

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ № 1, 2, 3, 4

Санкт-Петербург
2008

Составители: С.И. Бардинский, Т.Д. Браво, Г.Г. Рогачева, Л.Б. Свинолобова

Рецензенты: кафедра электромеханических и робототехнических систем;
канд. техн. наук, доц. В.А. Сериков

Содержатся методические указания к выполнению лабораторных работ по курсам ТОЭ и ОТЦ для студентов всех специальностей.

Подготовлены к публикации кафедрой теоретических основ электротехники по рекомендации методической комиссии факультета систем управления и электрооборудования летательных аппаратов академии.

© Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического
приборостроения, 2008

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: измерение параметров пассивных и активных элементов, экспериментальная проверка выполнения законов Кирхгофа, проверка баланса мощности.

Разделы курса, охватываемые работой:

- законы Кирхгофа, Ома, Джоуля-Ленца;
- расчет цепей по уравнениям Кирхгофа;
- расчет мощности, баланс мощности.

Литература: [1, с.141-144, с.177-184; 4, с.57-61] .

1. Методические указания.

Работа выполняется на установке, содержащей источник постоянной ЭДС, источник постоянного тока и резисторы. На первом этапе производится измерение параметров источников и резисторов. Расчетные схемы реальных источников ЭДС и тока изображены на рис.1. Параметры этих источников, т.е. ЭДС E или ток J и внутреннее сопротивление R_E и R_J могут быть определены из данных измерений в режимах холостого хода, короткого замыкания и режима нагрузки источника на произвольное сопротивление R .

В режиме холостого хода (рис.2, а - внешняя цепь разомкнута) вольтметр покажет величину ЭДС источника напряжения

$$U_{xx} = E \quad (1)$$

или напряжение, связанное с током J источника тока выражением

$$U_{xx} = R_J \cdot J. \quad (2)$$

В режиме короткого замыкания (рис.2, б - внешняя цепь замкнута накоротко через амперметр) амперметр покажет величину тока источника тока

$$I_{кз} = J \quad (3)$$

или ток, связанный с ЭДС E источника напряжения выражением

$$I_{\text{кз}} = \frac{E}{R_E}. \quad (4)$$

В режиме нагрузки на произвольное сопротивление R измеренные напряжение U и ток I (рис.2, в) связаны выражением для источника напряжения

$$U = E - R_E \cdot I, \quad (5)$$

и для источника тока

$$I = J - \frac{U}{R_J}. \quad (6)$$

Чтобы определить параметры любого источника достаточно провести любые два опыта из трех. Параметры рассчитываются по данным измерений из уравнений, соответствующих проведенным опытам. Например, найдя из опытов холостого хода и короткого замыкания $U_{\text{хх}}$ и $I_{\text{кз}}$ источника ЭДС из выражений (1) и (4), получим

$$E = U_{\text{хх}}, \quad R_E = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{кз}}}.$$

Сопротивление резисторов можно определить по данным измерений напряжения U и тока I в схеме (рис.2, в) по формуле закона Ома

$$R = \frac{U}{I}. \quad (7)$$

Так как величина R в линейных цепях от тока не зависит, то опыт можно проводить при произвольной величине напряжения.

На втором этапе производится сборка заданной разветвленной схемы и измерение токов и напряжений на элементах цепи. Полученные экспериментальные данные должны удовлетворять законам Кирхгофа, которые формулируются следующим образом:

- алгебраическая сумма токов всех ветвей, сходящихся в узле, равна нулю (ЗТК);
- алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контура равна нулю (ЗНК).

При принятых (произвольно) положительных направлениях токов знак тока в уравнении ЗТК определяется указанным направлением тока по отношению к узлу. Положительные направления напряжений элементов выбираются согласно с

током у резистивных элементов, а у источников согласуются с его полярностью (см. рис.1). Знак напряжений в уравнении ЗНК зависит от направления обхода контура. Напряжения, совпадающие с направлением обхода контура, берутся с одним знаком, а не совпадающие - с другим. Баланс мощности заключается в сопоставлении суммарной мощности источников и приемников (резисторов). Из закона сохранения энергии следует, что

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{пр}}. \quad (8)$$

Мощность источников можно рассчитать по формулам

$$P_E = E \cdot I \quad \text{и} \quad P_J = U_J \cdot J,$$

а мощность приемников по формулам

$$P_R = R \cdot I^2 \quad \text{или} \quad P_R = \frac{U^2}{R}.$$

Общий вид схемы исследуемой цепи представлен на рис.3, а варианты элементов - в табл. 1.

2. Подготовка к работе.

2.1. Изучить методические указания и литературу.

2.2. Составить для своего варианта расчетную схему испытуемой цепи, обозначить токи ветвей и их положительные направления, то же для напряжений.

2.3. Составить уравнения Кирхгофа для узлов и контуров с учетом выбранных положительных направлений.

2.4. Составить уравнение баланса мощности для рассматриваемой схемы.

3. Экспериментально-расчетная часть.

3.1. Измерение параметров источников.

Подать на вход выпрямителя источников заданное в табл.1 напряжение генератора и ПОДДЕРЖИВАТЬ ЕГО В ТЕЧЕНИЕ ВСЕХ ОПЫТОВ НЕИЗМЕН-

НЫМ!!! Контроль этого напряжения проводить с помощью постоянно подключенного вольтметра переменного тока.

Провести опыты холостого хода и короткого замыкания источников, а также опыт в режиме нагрузки на произвольное сопротивление по схемам (рис.2). Данные измерений занести в табл. 2.

3.2. Измерение сопротивлений.

Опыт провести поочередно со всеми тремя резисторами при питании от любого источника по схеме (рис.2, в). Данные измерений занести в табл.3.

3.3. Исследование сложной цепи.

Собрать заданную схему с двумя источниками и тремя резисторами. Измерить токи во всех трех ветвях, напряжения на обоих источниках и трех резисторах. Данные измерений занести в табл.4. С помощью вольтметра постоянного тока, показывающего полярность напряжения, определить полярность напряжения на резисторах и тем самым направление тока в них. Учесть эти полярности с помощью знаков (+) или (-) перед величиной напряжения или тока, сопоставив измеренное направление напряжения или тока с заданными положительными направлениями (стрелками) на расчетной схеме.

3.4. Расчет параметров элементов.

По данным опытов пп.3.1 и 3.2 рассчитать E , J , R_E , R_J источников, сопротивления резисторов. Данные занести в табл.2 и 3.

Сравнить полученные величины с номинальными данными резисторов.

3.5. Проверка законов Кирхгофа.

Подставив данные измерений по п.3.3 в уравнения Кирхгофа для всех узлов и контуров, убедиться в их справедливости.

3.6. Подсчитать мощности идеальных источников и мощности, выделяющиеся на трех внешних и двух внутренних сопротивлениях источников. Проверить баланс мощности.

4. Содержание отчета.

