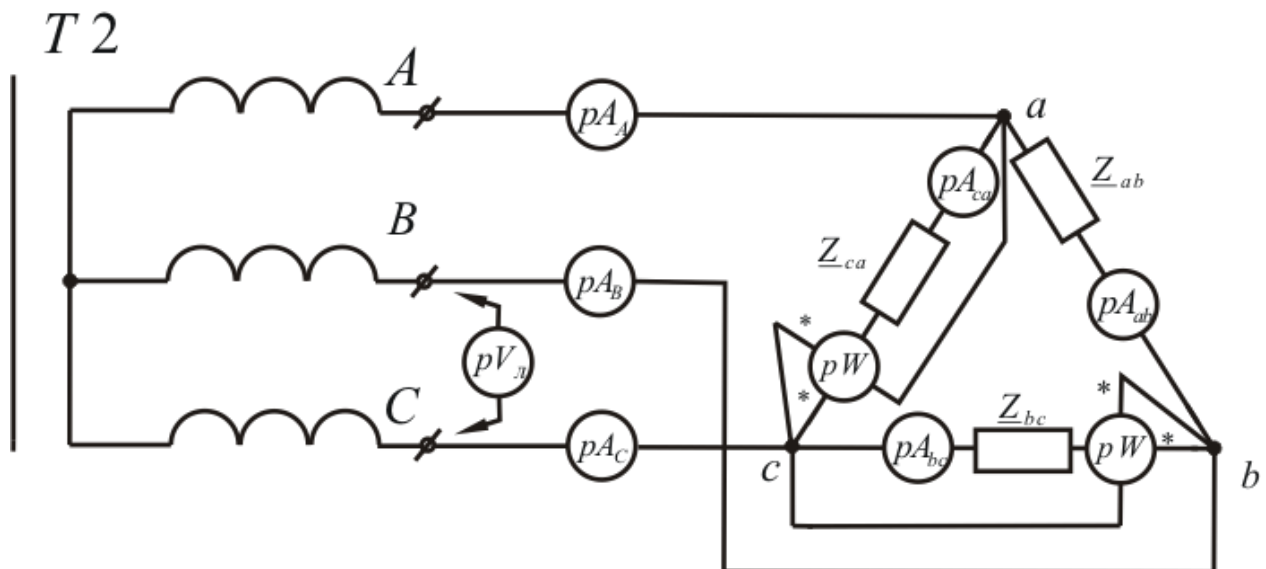


Рис. 6.2

Таблица 6.1

№	ИЗМЕРЕНО							Из векторной диаграммы			Состояние приёмника
	$U_{\text{л}}$ 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, $\underline{Z}_{ab} = R_1$, $\underline{Z}_{bc} = X_c$, $(\varphi_c < 0)$, $\underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_k$ $(\varphi_k > 0)$

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.

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 графо-аналитическим методом.

Основные теоретические положения

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

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k). \quad (7.1)$$

Иначе

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A'_{km} \sin k\omega t + A''_{km} \cos k\omega t), \quad (7.2)$$

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

$$\psi_k = \arctg \frac{A''_{km}}{A'_{km}}.$$

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

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t \right). \quad (7.3)$$

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:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(t); \quad (7.4)$$

$$A'_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(t) \sin_p(k\omega t); \quad (7.5)$$

$$A''_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(t) \cos_p(k\omega t), \quad (7.6)$$

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 четных 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 (ток, напряжение) равно квадратному корню из суммы квадратов по-

стоянной составляющей и действующих значений отдельных гармоник.

$$A = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots} \quad (7.7)$$

Активная мощность в несинусоидальной цепи определяется по формуле:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k, \quad (7.8)$$

реактивная мощность – по формуле:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k. \quad (7.9)$$

В данных цепях возникает мощность искажения:

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}, \text{ ВА}. \quad (7.10)$$

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

$$X_{Lk} = k\omega L = kX_{L1}, \quad (7.11)$$

$$X_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{X_{C1}}{k}. \quad (7.12)$$

Задания 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 чем отличие явления резонанса в цепях синусоидального тока и несинусоидальных цепях?

4. Составьте бланк отчета.

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

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

где y – амплитуда напряжения на экране осциллографа, мм.

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

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

2. Соберите цепь по схеме рис. 7.1.

3. Установите закоротку на точки a и b . Подайте заданное преподавателем напряжение частотой 50 Гц от трансформатора T и напряжение частотой 250 Гц от звукового генератора (ЗГ) на сопротивление нагрузки $R1$. 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 включенной с помощью контакта QA коммутатора $K1$ индуктивности L .

5. Переключите контакт QA на емкость 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.

7. Соберите цепь по схеме рис. 7.2, включив мостовой выпрямитель $\Pi 2$.

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

9. Соберите цепь по схеме рис. 7.3, добавив сглаживающий фильтр $\Pi 1$ (фильтр второй гармоники).

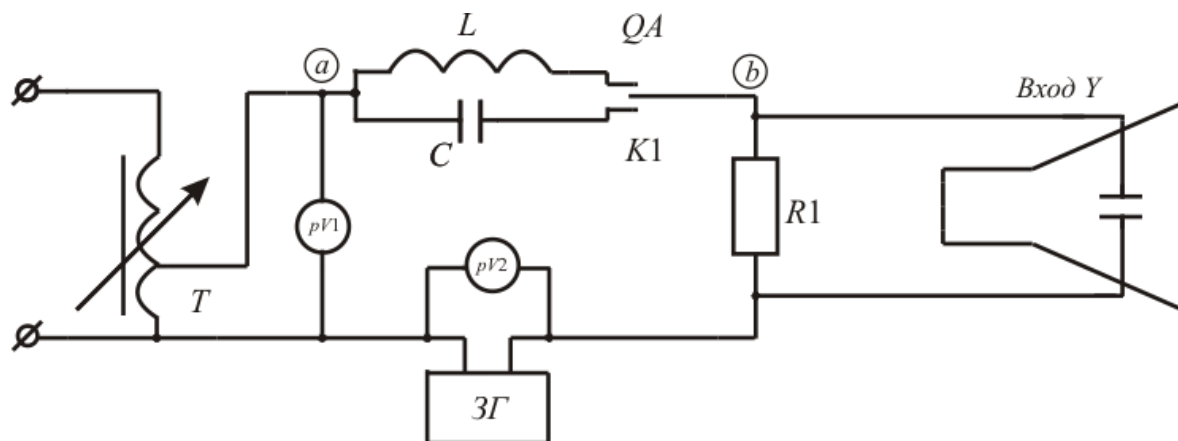


Рис. 7.1

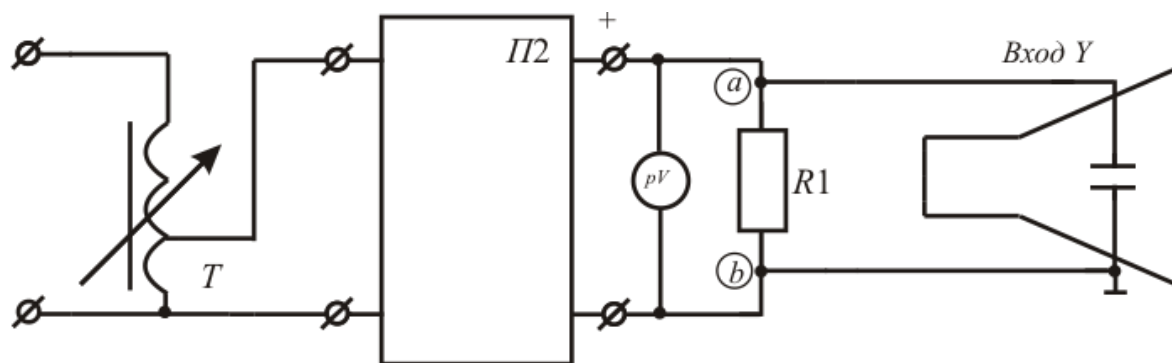


Рис. 7.2

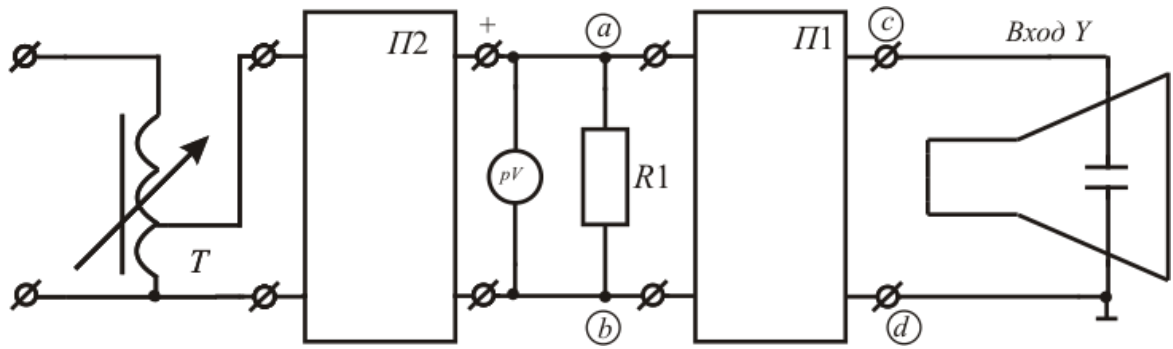


Рис. 7.3

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

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

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: экспериментальное снятие кривых переходных процессов в R -, L -, C -цепях при включении их на постоянное напряжение.

Основные теоретические положения

В любой линейной электрической цепи, содержащей один реактивный элемент, характер переходного процесса является экспоненциальным.

Так, например, в последовательной R -, C - цепи, которая замыкается на постоянное напряжение, напряжение на конденсаторе и ток изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$u_c = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (8.1)$$

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8.2)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени переходного процесса.

При разрядке конденсатора на активное напряжение

$$u_c = U_c(0) e^{-t/\tau}, \quad (8.3)$$

$$i = -\frac{U_c(0)}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8.4)$$

где $U_c(0)$ – значение напряжения на конденсаторе в первый момент до коммутации.

В последовательной R -, L -, C -цепи переходный процесс протекает в зависимости от величины активного сопротивления R либо по экспоненциальному, либо по колебательному затуха-

ющему закону.