- 4.1. Краткое содержание работы.
- 4.2. Номер варианта и исходные данные.
- 4.3. Схемы опытов.
- 4.4. Расчетная схема исследуемой цепи.
- 4.5. Табл.2, 3, 4 с данными опыта и расчета.
- 4.6. Уравнения Кирхгофа и результаты их проверки.
- 4.7. Баланс мощности.

5. Контрольные вопросы.

- 5.1. Сформулируйте законы Кирхгофа, дайте их физическое истолкование, приведите примеры.
- 5.2. Нарисуйте схему замещения реального источника ЭДС. Как определить его параметры?
- 5.3. Нарисуйте схему замещения реального источника тока. Как определить его параметры?
- 5.4. Можно ли заменить источник тока эквивалентным источником напряжения?
- 5.5. Докажите на основании законов электрических цепей формулы (1)–(6).
- 5.6. Как рассчитать мощность источников и резисторов?
- 5.7. Как изменится ток источника тока, если сопротивление резистора в ветви с идеальным источником тока увеличить в два раза?
- 5.8. Рассчитайте напряжение между отрицательными полюсами источников.
- 5.9. При каком значении E в исследуемой цепи ток через источник ЭДС будет равен нулю?
- 5.10. Могут ли токи в двух ветвях исследуемой цепи быть равными нулю?

Варианты задания

Таблица 1

Элементы	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Источник А	E	E	-	J	J	-	E	E	J	J
Источник Б	-	J	E	-	E	J	-	J	E	-
Источник В	J	-	J	E	-	E	J	-	-	E
R_A	R_1	R_5	R_4	R_3	R_2	R_3	R_2	R_1	R_5	R_2
R_B	R_2	R_1	R_5	R_4	R_3	R_2	R_1	R_5	R_1	R_4
R_B	R_3	R_2	R_1	R_5	R_4	R_1	R_5	R_4	R_4	R_3
$U, В$	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12

Определение параметров источников

Таблица 2

Источник ЭДС						Источник тока					
Опыт				Расчет		Опыт				Расчет	
Режим х.х.	Режим к.з.	Нагрузка		$E,$ В	$R_E,$ Ом	Режим х.х.	Режим к.з.	Нагрузка		$J,$ мА	$R_J,$ Ом
$U_{xx},$ В	$I_{kз},$ мА	$U,$ В	$I,$ мА			$U_{xx},$ В	$I_{kз},$ мА	$U,$ В	$I,$ мА		

Определение сопротивлений

Таблица 3

$U_1,$ В	$I_1,$ мА	$R_1,$ Ом	$U_2,$ В	$I_2,$ мА	$R_2,$ Ом	$U_3,$ В	$I_3,$ мА	$R_3,$ Ом

Данные измерений токов и напряжений

Таблица 4

$I_1,$ мА	$I_2,$ мА	$I_3,$ мА	$U_E,$ В	$U_J,$ В	$U_{R1},$ В	$U_{R2},$ В	$U_{R3},$ В

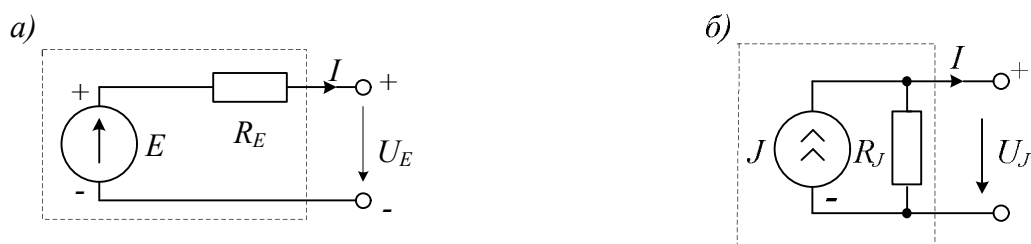


Рис.1. Источники: а – ЭДС, б – тока

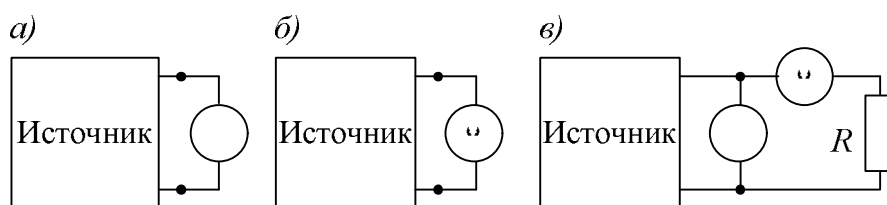


Рис.2. Схемы опытов: а – холостого хода, б – короткого замыкания, в – произвольной нагрузки источника

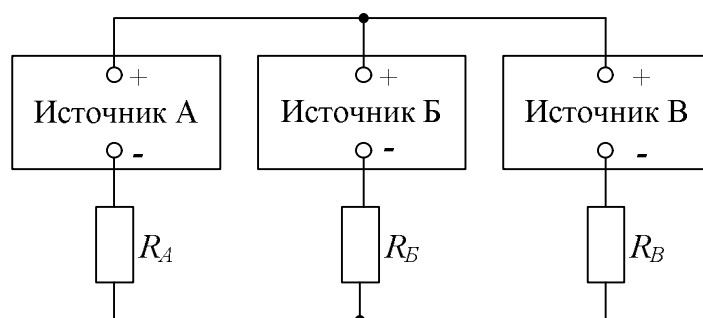


Рис.3. Общий вид исследуемой цепи

Лабораторная работа № 2

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКА К ПРИЕМНИКУ

Цель работы: исследование передачи энергии по резистивной линии в различных режимах, расчет и построение характеристик, определение оптимального режима работы.

Разделы курса, охватываемые работой:

- законы электрических цепей;
- передача активной мощности от источника энергии к приемнику;
- мощность двухполюсника.

Литература: [1, с.141-144; с.177-184; 4, с.57-61].

1. Методические указания

На передачу энергии от источника к приемнику существенно влияют сопротивления источника и линии передачи. При исследовании всей цепи можно объединить оба сопротивления, считая, что сопротивление линии включает в себя сопротивление источника, как это сделано в лабораторной работе. Эквивалентная схема такой цепи изображена на рис.1, где $R_{\text{л}}$ - сопротивление линии, а $R_{\text{пр}}$ сопротивление приемника. Напряжение источника обозначено U_1 напряжение приемника – U_2 , линии – $U_{\text{л}}$.

В реальных устройствах передача энергии производится, как правило, при условии, что напряжение источника стабилизировано ($U_1 = \text{const}$) и сопротивление линии неизменно ($R_{\text{л}} = \text{const}$). Величиной, которая изменяется непредсказуемо в зависимости от произвольного изменения сопротивления приемника, является ток нагрузки

$$I = \frac{U_1}{R_{\text{л}} + R_{\text{пр}}}. \quad (1)$$

Поэтому при исследовании свойств системы передачи энергии от источника к приемнику в первую очередь интересуются зависимостью ряда величин от тока нагрузки I .

Зависимость напряжения приемника U_2 от тока I может быть получена в соответствии с законом напряжений Кирхгофа и законом Ома следующим образом:

$$U_2 = U_1 - U_{\text{л}} = U_1 - R_{\text{л}} \cdot I. \quad (2)$$

Из (2) следует, что напряжение приемника U_2 ростом тока I убывает от величины $U_2 = U_1$ при $I = 0$ до $U_2 = 0$ при максимальном токе $I = I_{\text{кз}}$. Режим при $I = 0$ называется **холостым ходом**, а режим максимального тока при $U_2 = 0$ называется **коротким замыканием**, так как этот режим получается при $R_{\text{пр}} = 0$.

Если напряжение источника стабилизировано ($U_1 = \text{const}$), то мощность P_I , поступающая от источника, линейно увеличивается с ростом тока, так как на основании закона Джоуля-Ленца имеем

$$P_I = U_1 \cdot I. \quad (3)$$

При передаче энергии по линии в ней имеют место потери энергии, которые характеризуются мощностью потерь в линии

$$P_{\text{л}} = U_{\text{л}} \cdot I = R_{\text{л}} \cdot I^2. \quad (4)$$

Из (4) видно, что потери растут с увеличением тока I быстрее, чем мощность источника, а так как потери приводят к снижению КПД, то их желательно уменьшать. Отсюда следует, что передавать энергию выгоднее при малых токах. При этом, естественно, надо повышать напряжение U_1 для того, чтобы передаваемая мощность P_I оставалась неизменной. Сопротивление линии $R_{\text{л}}$ также отрицательно сказывается на КПД, увеличение $R_{\text{л}}$ приводит к увеличению потерь $P_{\text{л}}$. Сопротивление линии желательно уменьшать путем применения соответствующих материалов (медь, алюминий) и увеличения поперечного сечения провода. Последнее, правда, влечет за собой удорожание линии передачи.

Сопротивление линии влияет также и на напряжение приемника. Увеличение $R_{\text{л}}$ приводит к возрастанию падения напряжения в линии $U_{\text{л}}$ и к уменьше-

нию напряжения приемника U_2 , что следует из выражения (2), Последнее также нежелательно, так как ухудшает условия работы приемника.

Мощность, потребляемая приемником

$$P_2 = U_2 \cdot I, \quad (5)$$

равна нулю при холостом ходе, когда ток I равен нулю, и при коротком замыкании, когда напряжение U_2 равно нулю. Следовательно, кривая зависимости мощности P_2 от тока имеет максимум при токе, величине которого определяется из исследования функция $P_2(I)$ на экстремум, т.е. из выражения

$$\frac{dP_2}{dI} = 0, \quad \text{где} \quad P_2 = P_1 - P_n. \quad (6)$$

Режим передачи максимальной мощности называется **согласованным режимом**, а соответствующая нагрузка - согласованной нагрузкой. Условием согласования является соотношение между сопротивлениями линии и приемника, которое можно определять из решения уравнения (6) с учетом (1).

Передача энергии характеризуется также величиной коэффициента полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I}{U_1 \cdot I} = \frac{U_1 - U_n}{U_1} = 1 - \frac{R_n \cdot I}{U_1}. \quad (7)$$

Как видно из (7), КПД с ростом тока убывает от 1 в режиме холостого хода до 0 в режиме короткого замыкания. В режиме передачи максимальной мощности КПД равен только 0.5, поэтому такой режим целесообразен, главным образом, в системах передачи информации, где для повышения помехоустойчивости важна максимальная мощность полезного сигнала, а КПД не играет большой роли из-за небольшой абсолютной мощности. Передача же больших мощностей, например, в электроэнергетике, где требуется экономичность, осуществляется, как правило, в режиме с высоким КПД.

Лабораторные исследования передачи энергии от источника к приемнику производятся в следующих режимах:

- а) $U_1 = const, R_n = const$ - изменяется ток нагрузки;
- б) $U_1 = const, I = I_n = const$ - изменяется сопротивление линии;
- в) $P_2 = const, R_n = const$ - изменяется напряжение источника.

Первые два режима входят в обязательную программу исследования.

Работу линии при $U_1 = const, R_{\text{л}} = const$ (режим "а") характеризуют зависимости $U_{\text{л}}, U_2, P_1, P_{\text{л}}, P_2, \eta$ от тока I , построенные по приведенным выше выражениям. Следует обратить внимание, что одна и та же мощность P_2 может передаваться приемнику при двух значениях тока в силу того, что функция $P_2(I)$ имеет максимум. Первый режим имеет место при токе от 0 до $0,5 \cdot I_{\text{кз}}$, второй - при токе от $0,5 \cdot I_{\text{кз}}$ до $I_{\text{кз}}$; в первом случае КПД выше и этот режим энергетически выгоднее.

Передачу энергии по линии в режиме "б" при $U_1 = const, I = const$ характеризуют зависимости $U_{\text{л}}, U_2, P_1, P_{\text{л}}, P_2, \eta$ от сопротивления линии $R_{\text{л}}$. В этом режиме $U_{\text{л}}, P_{\text{л}}$ будут линейно возрастать с увеличением $R_{\text{л}}$, мощность P_1 оставаться неизменной в силу выражения (3), а U_2, P_2 - линейно убывать с увеличением $R_{\text{л}}$ в соответствии с (2), (5).

В режиме передачи энергии при $P_2 = const, R_{\text{л}} = const$ (режим "в") увеличение напряжения вызывает уменьшение тока и уменьшение потерь в линии. Однако увеличение η с ростом U_2 происходит только в определенном диапазоне токов.

Для обоснования этого положения выразим КПД через $P_2, R_{\text{л}}, U_1$, решив систему уравнений рассматриваемой цепи и записав решение относительно КПД

$$\eta = 0,5 \pm \sqrt{0,25 - \frac{P_2 \cdot R_{\text{л}}}{U_1^2}}. \quad (8)$$

Положительный знак перед корнем берется для режима, когда $0 \leq I \leq 0,5 \cdot I_{\text{кз}}$. В этом диапазоне токов увеличение входного напряжения (при $P_2 = const, R_{\text{л}} = const$) приводит к увеличению КПД.

Знак "-" соответствует режиму, когда ток изменяется в диапазоне от $0,5 \cdot I_{\text{кз}}$ до $I_{\text{кз}}$. Здесь увеличение входного напряжения приводит к ухудшению экономических показателей, КПД уменьшается с ростом U_1 .

2. Подготовка к работе

2.1. Изучить методические указания к работе и литературу. Повторить законы электрических цепей.

2.2. Из табл.1 для своего варианта выбрать величины $R_{\text{л}}$, $U_{\text{л}}$, $I_{\text{н}}$.

2.3. Вывести выражения для определения I , $U_{\text{л}}$, U_2 , $P_{\text{л}}$, P_2 , η в режимах холостого хода и короткого замыкания, считая заданными напряжение $U_{\text{л}}$, сопротивление $R_{\text{л}}$ и используя законы Кирхгофа и Ома для схемы (рис.1). Формулы записать в табл. 2.

2.4. Вывести выражения для тока в согласованном режиме, исследовав функцию $P_2(I)$ на экстремум решением уравнения (6). Найти соотношение между $R_{\text{л}}$ и $R_{\text{пр}}$, при которых получается максимум $P_{2\text{ max}}$. Записать формулы для расчета всех величин согласованного режима в табл.2.