В случае периодического переходного процесса собственная частота колебательного контура определяется по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}. \quad (8.5)$$

Переходный процесс характеризуется также коэффициентом затухания $b = \frac{R}{2L}$ и декрементом затухания

$$\Delta = \frac{i(t)}{i(t+T)} = e^{bT_0}, \text{ где } T_0 - \text{период затухающих колебаний.}$$

Ток в цепи определяется выражением:

$$i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} e^{-bt} \sin(\omega_0 t). \quad (8.6)$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Объясните, как меняется форма кривой переходного тока в цепи с увеличением в ней количества реактивных элементов.
2. Выведите формулу для переходного тока в последовательной R -, L -, C -цепи при колебательном характере переходного процесса.
3. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

Данная работа выполняется на стенде № 2.

1. Соберите цепь по схеме рис. 8.1.
2. Включите с помощью ручного коммутатора $K1$ цепь с заданными преподавателем параметрами $R1$ и $C1(C4)$ на постоянное напряжение U четырехполюсника $\Pi 2$ и снимите зависимость $u_c = f(t)$. Опытные данные занесите в табл. 8.1.

3. Зная входное напряжение R -, C -цепи U и напряжение u_c , рассчитайте переходные значения напряжения на активном элементе $R1$ u_R , зарядный ток $i_{зар}$, а также постоянную времени $\tau = RC$. Расчетные данные занесите в табл. 8.1.

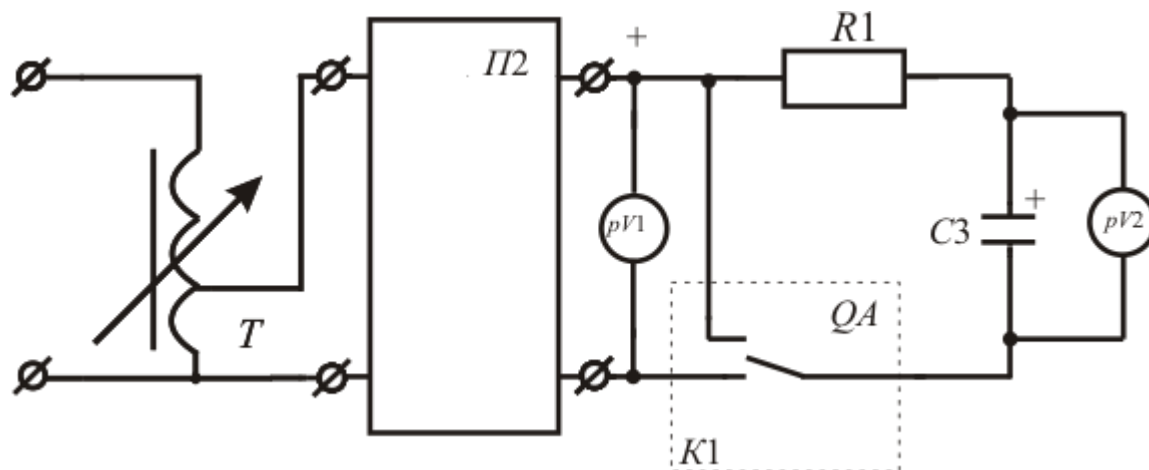


Рис. 8.1

4. Постройте совмещенные графики зависимостей u_c , $i_{зар}$, $u_R = f(t)$. Определите графически постоянную τ .

Таблица 8.1

Измерено			Вычислено		
U , В	u_c , В	t , с	U_R , В	$i_{зар}$, А	τ , с

5. Закоротите конденсатор на активное сопротивление $R1$, переключив контакты QA . При зарядке конденсатора снимите зависимость $u_c = f(t)$. Опытные данные занесите в табл. 8.2.

6. Рассчитайте переходные значения u_R и $i_{раз}$ и занесите их в табл. 8.2.

7. Постройте совмещенные графики зависимости u_c , $i_{раз}$, $u_R = f(t)$.

Таблица 8.2

Измерено		Вычислено	
u_c , В	t , с	$i_{раз}$, А	U_R , В

8. Прodelайте пп. 2–7 для меньшего значения $R1$.

9. Выполните аналитический расчет переходного процесса заряда и разряда при большем значении $R1$ и заданной емкости конденсатора. Постройте теоретические кривые u_c , $i = f(t)$ при зарядке и разрядке конденсатора.

10. Соберите цепь по схеме рис. 8.2, содержащую автоматический коммутатор $K2$, который должен производить поочередное подключение конденсатора $C1$ либо на постоянное напряжение моста $П2$, либо к разрядному сопротивлению $R2$. Напряжение, пропорциональное току переходного процесса i при подключении конденсатора $C1$ на постоянное напряжение, с шунта $Z2$ подается на пластины осциллографа.

11. Включите автотрансформатор T и коммутатор $K2$. Проследите по осциллографу, как в зависимости от величины сопротивления $R1$ меняется характер кривой переходного тока i .

12. Снимите кривые $i = f(t)$ для трех значений $R1$ при колебательном переходном процессе.

13. Определите из кривых $i = f(t)$ период затухающих колебаний T и угловую частоту ω_0 , рассчитайте декремент затухания Δ .

14. Для выбранного значения $R1$ теоретически рассчитайте $i = f(t)$ по формуле (8.6) и величину Δ .

Коэффициент затухания можно определить по формуле

$$b = \frac{R_{L1} + R1 + R_{Z2}}{2L1}.$$

Величина $L1$ задается преподавателем, активные сопротив-

ления необходимо измерить омметром. Постройте график теоретической зависимости $i = f(t)$.

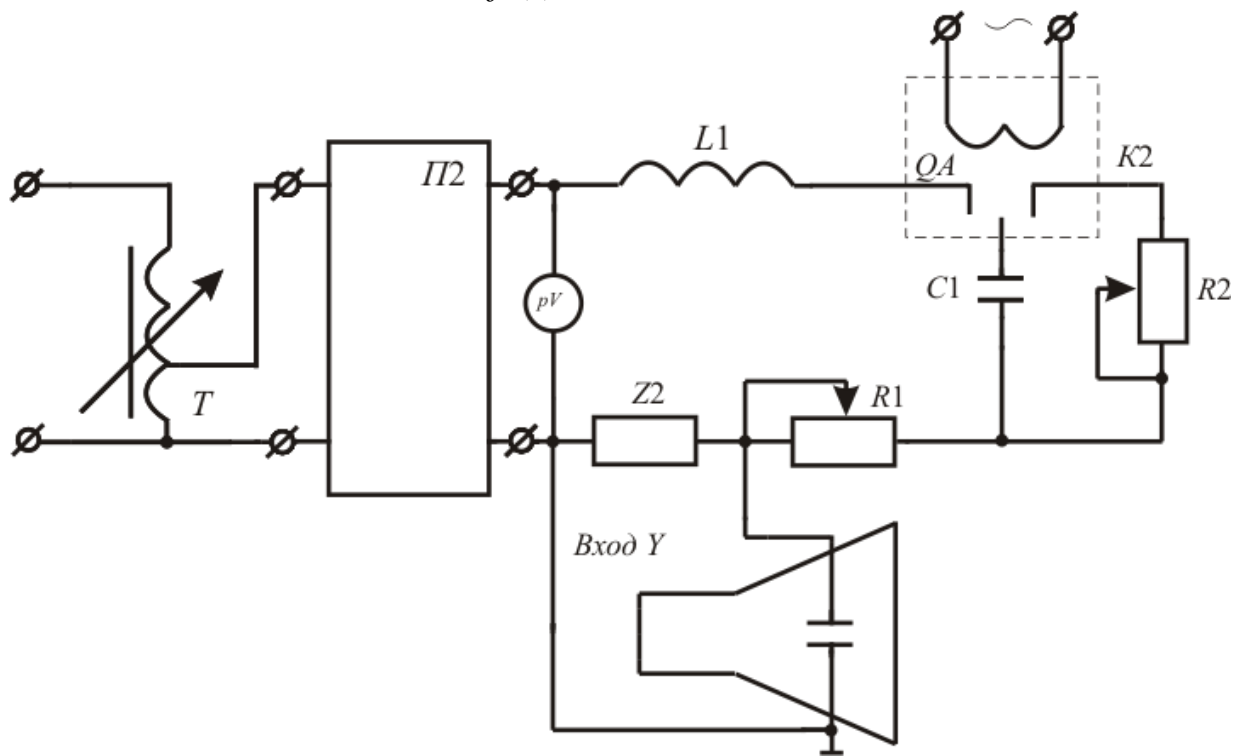


Рис. 8.2

Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы: определение постоянных коэффициентов четырехполюсника и составление его схемы замещения, анализ режимов работы четырехполюсника.

Основные теоретические положения

Пассивный четырехполюсник, схема которого приведена на рис. 9.1, имеет два первичных (входных) зажима – 1 и 1' и два вторичных (выходных) – 2 и 2'.

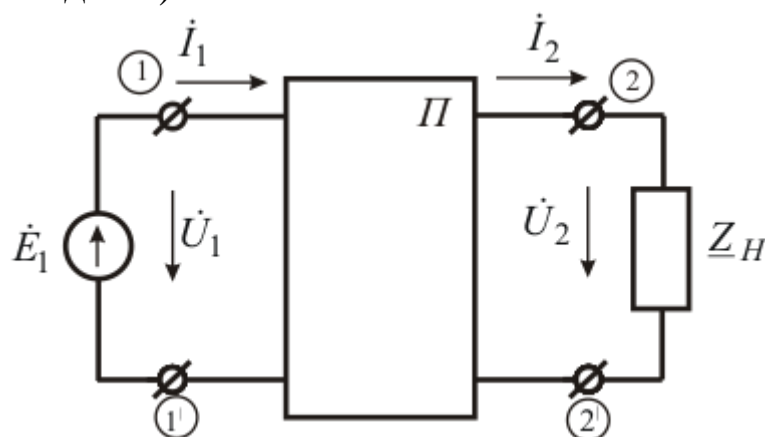


Рис. 9.1

Напряжения и токи пассивного четырехполюсника связаны между собой уравнениями *A*-формы:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{cases} \quad (9.1)$$

где *A*, *B*, *C*, *D* – первичные параметры четырехполюсника, для которых справедливо равенство $AD - BC = 1$.

Для симметричного четырехполюсника $A = D$.

Первичные параметры можно определить с помощью сопротивлений холостого хода (Z_0) и короткого замыкания (Z_K):

$$A = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{20} - \underline{Z}_{2K}}}; \quad (9.2)$$

$$B = A\underline{Z}_{2K}; \quad (9.3)$$

$$C = \frac{A}{\underline{Z}_{10}}; \quad (9.4)$$

$$D = A \frac{\underline{Z}_{20}}{\underline{Z}_{10}}, \quad (9.5)$$

где индекс «1» относится к сопротивлениям, определяемым при прямом питании четырехполюсника, индекс «2» – для обратного питания (питание со стороны зажимов 2–2').

На рис. 9.2 и рис. 9.3 изображены соответственно *T*- и *Π*-образные схемы замещения четырехполюсника.

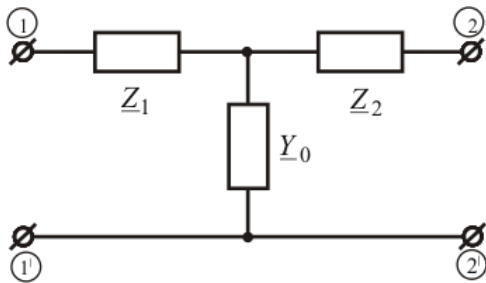


Рис. 9.2

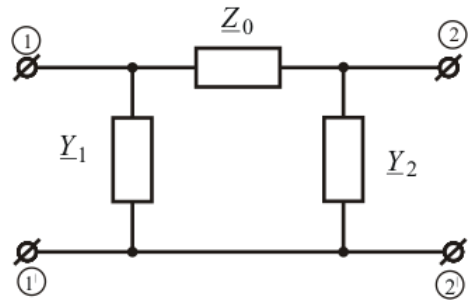


Рис. 9.3

Параметры схем замещения могут быть определены через первичные параметры по формулам:

$$\text{для } T\text{-образной схемы } \underline{Y}_0 = C; \quad \underline{Z}_1 = \frac{A-1}{C}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{D-1}{C};$$

$$\text{для } \Pi\text{-образной схемы } \underline{Z}_0 = B; \quad \underline{Y}_1 = \frac{D-1}{B}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{A-1}{B}.$$

Входное сопротивление четырехполюсника при прямом питании можно определить по формуле

$$\underline{Z}_{ex} = \frac{A\underline{Z}_H + B}{C\underline{Z}_H + D} \quad (9.6)$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Приведите примеры пассивных четырехполюсников, нарисуйте схемы дифференцирующих и интегрирующих четырехполюсников и изучите их свойства.

2. Выведите уравнение окружности в комплексной форме записи, которая является годографом входного тока пассивного четырехполюсника.

Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде № 2 соберите цепь по схеме рис. 9.4 при прямом питании четырехполюсника. Пассивный четырехполюсник собирается по *T*- или *Π*-образной схеме из элементов, заданных преподавателем.

2. Прodelайте опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны зажимов 2-2'. Данные опытов занесите в табл. 9.1.

3. Переключите схему четырехполюсника на обратное питание (со стороны зажимов 2–2').

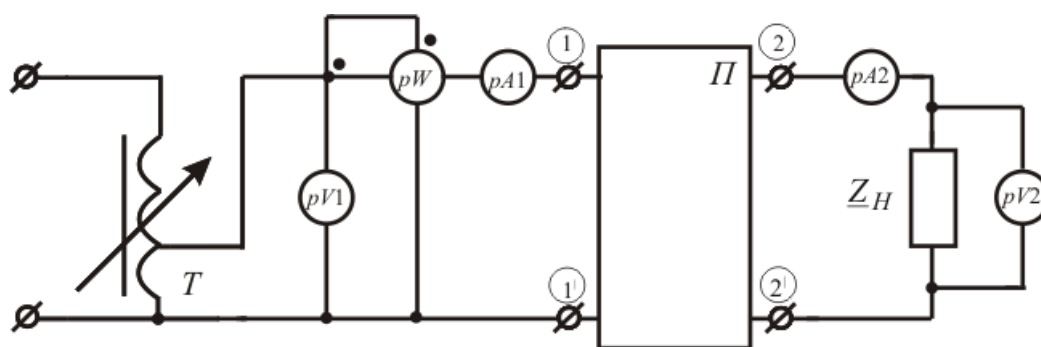


Рис. 9.4

4. Прodelайте опыты холостого хода и короткого замыка-

ния со стороны зажимов 1–1'. Данные опытов занесите в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Вид питания	Опыт	U_1 , В	I_1 , А	U_2 , В	I_2 , А	P , Вт
Прямое	Холостой ход					
Прямое	Короткое замыкание					
Обратное	Холостой ход					
Обратное	Короткое замыкание					

5. По опытным данным определите входные сопротивления четырехполюсника, с помощью которых по формулам (3.2)-(3.5) рассчитайте постоянные коэффициенты четырехполюсника A , B , C , D . Полученные значения коэффициентов используйте для расчета сопротивлений заданной схемы четырехполюсника.

6. При прямом питании четырехполюсника подключите к его зажимам 2–2' нагрузку $Z_H = R_1$. Изменяя сопротивление нагрузки, снимите три замера приборов. Результаты опытов занесите в табл. 9.2.

7. По опытным данным определите Z_H и Z_{BX} . Рассчитайте по формуле 9.6 значения входного сопротивления Z'_{BX} и сравните их с экспериментальными данными. Результаты расчетов занесите в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Измерено					Вычислено		
U_1 , В	I_1 , А	U_2 , В	I_2 , А	P , Вт	Z_H , Ом	Z_{BX} , Ом	Z'_{BX} , Ом

Лабораторная работа № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное исследование электрических цепей постоянного тока, содержащих нелинейный элемент, исследование свойств нелинейного элемента при включении его в схему стабилизации напряжения.

Основные теоретические положения

Расчет цепей постоянного тока, элементы которых обладают нелинейными вольт–амперными характеристиками (ВАХ), удобно производить графическим методом.

На рис. 10.1 приведена схема с последовательным соединением двух нелинейных элементов, а на рис. 10.2 – графическое определение тока в цепи при заданных величине ЭДС источника E и ВАХ элементов $I(U_1)$ и $I(U_2)$.

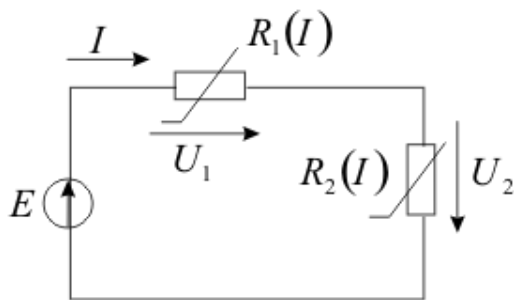


Рис. 10.1

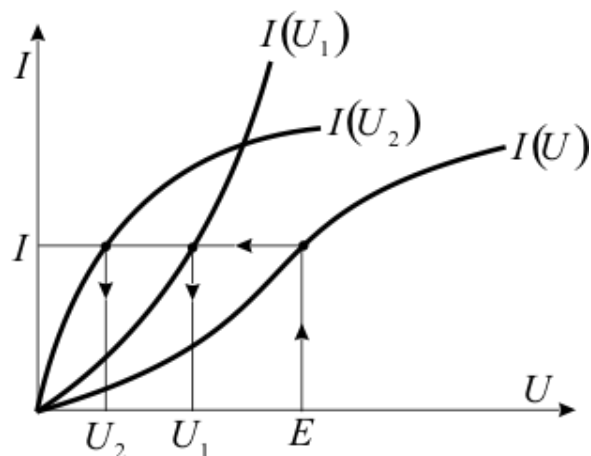


Рис. 10.2

Предварительно строится вспомогательная характеристика цепи $I(U_1 + U_2)$ или ВАХ цепи $I(U)$ путем суммирования абсцисс двух нелинейных ВАХ для одних и тех же значений тока, на которую проецируется величина ЭДС, определяющая ток цепи I .

Точки пересечения линии тока цепи с ВАХ элементов отмечают на оси абсцисс падения напряжения на нелинейных элементах U_1 и U_2 .

Расчет параллельной схемы, показанной на рис. 10.3, приведен на рис. 10.4. ВАХ цепи $I(U)$, где $I = I_1 + I_2$, строится путем суммирования ординат двух нелинейных ВАХ для одних и тех же значений напряжения. Перпендикуляр к оси абсцисс из точки с $U = E$ до пересечения с ВАХ цепи и параллельных ветвей определит общий ток I и токи в ветвях I_1 и I_2 .

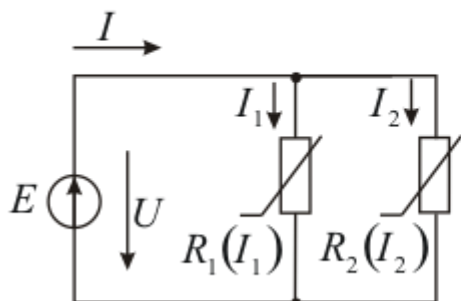


Рис. 10.3

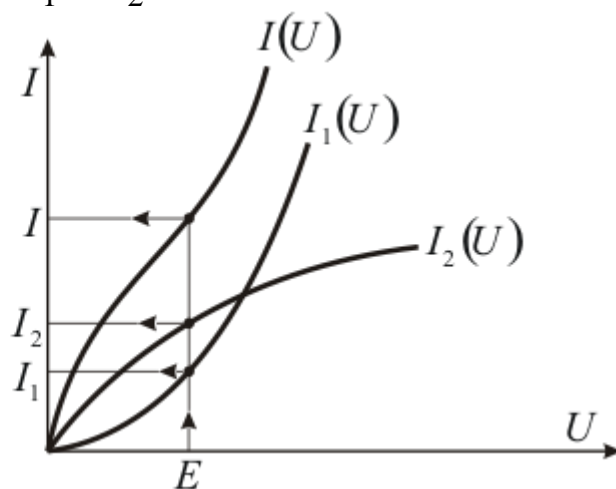


Рис. 10.4

На рис. 10.5 показан пример схемы со смешанным соединением, графический расчет которой приведен на рис. 10.6.