2.5. Используя формулы пп. 2.3, 2.4, рассчитать для своего варианта численные значения всех величин в перечисленных выше режимах и занести в табл.2.

2.6. Подготовить черновики, содержащие схему испытаний, заданные параметры, таблицы для записи опытных данных и расчетов и все предварительные расчеты по пп. 2.2-2.5.

3. Экспериментально-расчетная часть

3.1. Снятие характеристик линии передачи при изменении тока.

Для исследования линии передачи собрать схему, изображенную на рис.2. Сопротивление линии передачи $R_{\text{л}}$ имитируется регулируемым резистором $R_{\text{л}}$. Величину сопротивления, включенного в линию, и величину входного напряжения $U_{\text{л}}$ установить в соответствии с заданным вариантом. Поддерживая заданную величину $U_{\text{л}}$ постоянной, изменять величину сопротивления приемника $R_{\text{пр}}$ от 0 до ∞ (6-8 точек), устанавливая тем самым величину тока от $I = I_{\text{кз}}$ до 0, желательно равномерно. Измеренные вольтметром напряжения на входе $U_{\text{л}}$, на

приемнике U_2 , падение напряжения в линии $U_{\text{л}}$ занести в соответствующие графы заготовленной табл.3. По этим значениям рассчитать P_1 , $P_{\text{л}}$, P_2 , η и записать в ту же таблицу. Построить на одном графике кривые зависимости $U_{\text{л}}$, U_2 , P_1 , $P_{\text{л}}$, P_2 , η от тока I , сравнить с данными расчета в табл.2 режима холостого хода, короткого замыкания и передачи максимальной мощности.

3.2. Снятие характеристик линии передачи при изменении сопротивления линии.

Установить на входе заданное напряжение U_1 , и поддерживать его постоянным. Изменять сопротивление линии передачи $R_{\text{л}}$ в заданных преподавателем пределах и, так как ток I при этом будет меняться, то изменением сопротивления приемника $R_{\text{пр}}$ устанавливать по амперметру неизменным, заданное в табл.1, значение тока I_n . Измерять напряжения $U_{\text{л}}$, U_2 . Опытные данные записать в заготовленную табл.4. По этим данным рассчитать P_1 , $P_{\text{л}}$, P_2 , η и занести в соответствующие графы табл.4. Построить кривые $U_{\text{л}}$, U_2 , $P_{\text{л}}$, η как функции $R_{\text{л}}$.

4. Содержание отчета

- 4.1. Краткое содержание работы.
- 4.2. Номер варианта и исходные данные для предварительных расчетов.
- 4.3. Данные предварительного расчета по п. 2.5, сведенные в табл. 2.
- 4.4. Схема опыта с характеристикой приборов и оборудования.
- 4.5. Таблица с опытными и расчетными данными характеристик линии при изменении тока приемника по п. 3.1.
- 4.6. Таблица с опытными и расчетными данными характеристик линии при изменении сопротивления линии по п. 3.2.
- 4.7. Графики с характеристиками по пп. 3.1 и 3.2.

5. Контрольные вопросы

5.1. Как осуществить режимы холостого хода и короткого замыкания? Чему равны в этих режимах $R_{пр}$, I , U_2 , $U_{л}$, P_1 , $P_{л}$, P_2 , если U_1 и $R_{л}$ остаются неизменными?

5.2. Как и почему изменяется ток, напряжение и мощность приемника при изменении его сопротивления?

5.3. Какой режим называется согласованным? В чем заключается условие согласования? Вывести его. Чему равны мощность P_2 , ток I , КПД η в этом режиме?

5.4. Как изменяется КПД и потери в линии при изменении сопротивления линии? Какие существуют пути уменьшения сопротивления линии передачи?

5.5. Как графически определить два значения КПД, соответствующие заданному значению мощности P_2 ?

Варианты задания

Таблица 1

Элементы	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{л}$, Ом	180	180	270	360	270	180	180	270	360	270
U_1 , В	15	20	18	20	20	24	18	22	24	24
I_n , мА	30	20	30	25	30	25	34	34	30	34

Расчет заданных режимов

Таблица 2

Вариант №..., $U_1 = \dots$ В, $R_{\text{л}} = \dots$ Ом								
Режимы	Параметры							
	$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$	$I, \text{мА}$	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_{\text{л}}, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	η
Холостой ход		Формулы						
		Расчетные значения						
Согласо- ванный		Формулы						
		Расчетные значения						
Короткое замыкание		Формулы						
		Расчетные значения						

Данные опыта и расчетов при изменении нагрузки

Таблица 3

Опыт при $U_1 = \dots$ В, $R_{\text{л}} = \dots$ Ом			Расчет			
$I, \text{мА}$	$U_{\text{л}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_{\text{л}}, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	η

Таблица 4

Опыт при $U_1 = \dots \text{ В}, \quad I_H = \dots \text{ мА}$			Расчет			
$R_L, \text{ Ом}$	$U_L, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$P_1, \text{ Вт}$	$P_L, \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$	η

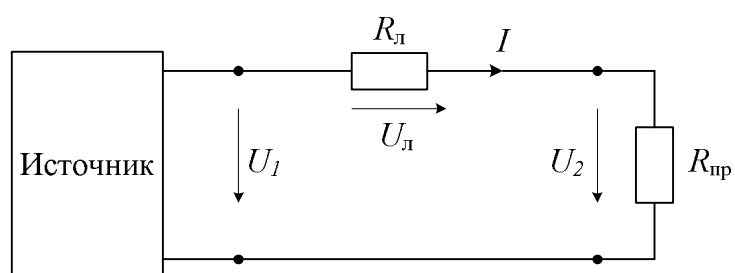


Рис.1. Расчетная схема линии передачи

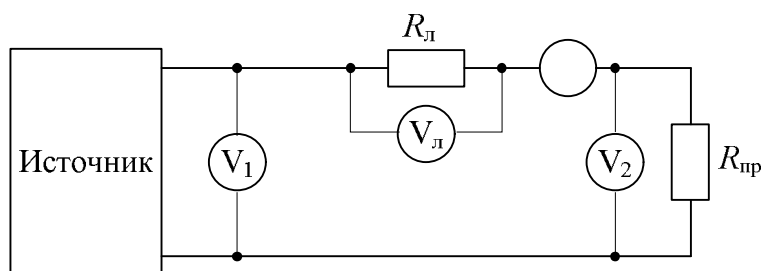


Рис.2. Схема для исследования линии передачи

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЦЕПЕЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное исследование простейших цепей гармонического тока, состоящих из линейных резисторов, индуктивных катушек и конденсаторов, закрепление знаний об основных соотношениях в цепях переменного тока.

Разделы курса, охватываемые работой:

- цепи гармонического тока и их свойства;
- комплексная форма представления гармонических величин.

Литература: [1, с.163-175; 2, с.58-78; 3, с.52-73; 4, с.43-48].