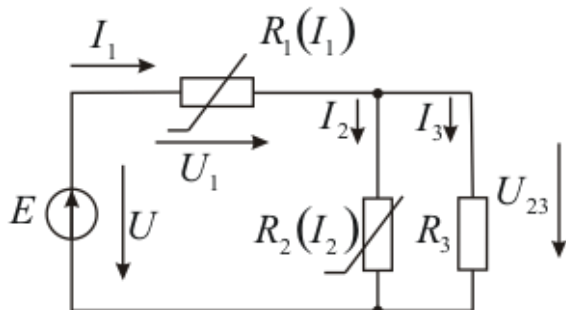


Рис. 10.5

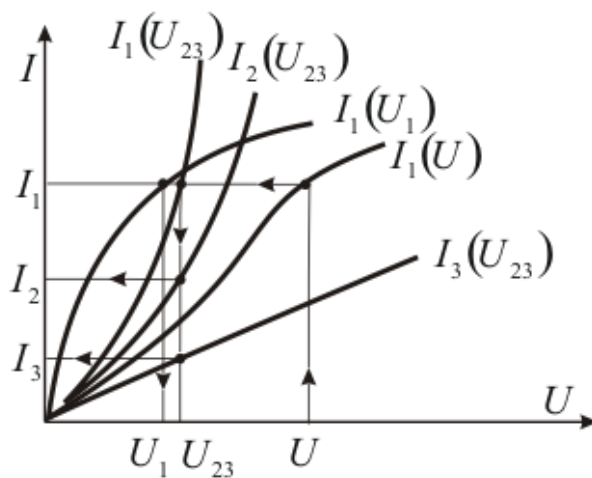


Рис. 10.6

ВАХ первого и второго элементов – нелинейные, ВАХ третьего элемента – линейная. Первоначально суммированием ординат $I_2(U_{23})$ и $I_3(U_{23})$ для одних и тех же значений напряжения строится ВАХ параллельного соединения $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$. Затем суммированием абсцисс $I_1(U_1)$ и $I_1(U_{23})$ для одних и тех же значений тока строится ВАХ всей цепи $I_1(U_1 + U_{23}) = I_1(U)$.

Зная напряжения источника U , можно определить I_1 , U_1 , U_{23} , I_2 и I_3 .

Задание для самостоятельной подготовки

1. Определите ВАХ цепи, состоящей из трех параллельно включенных нелинейных элементов.
2. Произведите качественный расчет цепи, состоящей из четырех нелинейных элементов со смешанным соединением.
3. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде № 1.

1. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 10.7.
2. Закоротите резистор R_1 и снимите ВАХ резистора R_7 , изменяя напряжение источника E_1 . Снимите закоротку.
3. Закоротите резистор R_7 и снимите ВАХ резистора R_1 , изменяя величину E_1 . Снимите закоротку.
4. Снимите ВАХ цепи, состоящей из R_1 и R_7 , изменяя величину E_1 . Результаты опытов пп. 2 – 4 занесите в табл. 10.1. В одной системе координат постройте полученные ВАХ.
5. По ВАХ элементов R_1 и R_7 постройте графически ВАХ последовательной цепи.
6. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 10.8.
7. Снимите ВАХ цепи, изменяя величину E_1 . Данные опыта занесите в табл. 10.1. Постройте экспериментальную ВАХ цепи.

8. По ВАХ элементов R_1 и R_7 постройте графически ВАХ параллельной цепи.

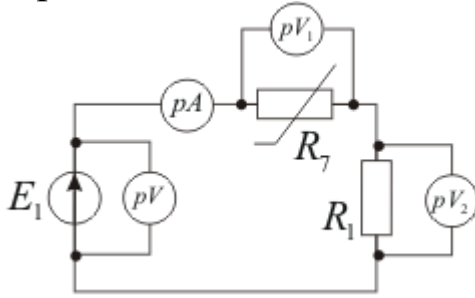


Рис. 10.7

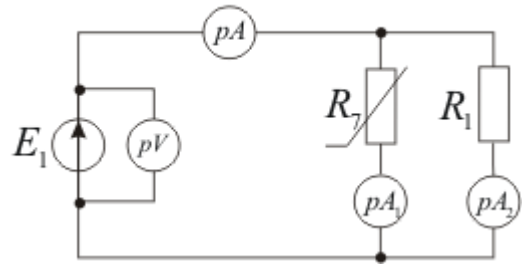


Рис. 10.8

9. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 10.9.

Таблица 10.1

Резистор R_7		Резистор R_1		Последовательная цепь R_1, R_7		Параллельная цепь R_1, R_7	
$U_1, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$

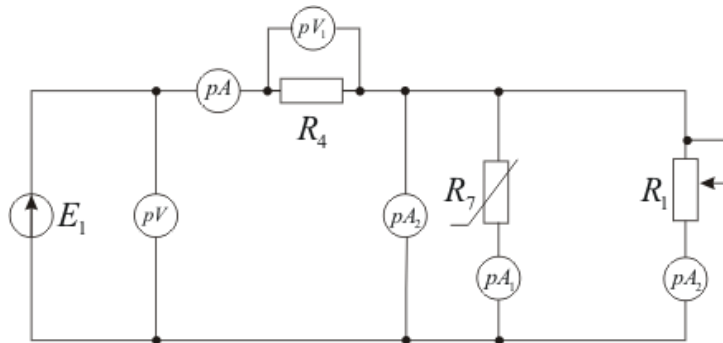


Рис. 10.9

10. При неизменном напряжении источника E_1 , изменяя сопротивление R_1 , снимите пять замеров. Результаты занесите в табл. 10.2. Постройте совмещенные графики $U_1, U_2, I, I_1 = f(I_2)$.

11. Установив известные значения сопротивлений резисторов R_1 и R_4 и изменяя величину E_1 , снимите пять замеров. Ре-

зультаты занесите в табл. 10.2. Постройте совмещенные графики $U_1, U_2, I, I_1, I_2 = f(U)$.

Таблица 10.2

Условия опыта	$U, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$I, А$	$I_1, А$	$I_2, А$
$R_1 - \text{var}$						
$U - \text{var}$						

10. По ВАХ элементов цепи постройте графически ВАХ всей цепи и сравните ее с экспериментальной.

Лабораторная работа № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕЙ КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы: исследование периодических электромагнитных процессов в катушке индуктивности с ферромагнитным сердечником.

Основные теоретические положения

При слабой насыщенности сердечника, когда ВАХ катушки близка к прямой линии, т.е. доля высших гармоник в кривой тока мала, для анализа цепи применяется метод эквивалентных синусоид. Замена реальной кривой тока эквивалентной синусоидой позволяет пользоваться символическим методом расчета и строить векторные диаграммы.

При изменении основного магнитного потока $\dot{\Phi}_m$ в сердечнике катушки по синусоидальному закону уравнение электрического состояния имеет вид

$$\dot{U} = \dot{I} R + j\omega L_S \dot{I} + \dot{U}_\Phi, \quad (11.1)$$

где \dot{I} и \dot{U} – соответственно ток и напряжение на катушке;

L_S – индуктивность рассеяния, обусловленная потоком рассеяния; \dot{U}_Φ – напряжение, уравнивающее ЭДС, наводимую основным магнитным потоком; R – активное сопротивление обмотки катушки.

Схема замещения катушки приведена на рис. 11.1.

Напряжение \dot{U}_Φ , называемое напряжением, соответствующим трансформаторной ЭДС, определяется по формуле

$$\dot{U}_\Phi = j4,44 f W \dot{\Phi}_m, \quad (11.2)$$

где W – число витков обмотки.

Можно допустить, что \dot{U}_Φ падает на участке схемы с сопротивлением \underline{Z}_0 , которое можно разложить на составляющие по двум схемам, изображенным на рис. 11.1, с R_0 и X_0 либо с g_0 и b_0 .

Таким образом, каждый из элементов R , X_s , R_0 , X_0 учитывает отдельные явления – потерю мощности в обмотке (меди) P_m , рассеивание магнитного потока, потерю мощности в сердечнике (стали) P_{cm} и прохождение в магнитопроводе основного магнитного потока, соответственно.

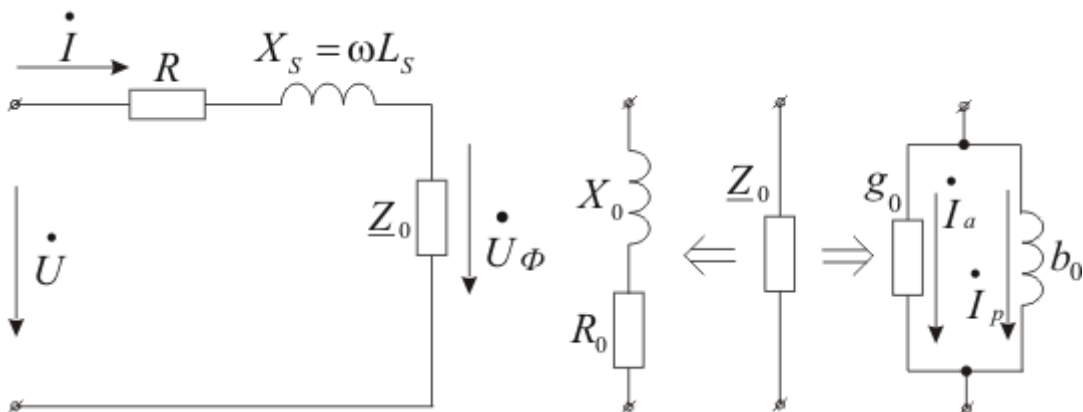


Рис. 11.1

Потери мощности в стали P_{cm} пропорциональны мощности

петли гистерезиса материала сердечника, с другой стороны их можно определить по формуле

$$P_{cm} = U_{\Phi} I \cos \theta = U_{\Phi} I_a, \quad (11.3)$$

где $\theta = 90^\circ - \delta$; δ - угол магнитного запаздывания (потерь).

На рис. 11.2 показана векторная диаграмма катушки с ферромагнитным сердечником.