1. Методические указания.

Лабораторная установка содержит четыре элемента, из которых три (два резистора и конденсатор) можно считать линейными и близкими к идеальным резистивным и емкостному соответственно. Поэтому их параметры могут быть определены экспериментально путем поочередного подключения к источнику гармонического напряжения известной частоты ω , измерения тока I и напряжения U элемента и расчета по формулам

$$R = \frac{U_R}{I}, \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}, \text{ Ом}; \quad G = \frac{I}{U_R}, \text{ См}; \quad B_C = \frac{I}{U_C}, \text{ См}. \quad (1)$$

Угол сдвига φ между током и напряжением для резистора равен нулю, а для конденсатора равен $-\pi/2$. Это значит, что в резисторе ток совпадает по фазе с напряжением, а в конденсаторе опережает на $\pi/2$.

Что же касается индуктивной катушки, да еще с ферромагнитным сердечником, то ее можно приблизительно считать линейным элементом лишь в ограниченном диапазоне изменения тока. Кроме того, на свойства катушки значительное влияние оказывает сопротивление ее провода. Поэтому расчетная

модель реальной катушки представляет собой схему из последовательно (или параллельно) соединенных идеальных резистивного и индуктивного элементов. Для определения из параметров при заданной частоте ω необходимо изменить не только напряжение U и ток I , но и угол сдвига φ между ними. Тогда параметры идеальных элементов в расчетной схеме реальной катушки определяются по формулам

$$R_k = \frac{U}{I} \cos \varphi, \text{ Ом}; \quad X_k = \frac{U}{I} \sin \varphi, \text{ Ом}; \quad G_k = \frac{I}{U} \cos \varphi, \text{ См}; \quad B_k = \frac{I}{U} \sin \varphi, \text{ См}. \quad (2)$$

Следует заметить, что в индуктивной катушке ток отстает от напряжения, а величина угла лежит в пределах $0 < \varphi < \pi/2$.

Измерение угла сдвига φ производится фазометром. Последний устроен так, что показывает угол сдвига между двумя напряжениями, которые следует подавать на два входа ("опорный" и "сигнальный"), имеющих общий зажим ("ноль" или "земля"). Поэтому ток надо предварительно преобразовать в пропорциональное напряжение, которое затем подается на "сигнальный" вход. Для такого преобразования служит специальный резистор (шунт), который включается в цепь так, чтобы по нему проходил измеряемый ток (рис.1).

Для наблюдения на экране осциллографа кривых тока и напряжения следует напряжения, подаваемые на фазометр, подать также на оба входа осциллографа между зажимом "земля" и потенциальными входами Y_1 и Y_2 (рис.1).

Если цепь составлена из последовательно соединенных резистивных и реактивных элементов, то результирующее активное сопротивление определяется арифметической суммой активных сопротивлений резистивных элементов

$$R = \sum^n R_k, \quad (3)$$

результирующее реактивное сопротивление определяется алгебраической суммой сопротивлений реактивных элементов

$$X = \sum^n X_{Lk} - \sum^m X_{Ck}, \quad (4)$$

а модуль полного сопротивления по формуле

$$Z = \sqrt{\left(\sum_k^n R_k\right)^2 + \left(\sum X_{Lk} - \sum X_{Ck}\right)^2}. \quad (5)$$

В комплексной форме полное сопротивление

$$\underline{Z} = \sum_k^n R_k + j \left(\sum X_{Lk} - \sum X_{Ck} \right) = Z \cdot e^{j\varphi}, \quad (6)$$

где аргумент полного сопротивления φ при последовательном соединении элементов определяется выражением

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_k^n X_{Lk} - \sum_k^m X_{Ck}}{\sum_k^n R_k} \quad (7)$$

и имеет знак реактивного сопротивления.

Так как в комплексной форме ток определяется из выражения

$$\underline{i} = \frac{\underline{\dot{U}}}{\underline{Z}} = \frac{U \cdot e^{j\psi_U}}{Z \cdot e^{j\varphi}} = \frac{U}{Z} e^{-j\varphi} = I \cdot e^{j\psi_i}, \text{ (считаем } \varphi_u = 0), \quad (8)$$

то модуль тока $I = \frac{U}{Z}$, а аргумент $\psi_i = -\varphi$. Последнее равенство означает, что ток сдвинут по фазе относительно напряжения на угол $-\varphi$, т.е. отстает от напряжения на угол φ .

Векторная диаграмма напряжений последовательной цепи строится на основании закона напряжений Кирхгофа. Вектор полного напряжения цепи находится как сумма векторов напряжений элементов, которые ориентируются относительно вектора общего тока с учетом величины и знака угла φ .

Если цепь составлена из параллельно соединенных резистивных и реактивных элементов, то результирующая активная проводимость определяется арифметической суммой активных проводимостей элементов

$$G = \sum_k^n G_k, \quad (9)$$

результирующая реактивная проводимость - алгебраической суммой реактивных проводимостей

$$B = \sum_k^n B_{Lk} - \sum_k^m B_{Ck}, \quad (10)$$

а модуль полной проводимости - по формуле

$$Y = \sqrt{\left(\sum_k^n G_k\right)^2 + \left(\sum_{Lk}^n B_{Lk} - \sum_{Ck}^m B_{Ck}\right)^2}. \quad (11)$$

В комплексной форме полная проводимость

$$\underline{Y} = \sum_k^n G_k + j \left(\sum_{Lk}^n B_{Lk} - \sum_{Ck}^m B_{Ck} \right) = Y \cdot e^{-j\varphi}. \quad (12)$$

Аргумент полной проводимости φ определяется выражением

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{B}{G} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{Lk}^n B_{Lk} - \sum_{Ck}^m B_{Ck}}{\sum_k^n G_k} \quad (13)$$

и имеет знак реактивной проводимости.

Векторная диаграмма токов параллельной цепи строится на основании закона токов Кирхгофа. Вектор тока неразветвленной части цепи находится как сумма векторов токов параллельных ветвей, которые нужно ориентировать относительно вектора общего приложенного напряжения с учетом величины и знака угла φ .

Ток в параллельной цепи определяется из выражения

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \dot{U} = Y \cdot U \cdot e^{-j\varphi} = I \cdot e^{j\psi_i}, \quad (14)$$

откуда модуль $I = Y \cdot U$, а аргумент $\psi_i = -\varphi$, ($\psi_u = 0$).

2. Подготовка к работе.

2.1. Изучить методические указания и литературу.

2.2. Из таблицы 1 для своего варианта выбрать величины R_1, R_2, C, L, U, f .

2.3. Рассчитать по формулам (3)-(8) ток (модуль и аргумент, полагая $\psi_u = 0$) при последовательном соединении элементов с параметрами из п.2.2. Построить на векторную диаграмму тока и напряжений.

2.4. Рассчитать по формулам (9)-(14) ток в цепи при параллельном соединении элементов из п.2.2. Построить векторную диаграмму напряжения и токов.

2.5. Подготовить черновики, содержащие схемы измерений, заданные параметры, таблицы для записи экспериментальных данных, результаты предварительных расчетов и построенные векторные диаграммы.