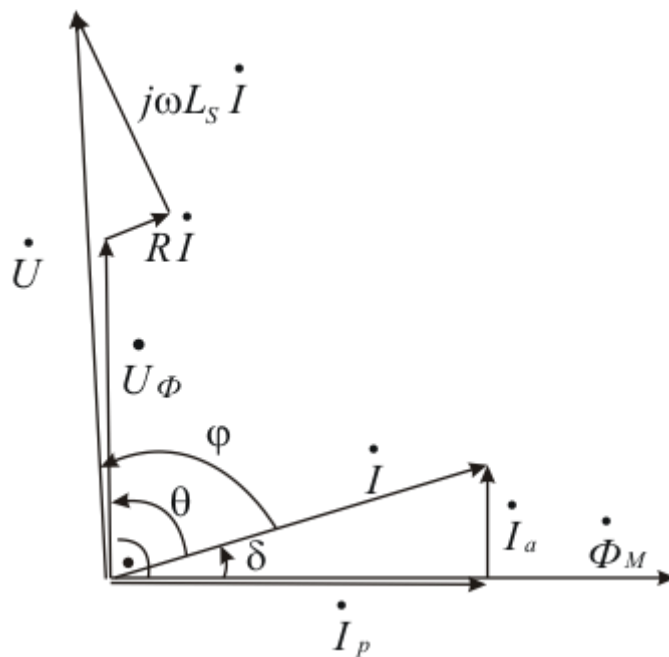


Рис. 11.2

Задание для самостоятельной подготовки

1. Изобразите временные диаграммы реального и эквивалентного тока, основного магнитного потока и напряжения на катушке.
2. Приведите формулы для трансформаторной ЭДС.
3. Покажите, как с изменением напряжения на катушке изменяется состояние сердечника, и влияние напряжения на форму тока в катушке.
4. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде № 1.

1. Произведите градуировку осциллографа, для чего подайте известное напряжение от источника переменного напряжения поочередно на каналы X и Y осциллографа. Масштабы определяются по формулам:

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}U_y}{n_y}, \text{ В/мм};$$

$$m_x = \frac{2\sqrt{2}U_x}{n_x}, \text{ В/мм},$$

где U_y и U_x - действующие значения напряжений, подаваемых на соответствующие каналы осциллографа, В; n_y и n_x - длины световых полосок по вертикали и горизонтали, соответственно, мм.

2. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 11.3.

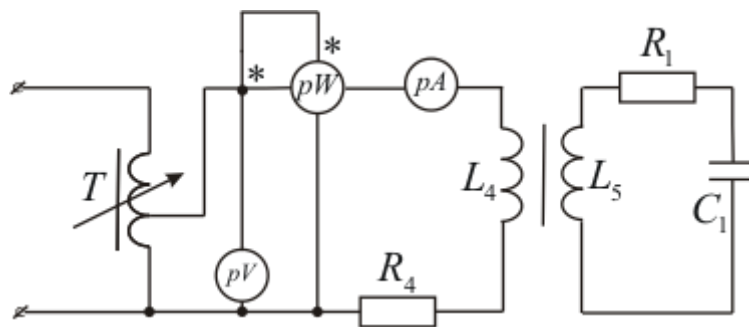


Рис. 11.3

3. Подайте сигнал с шунта R_4 на вход Y осциллографа. Изменяя входное напряжение автотрансформатора T , снимите ВАХ катушки $U(I)$. Для трех значений напряжений, соответ-

ствующих ненасыщенному, промежуточному и насыщенному состоянию сердечника, зарисуйте кривые тока i катушки.

4. По ВАХ катушки вычислите зависимость $Z = f(I)$. Результаты опыта занесите в табл. 11.1.

Таблица 11.1

U , В	I , А	Z , Ом

5. Для одного значения напряжения U (при насыщенном сердечнике) произведите измерение потерь мощности в магнитопроводе, подав на выход X осциллографа сигнал с шунта R_4 , пропорциональный напряженности H магнитного поля сердечника, а на вход Y – сигнал с конденсатора C_1 , пропорциональный магнитной индукции B . На экране осциллографа (при отключенной развертке) будет наблюдаться динамическая петля гистерезиса, которую необходимо зарисовать и измерить ее площадь S_n в мм².

Масштаб в единицах магнитной индукции определится по формуле

$$M_y = \frac{m_y R_1 C_1}{W_2 S}, \text{ Тл/мм},$$

где W_2 – число витков катушки L_5 ; S – поперечное сечение сердечника, м².

Масштаб в единицах напряженности определится по формуле

$$M_x = \frac{m_x W_1}{R_4 l_{cp}}, \text{ А/м} \cdot \text{мм},$$

где W_1 – число витков в катушке L_4 ; l_{cp} – средняя длина магнитной линии в сердечнике, м.

Максимальные значения индукции и напряженности подсчитайте по формулам:

$$B_M = M_y \frac{n'_y}{2}, \quad H_M = M_x \frac{n'_x}{2},$$

где n'_x и n'_y – максимальный размер петли гистерезиса по вертикали и горизонтали, соответственно, мм.

Удельные потери мощности в магнитопроводе подсчитайте по формуле

$$p = \frac{S_n M_y M_x}{\gamma} f, \text{ Вт/кг},$$

где γ – плотность материала сердечника, кг/м³; f – частота напряжения, подаваемого на катушку L_4 , Гц.

Потери в стали определяются по формуле:

$$P_{cm} = p m, \text{ Вт},$$

где m – масса магнитопровода, кг.

Показания приборов запишите в табл. 11.2, у преподавателя получите недостающие данные: W_1 , W_2 , l_{cp} , γ , m , C_1 .

Таблица 11.2

U , В	I , А	P , Вт	R_1 , Ом	R_4 , Ом

6. Рассчитайте параметры последовательной схемы замещения катушки L_4 для выбранного значения напряжения U , используя опытные данные пункта 5, а также показания приборов:

$$\Phi_m = B_m S, \text{ Вб}; \quad U_\phi = E = 4,44 f W_1 \Phi_m, \text{ В}; \quad Z_0 = \frac{U_\phi}{I}, \text{ Ом};$$

$$R_0 = \frac{P_{cm}}{I^2}, \text{ Ом}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \text{ Ом}; \quad Z = \frac{U}{I}, \text{ Ом};$$

$$R = \frac{P - P_{cm}}{I^2}, \text{ Ом}; \quad X_s = \sqrt{Z^2 - (R_0 + R)^2} - X_0, \text{ Ом};$$

$$\theta = \arccos \frac{P_{cm}}{U_\phi I}, \text{ град}; \quad I_a = \frac{P_{cm}}{U_\phi}, \text{ А}.$$

7. Постройте векторную диаграмму для катушки L_4 .

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: Исследование нелинейной цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора.

Основные теоретические положения

В цепях с нелинейной катушкой индуктивности и конденсатором плавное изменение напряжения источника может вызывать скачки фазы и амплитуды основной гармоники тока и наоборот – плавное изменение тока источника может сопровождаться скачкообразным изменением фазы и амплитуды основной гармоники напряжения на некоторых участках цепи. Это явление называется феррорезонансом.

Анализ данных цепей удобно производить методом эквивалентных синусоид.

При последовательном соединении катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора может возникать феррорезонанс напряжений. На рис. 12.1 приведена схема данной цепи, на рис. 12.2 – ее графический расчет.

При условии отсутствия потерь в катушке напряжение на ней опережает ток на $\pi/2$. На конденсаторе ток опережает напряжение на $\pi/2$. Поэтому векторы \dot{U}_L и \dot{U}_C имеют противоположные фазы, а $U = |U_L - U_C|$.

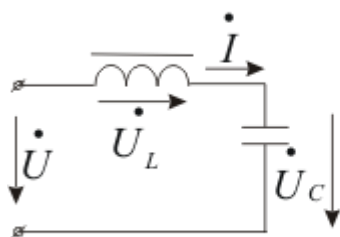


Рис. 12.1

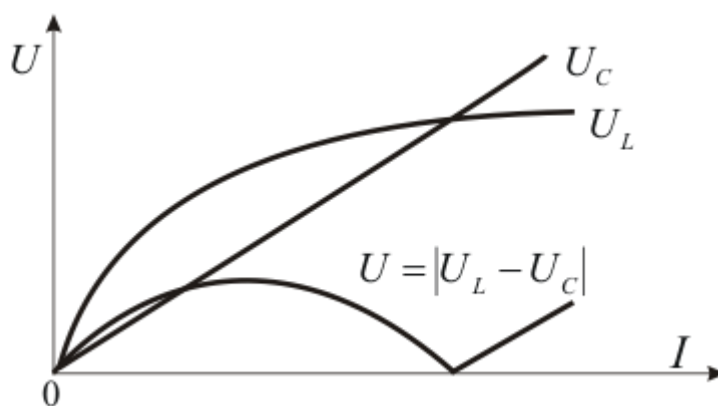


Рис. 12.2

Точка соприкосновения кривой $U(I)$ с осью абсцисс на рис. 12.2 соответствует феррорезонансу напряжений ($U_L = U_C$).

Практически из-за потерь в стали и в сопротивлении обмотки кривая $U(I)$ имеет вид, показанный на рис. 12.3.

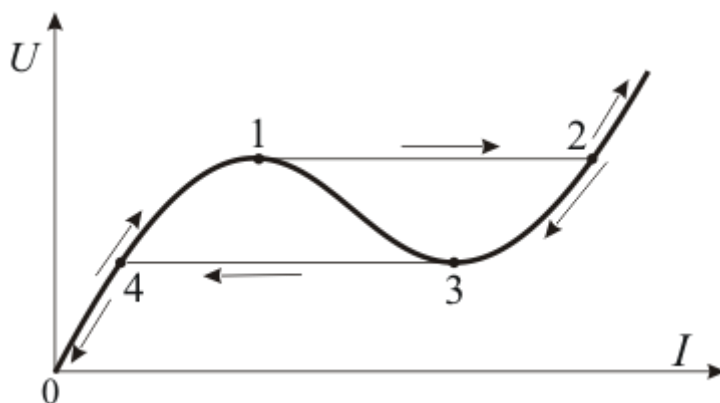


Рис. 12.3

Если цепь питается от источника напряжения, то на участке 0-1 ток по фазе отстает от напряжения ($U_L > U_C$). В точке 1 происходит скачек тока до точки 2, при этом ток опережает по фазе напряжение ($U_C > U_L$). Дальнейшее возрастание напряжения сопровождается плавным увеличением тока. Уменьшение напряжения снова вызывает скачек тока на участке 3-4. Участок 1-3 характеристики – неустойчивый, на нем начинается самопроизвольный переходный процесс. Характеристику $U(I)$ для всех

значений тока (без скачков) можно получить в случае питания цепи от источника тока.

Задание для самостоятельной подготовки

1. Выделите основные участки ВАХ последовательного феррорезонансного контура, запишите, каким будет сопротивление контура на этих участках, выясните, чем отличаются эти участки.