3. Экспериментально-расчетная часть.

3.1. Измерение параметров элементов.

Собрать схему, изображенную на рис.1, и при заданных напряжении U и частоте f произвести измерения угла φ и токов для всех четырех элементов. Результаты измерений занести в табл.2. Зарисовать осциллограммы тока и напряжения каждого элемента.

Повторить указанные выше измерения токов при изменении частоты от 0,5 до 2,0 заданной в п.2.2 (только для реактивных элементов). Результаты измерений занести в табл.3. Убедиться, что для резистивных элементов результаты измерений тока не зависят от частоты (при $U = const$).

3.2. Исследование цепи с последовательным соединением элементов.

Собрать схему, изображенную на рис.2. При заданных напряжении U и частоте f измерить ток, напряжения на всех элементах, угол φ между входным током и напряжением. Данные измерений записать в табл.4.

3.3. Исследование цепи с параллельным соединением элементов.

Собрать схему, изображенную на рис.3. При заданных напряжении U и частоте f измерить входной ток и токи в элементах, угол φ между входным током и напряжением. Данные измерений занести в табл.5.

3.4. Расчеты и построения

По данным табл.2 построить векторные диаграммы тока и напряжения для каждого элемента, рассчитать параметры элементов по формулам (1), (2), записать мгновенные значения токов и напряжений ($\psi_u = 0$).

По данным табл.3 рассчитать Z_L и X_C при разных частотах и построить зависимость Z_L и X_C от f .

По опытным данным табл.4 построить векторную диаграмму напряжений элементов последовательной цепи. Сравнить величину полученного из этой диаграммы суммарного приложенного напряжения и значения угла φ с опытными данными из табл.4.

По данным табл.5 построить векторную диаграмму токов элементов параллельной цепи. Сравнить величину полученного из этой диаграммы суммарного входного тока и значение угла φ с опытными данными из табл.5.

4. Содержание отчета.

4.1. Номер варианта и исходные данные из п. 2.2.

4.2. Данные расчета и векторные диаграммы из п. 2.3, 2.4 с пояснениями.

4.3. Схемы опытов с характеристикой приборов и оборудования.

4.4. Таблицы с опытными и расчетными данными.

4.5. Результаты расчетов и построений по п. 3.4:

- векторные диаграммы и осциллограммы напряжения и тока трех элементов из п. 3.1;

- график зависимости модулей сопротивлений катушки и конденсатора от частоты;

- векторные диаграммы при последовательном и параллельном соединении элементов.

5. Контрольные вопросы

5.1. Как вычисляется комплексное сопротивление цепи при последовательном соединении элементов?

5.2. Как вычисляется комплексная проводимость цепи с параллельным соединением элементов?

5.3. Каков сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с резистивным элементом, индуктивным элементом, емкостным элементом?

5.4. Как найти полное напряжение последовательной цепи, если известны величины напряжений на всех резистивных, индуктивных и емкостных элементах?

5.5. Как найти входной ток цепи с параллельным соединением резистивного, индуктивного и емкостного элементов, если известны величины токов через каждый элемент в отдельности?

5.6. Можно ли при измерении фазометром использовать в качестве шунта реактивное сопротивление?

5.7. Поясните соответствие векторной и временной диаграммы различных видов элементов.

Варианты задания

Таблица 1

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1 , Ом	680	700	680	700	500	500	700	680	690	700
R_2 , Ом	340	340	340	340	270	230	340	340	340	260
L , Гн	0,724	0,707	0,92	1,05	0,96	0,96	0,818	1,4	1,27	0,45
C , мкФ	5,25	5,1	4,85	5	5,18	5,3	4,86	4,8	4,74	5,1
U , В	30	25	20	30	25	20	30	25	20	25
f , Гц	60	150	100	50	100	50	120	40	90	80

Определение параметров элементов

при $f = \dots$ Гц

Таблица 2

Элемент	Опыт			Расчет			
	U , В	I , мА	φ , град	R , Ом	X , Ом	G , См	B , См
R_1							
R_2							
L							
C							

Зависимость параметров от частоты

Таблица 3

Катушка								Конденсатор							
f , Гц								f , Гц							
U , В								U , В							
I , мА								I , мА							
Z_L , Ом								X_C , Ом							

Исследование последовательной цепи

Таблица 4

Опыт при $f = \dots$ Гц							Из векторной диаграммы	
U , В	I , мА	U_L , В	U_{R1} , В	U_C , В	U_{R2} , В	φ , град	U , В	φ , град

Исследование параллельной цепи

Таблица 5

Опыт при $f = \dots$ Гц							Из векторной диаграммы	
U , В	I , мА	I_L , мА	I_{R1} , мА	I_C , мА	I_{R2} , мА	φ , град	I , мА	φ , град