2. Постройте векторные диаграммы для устойчивых участков ВАХ последовательной цепи с нелинейной катушкой и конденсатором для одного значения входного напряжения, которому соответствуют три значения тока.

3. При каких параметрах данной цепи феррорезонанс напряжения невозможен?

4. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется на стенде № 2.

1. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 12.4.

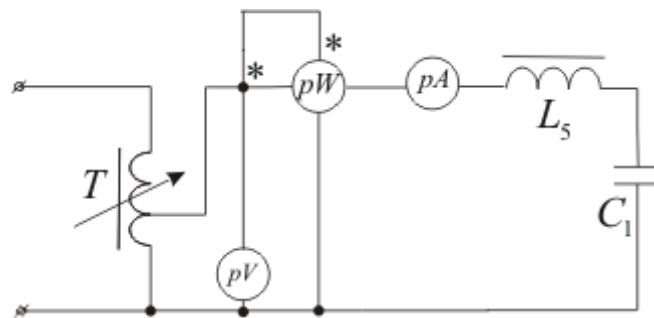


Рис. 12.4

2. Закоротите конденсатор C_1 и снимите ВАХ катушки индуктивности L_5 . Уберите закоротку.

3. Закоротите катушку L_5 и снимите ВАХ конденсатора C_1 . Уберите закоротку.

Результаты измерений пп.2 и 3 занесите в табл. 12.1.

4. По данным табл. 12.1 графически постройте результирующую ВАХ цепи, содержащей последовательно включенные катушки L_5 и конденсатор C_1 . При этом активные составляющие напряжений складываются арифметически, реактивные составляющие – алгебраически, а полные – геометрически.

Таблица 12.1

Катушка L_5					Конденсатор C_1				
Измерено			Вычислено		Измерено			Вычислено	
$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$U_L, В$	$U_{ак}, В$	$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$U_C, В$	$U_{ас}, В$

5. Для феррорезонансного контура (рис. 12.4) снимите восходящую и нисходящую ветви ВАХ путем регулирования напряжения на входе цепи. Результаты замеров занесите в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Регулирование напряжений				Регулирование тока			
Восходящая ветвь		Нисходящая ветвь		Восходящая ветвь		Нисходящая ветвь	
$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$	$U_1, В$	$I, А$	$U_1, В$	$I, А$

6. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 12.5

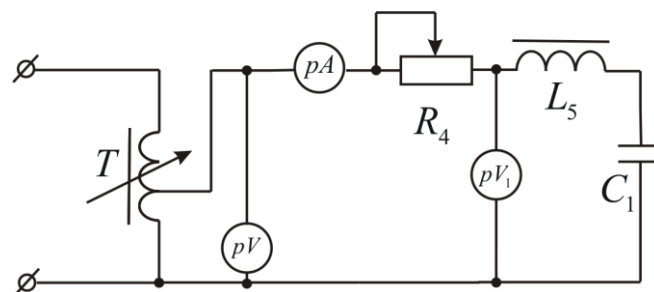


Рис. 12.5

7. Снимите восходящую и нисходящую ветви ВАХ $U_1(I)$ феррорезонансного контура ($L_5 - C_1$), регулируя ток в цепи с по-

мощью реостата R_4 . Напряжение на входе цепи U должно быть неизменным. Результаты замеров занесите в табл. 12.2.

8. По данным табл. 12.2 постройте ВАХ цепи. Сопоставьте экспериментальную и расчетную ВАХ.

Лабораторная работа № 13 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЕ

Цель работы: ознакомление с приемом моделирования потенциальных полей в электролитической ванне.

Основные теоретические положения

Метод моделирования в электролитической ванне основан на общности свойств поля в диэлектрике в области, где нет свободных зарядов, и поля в проводящей среде в области, где нет сторонних ЭДС. При этом аналогом вектора плотности тока $\vec{\delta}$ является в электростатическом поле вектор электрического смещения \vec{D} , аналогом тока I – заряд q , аналогом удельной проводимости γ – абсолютная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$.

Граничные условия задаются металлическими электродами, на которые подается напряжение от источника переменной ЭДС. В качестве проводящей среды (электролита) используется вода. Переменный ток распределяется в ванне практически так же, как и постоянный ток, но в отличие от последнего – не вызывает появления ЭДС поляризации около электродов и нагрев электролита.

Если геометрические размеры и форма проводящих электродов в ванне будут соответствовать размерам и форме заряженных проводящих тел в электростатическом поле, и если соот-

ношение токов, вытекающих из электродов, будет равно соотношению зарядов тел моделируемого электростатического поля, то картина электрического поля в электролитической ванне будет подобна картине электростатического поля в диэлектрике.

Полная проводимость между электродами в ванне:

$$y = \frac{I}{U} \quad (13.1)$$

соответствует емкости электростатического поля

$$C = y \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\gamma} \cdot K, \quad (13.2)$$

где K – коэффициент подобия, определяемый геометрическими масштабами.

Удельная проводимость электролита определяется с помощью пробных электродов, которые представляют собой плоские металлические пластины, размещаемые по всей ширине противоположных сторон ванны:

$$\gamma = y_0 \cdot \frac{\ell}{m \cdot h}, \quad (13.3)$$

где m и ℓ – соответственно ширина и длина ванны; h – глубина электролита в ванне; $y_0 = \frac{I_0}{U_0}$ – полная проводимость электролита, определенная с использованием пробных электродов.

Рассмотрим два варианта поля заряженных параллельных несоосных цилиндров, показанных на рис. 13.1 и 13.2.

Поля данных цилиндров эквивалентны полям двух разноименно заряженных осей с линейной плотностью заряда $\pm \tau$, поверхности равного потенциала которых должны совпадать с внешними поверхностями цилиндров.

Для обозначений геометрических размеров, принятых на рис. 13.1 и 13.2, определим положение электрических осей.

Неизвестные размеры S_1 , S_2 и a определяются из системы

уравнений:

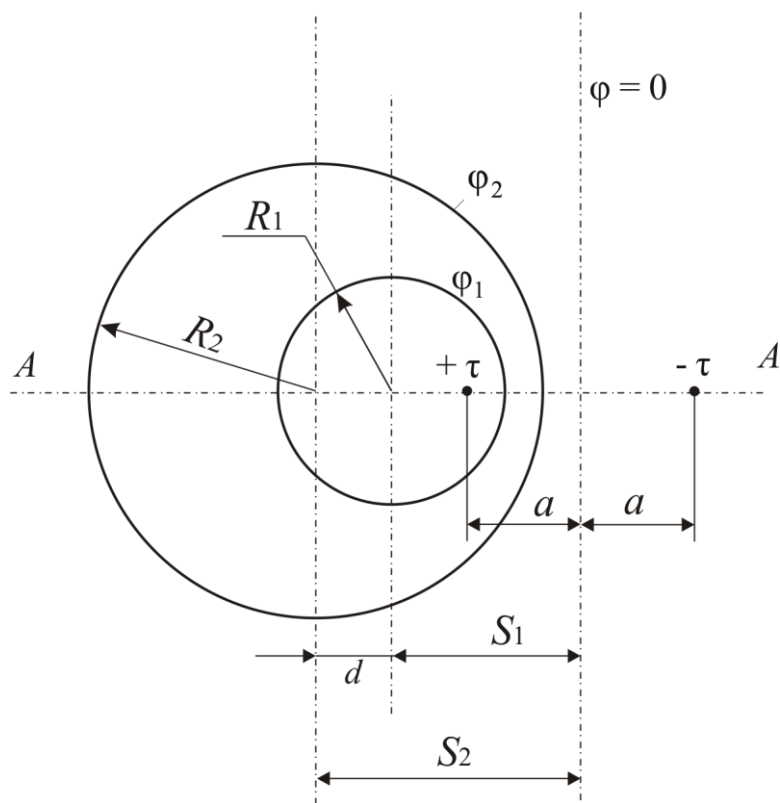


Рис. 13.1

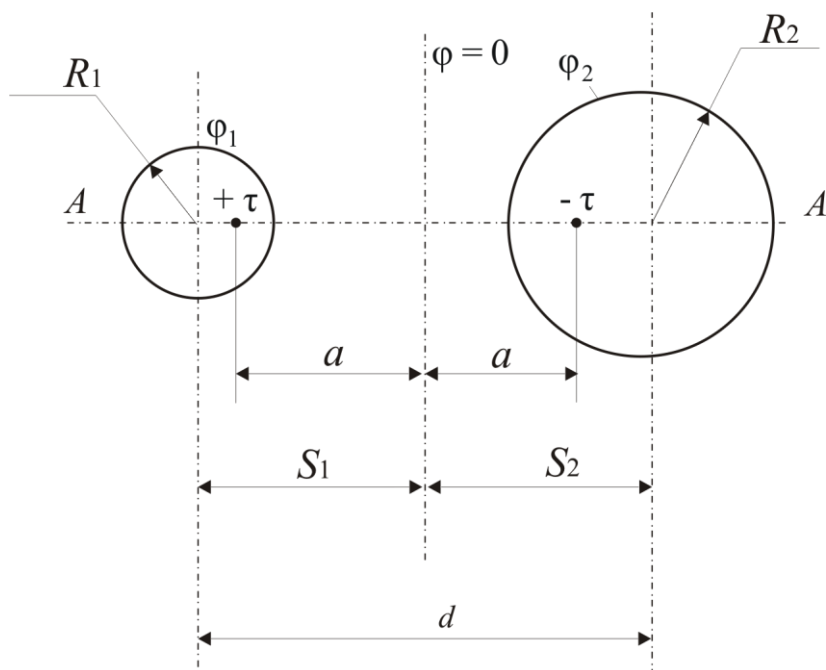


Рис. 13.2

для поля рис. 13.1

$$\begin{cases} (S_1 - a) \cdot (S_1 + a) = R_1^2; \\ (S_2 - a) \cdot (S_2 + a) = R_2^2; \\ S_1 - S_2 = d; \end{cases}$$

для поля рис. 13.2

$$\begin{cases} (S_1 - a) \cdot (S_1 + a) = R_1^2; \\ (S_2 - a) \cdot (S_2 + a) = R_2^2; \\ S_1 + S_2 = d. \end{cases}$$

При известном напряжении, подаваемом на цилиндры, линейные плотности заряда можно определить по формулам:

для поля рис. 13.1

$$\tau = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U}{\ln \frac{(S_1 + a) \cdot (S_2 - a)}{R_1 \cdot R_2}};$$

для поля рис. 13.2

$$\tau = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U}{\ln \frac{(S_1 + a) \cdot (S_2 + a)}{R_1 \cdot R_2}}.$$

Емкость между цилиндрами на единицу длины определяется по формулам:

для рис. 13.1

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{(S_1 + a) \cdot (S_2 - a)}{R_1 \cdot R_2}};$$

для рис. 13.2

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{(S_1 + a) \cdot (S_2 + a)}{R_1 \cdot R_2}}.$$

Потенциал в точке, отстоящей на расстоянии r_1 от положительной оси и на расстоянии r_2 от отрицательной оси, можно определить по формуле

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Составляющие напряженности поля, создаваемые каждой заряженной осью в точке, отстоящей от оси на расстоянии r , вычисляются по формуле

$$E_i = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r}.$$

Направление составляющей E_i определяется знаком заряженной оси, которая создает поле. Результирующий вектор \overline{E} определяется геометрическим сложением проекций

$$\overline{E} = \overline{E}(\tau) + \overline{E}(-\tau).$$

Задание для самостоятельной подготовки

1. Запишите все уравнения электрического и электростатического полей, позволяющие судить об их аналогии.
2. Выведите уравнение эквипотенциальных линий потенциального поля.