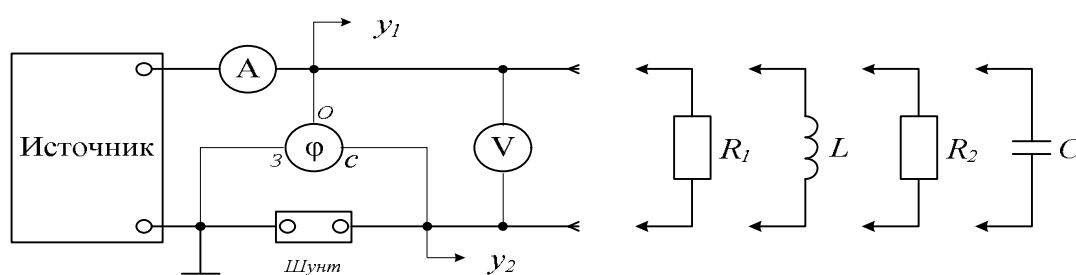


Рис. 1. Схема измерений параметров элементов

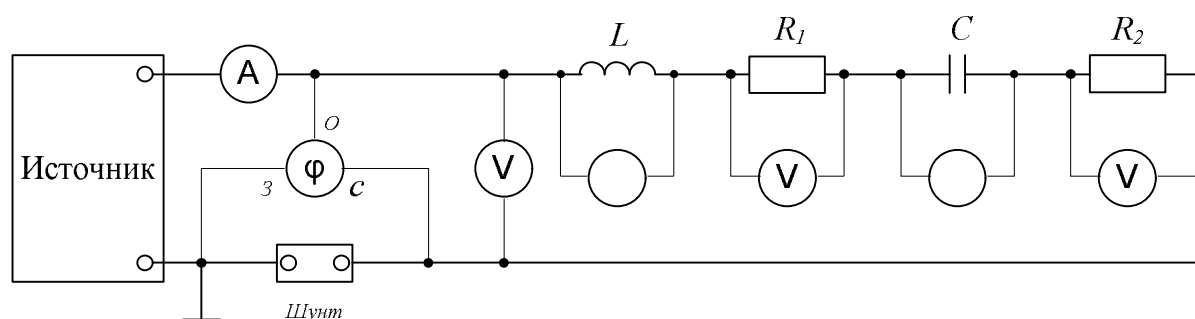


Рис. 2. Схема опытного исследования последовательной цепи

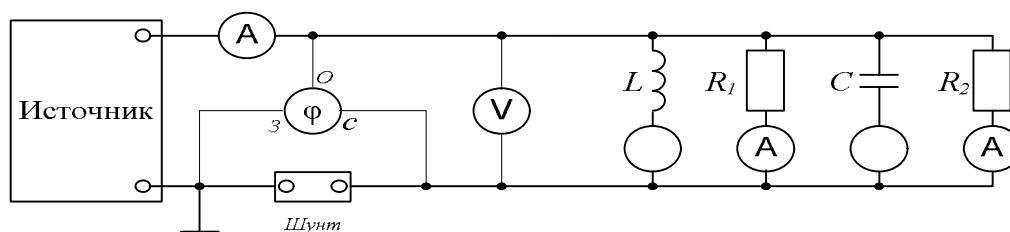


Рис. 3. Схема опытного исследования параллельной цепи

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА

Цель работы: ознакомление с наиболее распространенными методами экспериментального определения эквивалентных параметров линейных пассивных двухполюсников переменного тока при постоянной частоте приложенного напряжения.

Разделы курса, охватываемые работой:

- анализ цепей гармонического тока в установившемся режиме;
- эквивалентные параметры пассивного двухполюсника и методы их экспериментального определения.

Литература: [1, с.184-189; 2, с.84-85; 3, с.110-112; 4, с.51-52].

1. Методические указания

Объектом исследования является сложная цепь, заданная в виде пассивного двухполюсника и питаемая от источника гармонического напряжения.

Любой пассивный двухполюсник можно заменить двухэлементной эквивалентной схемой так, что при одинаковом напряжении на входе ток и потребляемая от источника мощность не изменяются. Принципиально, независимо от структуры пассивного двухполюсника, эквивалентная схема двухполюсника может быть представлена в виде двух последовательно соединенных активного R_3 и реактивного X_3 элементов или двух параллельно соединенных аналогичных элементов G_3 и B_3 . Величины R_3 , X_3 , G_3 , B_3 , а также полные сопротивления $\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3$ и проводимость $\underline{Y} = G_3 - jB_3$ называются эквивалентными параметрами. Обе эквивалентные схемы характеризуют один и тот же двухполюсник и поэтому между параметрами последовательной и параллельной схем существуют зависимости, называемые формулами перехода:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_3 &= \frac{1}{\underline{Y}_3}, & R_3 &= \frac{G_3}{G_3^2 + B_3^2}, & X_3 &= \frac{B_3}{G_3^2 + B_3^2}, \\ \underline{Y}_3 &= \frac{1}{\underline{Z}_3}, & G_3 &= \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2}, & B_3 &= \frac{X_3}{R_3^2 + X_3^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Знак реактивного сопротивления X_3 и реактивной проводимости B_3 зависят от характера двухполюсника. Если исследуемый двухполюсник носит индуктивный характер, угол сдвига φ между током I и напряжением U , реактивное сопротивление X_3 и проводимость B_3 принимаются положительными, а при емкостном характере – отрицательными.

Задача экспериментального определения параметров эквивалентной схемы двухполюсника переменного тока может быть решена различными методами, основные из которых описываются ниже.

1.1. С помощью вольтметра, амперметра и фазометра по схеме (рис.1.) измеряют входное напряжение U ток I и угол сдвига по фазе между ними φ . По измеренным величинам строят векторную диаграмму и, разложив вектор U на активную U_a и реактивную U_p составляющие, вычисляют параметры последовательной эквивалентной схемы замещения по формулам

$$Z_3 = \frac{U}{I}, \quad R_3 = \frac{U_a}{I} = \frac{U \cos \varphi}{I} = Z_3 \cos \varphi, \quad X_3 = \frac{U_p}{I} = \frac{U \sin \varphi}{I} = Z_3 \sin \varphi. \quad (2)$$

Построив снова по тем же данным векторную диаграмму и разложив вектор тока I на активную I_a и реактивную I_p составляющие, вычисляют параметры параллельной эквивалентной схемы замещения по формулам

$$Y_3 = \frac{I}{U}, \quad G_3 = \frac{I_a}{U} = \frac{I \cos \varphi}{U} = Y_3 \cos \varphi, \quad B_3 = \frac{I_p}{U} = \frac{I \sin \varphi}{U} = Y_3 \sin \varphi. \quad (3)$$

1.2. С помощью вольтметра, амперметра и ваттметра по схеме (рис.2) измеряют входное напряжение U , ток I и активную мощность P . По данным измерений вычисляют параметры эквивалентных схем по формулам

$$Z_3 = \frac{U}{I}, \quad R_3 = \frac{P}{I^2}, \quad |X_3| = \sqrt{Z_3^2 - R_3^2}, \quad |\varphi| = \arctg \frac{|X_3|}{R_3},$$

(4)

$$Y_3 = \frac{I}{U} \quad G_3 = \frac{P}{U^2}, \quad |B_3| = \sqrt{Y_3^2 - G_3^2}, \quad |\varphi| = \arctg \frac{|B_3|}{G_3}.$$

Приведенные формулы позволяют определить знак угла φ , знак реактивного сопротивления X_3 и реактивной проводимости B_3 .

Для экспериментального определения характера исследуемого двухполюсника последовательно с ним включают добавочное реактивное сопротивление X_d , знак которого известен заранее, измерения повторяются при неизменной величине приложенного напряжения. Если при этом ток и мощность, потребляемые цепью, уменьшаются, следовательно, результирующее реактивное сопротивление цепи возрастает, а это значит, что знаки X_d и X_3 одинаковы. В случае увеличения тока и мощности X_d и X_3 имеют разные знаки, так как результирующее реактивное сопротивление снижается. Все это справедливо, если X_d подобрано так, что выполняется условие

$$|X_d| < 2|X_3|.$$

Задачу по определению характера цепи можно также решить включением параллельно двухполюснику добавочной реактивной проводимости известного знака. В этом случае увеличение тока и мощности указывает на совпадение характера добавочной проводимости и двухполюсника.

1.3 Определение параметров эквивалентных схем методом «трех вольтметров».

В этом случае собирается схема (рис.3,а), где R_d – добавочный резистор, величина активного сопротивления которого заранее известна.

С помощью вольтметра измеряются напряжения U_l , U_d и U . По известным величинам напряжений, как по трем сторонам треугольника, строится векторная диаграмма (рис.3,б). После этого вектор напряжения U раскладывается на активную U_a и реактивную U_p составляющие, как это показано на рис.3,б (векторная диаграмма построена для случая $\varphi < 0$).

Зная величину R_d , можно найти ток по формуле закона Ома

$$I = \frac{U_d}{R_d}, \quad (5)$$

а затем по формулам (2) вычислить эквивалентные параметры последовательной схемы. Параметры параллельной схемы можно вычислить по формулам перехода (1).

1.4. Определение параметров эквивалентных схем методом «трех амперметров».