3. В любой точке поля качественно постройте по составляющим $\vec{E}_{(\tau)}$ и $\vec{E}_{(-\tau)}$ вектор \vec{E} .

4. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

1. Поместите пробные электроды в ванну на противоположные ее стороны и заполните ванну водой ниже верхнего края электродов на (2-5) мм.

2. Подключите электроды к цепи, схема которой показана на рис. 13.3.

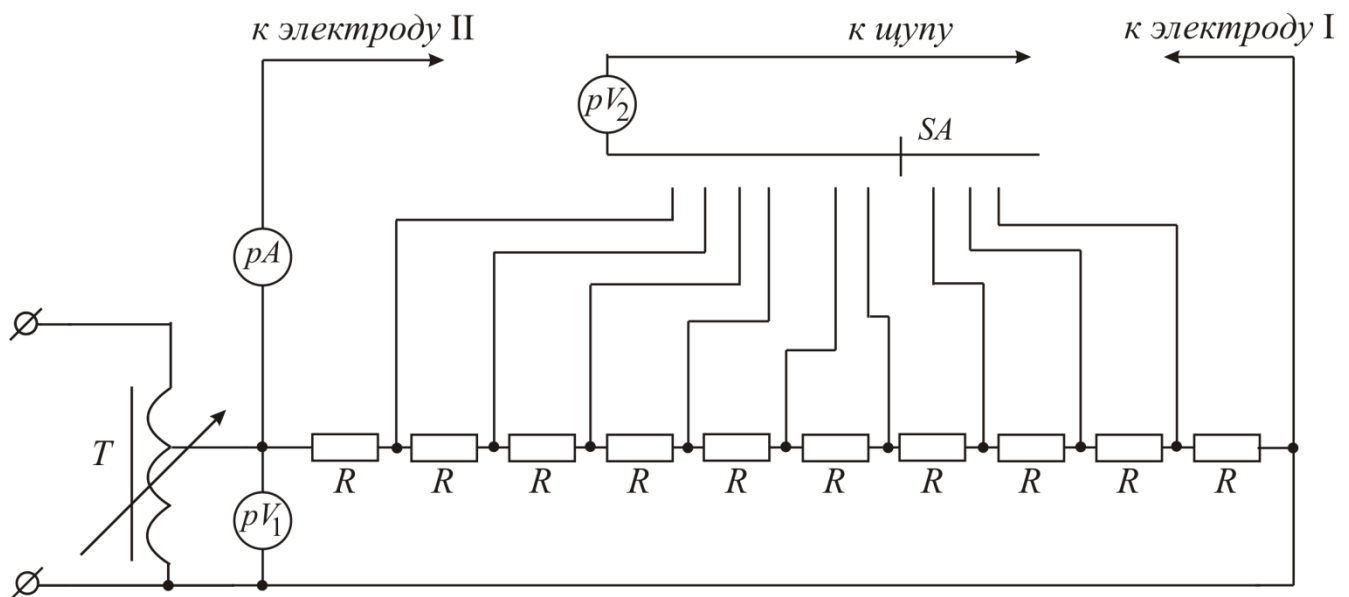


Рис. 13.3

3. Включите схему и установите с помощью автотрансформатора T напряжение U_0 на электродах (30-40) В. Замерьте ток I_0 через электролит. Зная геометрические размеры объема электролита, рассчитайте полную и удельную проводимости электролита.

4. Замените пробные электроды на цилиндрические и разместите их в ванне по варианту, указанному преподавателем в соответствии с рис. 13.1 или 13.2.

5. Не изменяя выходное напряжение автотрансформатора, подайте его на вновь установленные электроды и замерьте ток I через электролит. Рассчитайте полную проводимость между

электродами и емкость электростатического поля с заданными преподавателем параметрами моделируемого поля (ε и K), сравните рассчитанную емкость с теоретической.

6. Ориентируясь по сантиметровой сетке, которая нанесена на дне ванны, снимите эквипотенциали поля через 10% от приложенного к электродам I и II напряжения и нанесите их вместе с положением заряженных цилиндров на миллиметровую бумагу. При этом предполагается, что потенциал электрода I равен 0, а электрода II – 100%.

Переключатель SA устанавливает на щупе потенциал, равный 10, 20, ..., 90 % от приложенного напряжения. Задав на щупе определенный потенциал и перемещая щуп по поверхности электролита, необходимо найти такое положение щупа, при котором показание прибора pV_2 , используемого в качестве нуля-индикатора, будет равно 0.

Каждую такую точку необходимо отметить на миллиметровой бумаге, а затем все найденные точки соединить и получить соответствующую эквипотенциаль. Эквипотенциали строятся, начиная с 20%-ой от приложенного напряжения.

7. Дополните картину поля построением силовых линий, которые строятся перпендикулярно к эквипотенциалам так, чтобы потоки вектора \vec{E} в силовых трубках были одинаковы. В каждой ячейке, образованной силовыми линиями и эквипотенциалами, отношение средней длины (расстояние между эквипотенциалами) к средней ширине (расстояние между силовыми линиями) должно быть равным единице.

8. Рассчитайте плотности зарядов и координаты эквивалентных заряженных осей, потенциалы внешних поверхностей электродов. Укажите положение осей на картине поля.

9. Рассчитайте и постройте эпюру распределения потенциала в плоскости A–A, след которой проходит через центры цилиндров (см. рис. 13.1 и 13.2).

10. Для этой же плоскости рассчитайте и постройте эпюру распределения вектора напряженности поля.

11. В точке поля, заданной преподавателем, постройте вектор \vec{E} .

12. Теоретически рассчитайте 40%-ю эквипотенциаль (ради-

ус и координату центра) и постройте ее на картине поля.

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В СИСТЕМЕ КОНТУРОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ТОКАМИ

Цель работы: исследование зависимости взаимной индуктивности круглых катушек от расстояния между ними, исследование механических усилий, возникающих в системе двух катушек с токами.

Основные теоретические положения

Рассмотрим систему двух круглых катушек с токами, показанных на рис. 14.1. Катушки расположены в параллельных плоскостях так, что их центры лежат на одной прямой, нормальной к этим плоскостям.

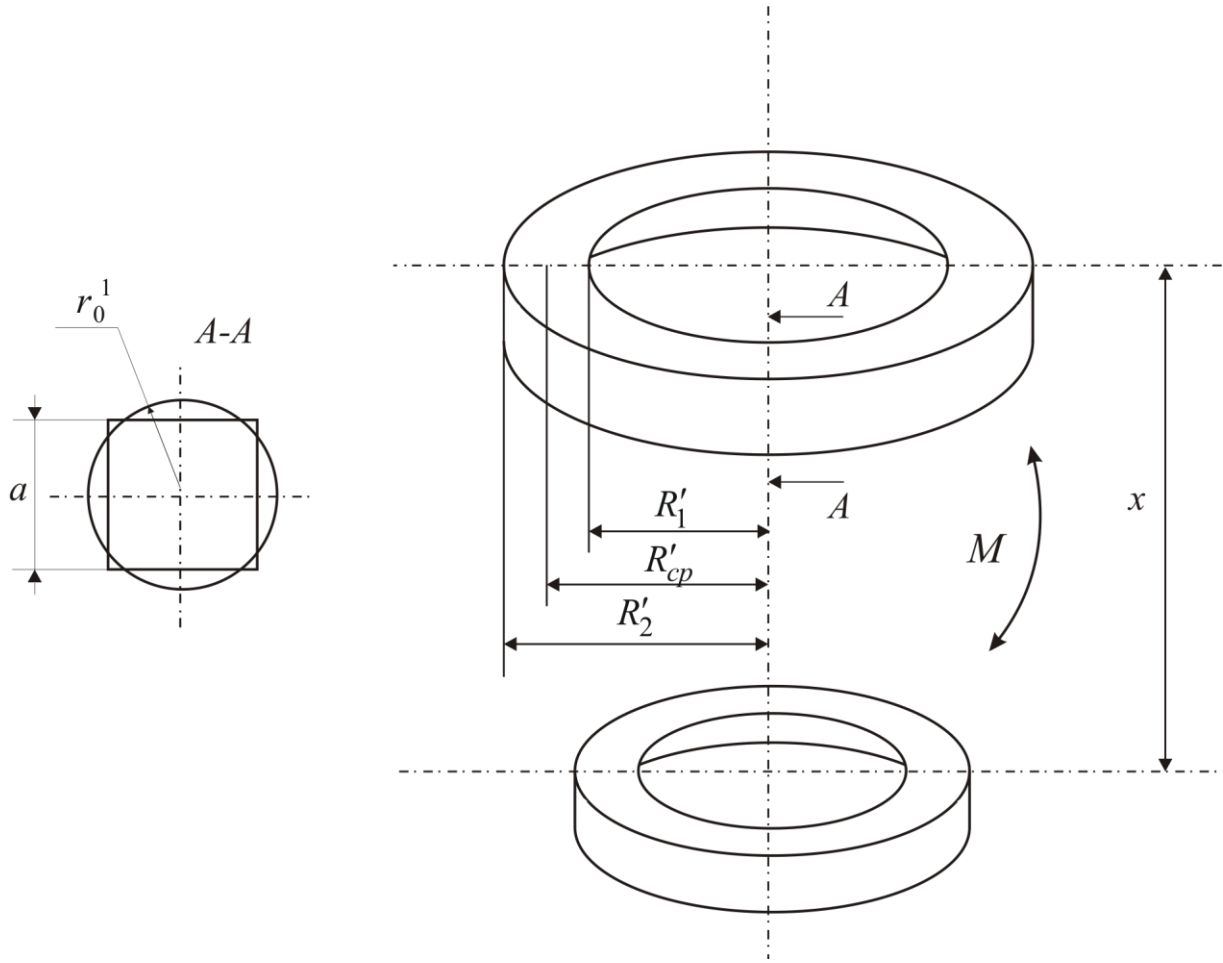


Рис. 14.1

Собственная индуктивность каждой катушки может быть определена по формуле

$$L = W^2 \cdot \mu_0 \cdot R_{cp} \cdot \left(\ln \frac{8 \cdot R_{cp}}{r_0} - 1,75 \right), \quad (14.1)$$

где $R_{cp} = \frac{R_1 + R_2}{2}$ – средний радиус катушки; $r_0 = \sqrt{\frac{(R_2 - R_1) \cdot a}{\pi}}$ – радиус сечения кольца, определяемый из равенства площадей поперечных сечений кольца $\pi \cdot r_0$ и катушки $(R_2 - R_1) \cdot a$.

Взаимная индуктивность двух катушек определяется по формуле

$$M = \mu_0 \cdot W' \cdot W'' \cdot \sqrt{R'_{cp} \cdot R''_{cp}} \cdot f(k), \quad (14.2)$$

где W' и W'' – количество витков в катушках; $f(k)$ – функция,

определяемая графиком на рис. 14.2.

Аргумент функции $f(k)$ k^2 определяется по формуле

$$k^2 = \frac{4 \cdot R'_{cp} \cdot R''_{cp}}{x^2 + (R'_{cp} + R''_{cp})^2}, \quad (14.3)$$

где x – расстояние между средними витками катушек.

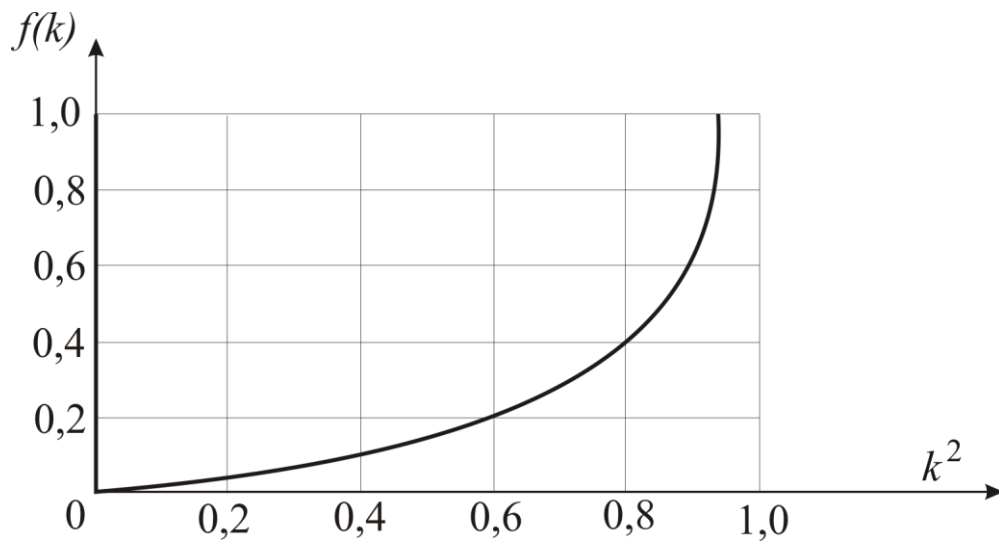


Рис. 14.2

Электромагнитные силы, возникающие в системе контуров, образованных катушками с токами, определяются с помощью формулы

$$f = \frac{\partial W_M}{\partial g}, \quad (14.4)$$

где W_M – энергия магнитного поля; g – обобщенная координата.

Для рассматриваемой системы

$$W_M = \frac{1}{2} L_{\text{э}} \cdot i^2, \quad (14.5)$$

где $L_{\text{э}}$ – эквивалентная индуктивность системы.

Тогда:

$$f = \frac{i^2}{2} \cdot \frac{\partial L_{\mathfrak{J}}}{\partial g}. \quad (14.6)$$

Так как собственные индуктивности контуров не зависят от координаты x (см. формулу (14.1)), то при последовательном соединении контуров, когда $L_{\mathfrak{J}} = L_1 + L_2 \pm 2M$,

$$f_x = \pm i^2 \cdot \frac{\partial M}{\partial x}, \quad (14.7)$$

где знак "+" относится к согласному включению катушек; знак "—" — к встречному включению.

Работа, совершаемая электромагнитными силами при изменении обобщенной координаты, всегда положительна:

$$\partial A = f \cdot \partial g > 0,$$

следовательно, величины f и ∂g одного знака.

Учитывая то, что уравнения 14.2 и 14.3 определяют обратно пропорциональный характер зависимости $M = f(x)$, т.е. производная $\frac{\partial M}{\partial x}$ отрицательна, из уравнения 14.7 следует:

$f_x < 0$ при согласном включении, $\partial x < 0$ — контуры стремятся сблизиться;

$f_x > 0$ при встречном включении, $\partial x > 0$ — контуры стремятся оттолкнуться друг от друга.

Таким образом, электромагнитные силы действуют так, чтобы эквивалентная индуктивность системы увеличивалась.

В том случае, когда один из контуров замкнут накоротко, а питание другого контура осуществляется от источника синусоидального напряжения, система может быть рассмотрена как воздушный трансформатор. При этом эквивалентное реактивное сопротивление цепи со стороны источника составит величину

$$x_{\mathfrak{J}} = x_1 - \Delta x, \quad (14.8)$$

где x_1 – индуктивное сопротивление контура, запитанного от источника; Δx – вносимое реактивное сопротивление.

$$\Delta x = \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot \omega L_2, \quad (14.9)$$

где R_2 и L_2 – параметры закороченного контура.

Эквивалентная индуктивность воздушного трансформатора

$$L_{\Sigma} = L_1 - \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot L_2. \quad (14.10)$$

Электромагнитная сила в этом случае определяется по формуле

$$f = -i^2 \cdot \frac{\omega^2 L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot M \cdot \frac{\partial M}{\partial x}. \quad (14.11)$$

Средняя за период электромагнитная сила

$$F_X = -I^2 \cdot \frac{\omega^2 L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot M \cdot \frac{\partial M}{\partial x}, \quad (14.12)$$

где I – действующее значение тока источника.

Так как по-прежнему $\partial M / \partial x < 0$, $F_X > 0$, т.е. контуры отталкиваются.

Задание для самостоятельной подготовки

1. Проанализируйте электромагнитные взаимодействия в системе трех контуров с токами при различных вариантах включения этих контуров в электрическую цепь.

2. Составьте бланк отчета.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой, показанной на рис. 14.3. Установка содержит нижний контур, прикрепленный к весам, и верхний контур, который может перемещаться по вертикали и положение которого фиксируется штифтом.

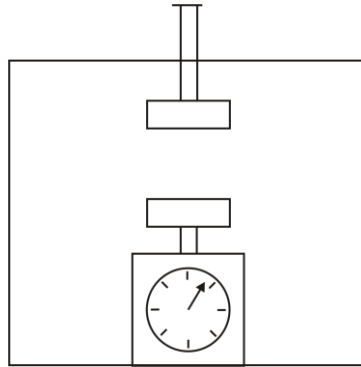


Рис. 14.3

Расстояние между контурами определяется по линейке. Контур имеет по два электрических вывода.

2. Определите по методу амперметра и вольтметра активные сопротивления и индуктивности контуров.

3. Рассчитайте собственные индуктивности контуров по формуле (14.1) и сравните эти величины с экспериментальными.

4. Определите экспериментальную зависимость $M = f(x)$, подавая синусоидальный ток в один из контуров и измеряя напряжение холостого хода на втором контуре с помощью цифрового вольтметра.

Взаимная индуктивность рассчитывается по формуле

$$M = \frac{U_{XX}}{\omega \cdot I}.$$

5. Рассчитайте зависимость $M = f(x)$ по формуле (14.2). Постройте на одной координатной плоскости теоретическую и экспериментальную зависимости $M(x)$ и объясните замеченные расхождения.

6. Для двух значений постоянного тока измерьте силу притяжения и отталкивания контуров в зависимости от расстояния между ними $F(x)$.

Измерение силы взаимодействия контуров производится с помощью весов: величина F равна разности отсчетов по шкале весов при наличии и отсутствии тока в контурах. Знак электромагнитной силы определяется видом включения контуров, согласным или встречным. Различное включение контуров обеспечивается переключением зажимов одного из контуров. Взаимное расположение контуров определяется по линейке.

7. Для выбранных значений токов рассчитайте зависимости $F(x)$. Значения $\partial M / \partial x$ можно получить путем графического дифференцирования кривой $M(x)$, полученной в п. 5.

Экспериментальные и теоретические кривые $F(x)$ постройте на одной координатной плоскости.

8. Включите контуры по схеме воздушного трансформатора, т.е. запитав лишь один контур, а второй – замкнув накоротко, при фиксированной координате x , заданной преподавателем. Определите для этого случая электромагнитную силу.

9. Рассчитайте теоретически электромагнитную силу для условий, заданных в п. 8.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники в 2 т. том 1 / Л.А. Бессонов. – М.: Юрайт, 2023. – 831 с. – URL: <https://urait.ru/book/teoreticheskie-osnovy-elektrotehniki-v-2-t-tom-1-elektricheskie-cepi-517560>

2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г.И. Атабеков [и др.]. – СПб: Лань, 2021. – 592 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/155669>

3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле / Г.И. Атабеков [и др.]. – СПб: Лань, 2020. – 432 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/134338>