В этом случае собирается схема (рис.4,а), где добавочный резистор R_d включен параллельно двухполюснику и его сопротивление известно заранее. С помощью амперметра измеряются величины токов I_l , I_d и I . По этим данным строится векторная диаграмма токов и ток I раскладывается на активную I_a и реактивную I_p составляющие. Пример такой диаграммы для случая $\varphi > 0$ приведен на рис.4,б. Зная величину R_d , можно определить величину приложенного напряжения

$$U = I_d \cdot R_d.$$

По формулам (3) вычисляются параметры эквивалентной параллельной схемы, а по формулам перехода (1) - параметры последовательной схемы.

Следует отметить, что в опытах 1.3 и 1.4 знак угла φ и реактивного сопротивления X , остается неопределенным. Для определения этого знака нужно провести дополнительный опыт, как в п.1.2.

2. Подготовка к работе

2.1. Изучить методические указания к работе и литературу.

2.2. Из таблицы вариантов для своего номера выбрать величины U , I , P , характер двухполюсника.

2.3. Рассчитать параметры эквивалентных схем двухполюсника: Z_3 , R_3 , $|X_3|$, $|\varphi|$, Y_3 , G_3 , $|B_3|$, $|\varphi|$ по (4). Занести в табл.2.

2.4. Составить последовательную и параллельную эквивалентные схемы замещения, учитывая характер двухполюсника, заданный в таблице вариантов. Указать на схеме величины соответствующих параметров.

3. Экспериментально-расчетная часть

3.1. Определение параметров эквивалентных схем двухполюсника с помощью вольтметра, амперметра и ваттметра.

Собрать схему по рис.2 без конденсатора. Данные измерений U , I , P занести в табл.2. Включить последовательно с двухполюсником конденсатор, измерить U , I , P и занести данные в табл.2. Определить характер двухполюсника. Рассчитать по формулам (4) параметры, занести в табл.2, сравнить с данными предварительного расчета.

3.2. Определение параметров эквивалентных схем двухполюсника с помощью вольтметра, амперметра и фазометра.

Собрать схему по рис.1, измерить U , I , φ . Занести в табл.3. Построить векторные диаграммы тока и напряжения. Рассчитать параметры эквивалентного двухполюсника по формулам (2) и (3) и занести в табл.3.

Сопоставить эквивалентные параметры с параметрами, полученными из предварительного расчета.

3.3. Определение параметров эквивалентных схем двухполюсника методом «трех вольтметров».

Собрать схему по рис.3, а с добавочным резистором R_d и измерить вольтметром напряжения U_l , U_d , U . Результаты измерений занести в табл.4.

С учетом выбранного масштаба напряжений (В/мм) построить векторную диаграмму напряжений, приняв за опорный вектор тока. Разложить напряжение

U на активную U_a и реактивную U_p составляющие, занести их величины в табл.4. Знак угла φ считать известным из предыдущих опытов. Рассчитать эквивалентные параметры по формулам (2) и (1). Занести в табл.4. Сопоставить с предварительными расчетами.

3.4. Определение параметров эквивалентных схем двухполюсника методом «трех амперметров».

Собрать схему по рис.4, а с добавочным резистором U_d и измерить амперметром токи I_l , I_d , I . Результаты измерений занести в табл.5.

С учетом выбранного масштаба тока (А/мм) построить векторную диаграмму токов, приняв за опорный вектор напряжения. Разложить ток I на активную I_a и реактивную I_p составляющие, занести их величины в табл.5. Знак угла φ считать известным из предыдущих опытов. Рассчитать эквивалентные параметры по формулам (3) и (1). Занести в табл.5. Сопоставить с предварительными расчетами.

4. Содержание отчета

4.1. Кратное содержание работы.

4.2. Номер варианта и исходные данные для предварительных расчетов.

4.3. Данные расчета по п. 2.3. и данные опыта и расчета по п. 3.1, сведенные в табл.2. Эквивалентные схемы двухполюсника по п. 2.4.

4.4. Векторные диаграммы тока и напряжения и табл.3 с расчетными параметрами эквивалентных схем по п. 3.2.

4.5. Векторная диаграмма напряжений, построенная по методу «трех вольтметров» и табл.4 с рассчитанными параметрами эквивалентных схем по п. 3.3.

4.6. Векторная диаграмма токов, построенная по методу «трех амперметров» и табл.5 с рассчитанными параметрами эквивалентных схем по п. 3.4.

4.7. Схемы опытов с характеристикой приборов и оборудования.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Что такое эквивалентные параметры двухполюсника?
- 5.2. Что такое формулы перехода?
- 5.3. Как определить знак угла φ в схеме с ваттметром с помощью добавочной реактивной проводимости?
- 5.4. Можно ли в методе «трех вольтметров» вместо добавочного активного сопротивления R_d использовать реактивное сопротивление? Ответ поясните векторной диаграммой.
- 5.5. Можно ли в методе «трех амперметров» вместо добавочного активного сопротивления R_d использовать реактивное сопротивление? Ответ поясните векторной диаграммой.

Варианты задания

$$U = 25 \text{ В}$$

Таблица 1

Параметр	№ двухполюсника	Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I, \text{ мА}$	I	180	184	170	181	180	170	160	178	170	163
	II	142	151	88	74	143	121	66	82	82	82
$P, \text{ Вт}$	I	2.4	2.5	2.1	2.4	2.43	2.1	1.88	2.25	2.0	1.95
	II	2.1	2.25	0.75	0.6	2.1	1.5	0.6	0.68	0.98	0.75

Определение параметров эквивалентных схем
методом амперметра, вольтметра, ваттметра

Таблица 2

U , В	I , мА	P , Вт	Вид реакт.	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	Y_{Σ} , См	G_{Σ} , См	B_{Σ} , См	φ , град
Данные из табл.1				Предварительный расчет						
Опыт			Расчет							
с добавочной емкостью										

Определение параметров эквивалентных схем
методом амперметра, вольтметра, фазометра

Таблица 3

Опыт			Расчет					
U , В	I , мА	φ , град	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	Y_{Σ} , См	G_{Σ} , См	B_{Σ} , См

Определение параметров эквивалентных схем методом «трех вольтметров»

Таблица 4

Опыт			Из векторной диаграммы			Расчет при $R_d = 180$ Ом						
U_I , В	U_d , В	U , В	U_a , В	U_p , В	φ , град	I , мА	Z_{Σ} , См	R_{Σ} , См	X_{Σ} , См	Y_{Σ} , Ом	G_{Σ} , Ом	B_{Σ} , Ом

Опыт			Из векторной диаграммы			Расчет при $R_d = 180 \text{ Ом}$						
$I_l,$ мА	$I_d,$ мА	$I,$ мА	$I_a,$ мА	$I_p,$ мА	$\varphi,$ град	$U,$ В	$Y_{\Sigma},$ См	$G_{\Sigma},$ См	$B_{\Sigma},$ См	$Z_{\Sigma},$ Ом	$R_{\Sigma},$ Ом	$X_{\Sigma},$ Ом

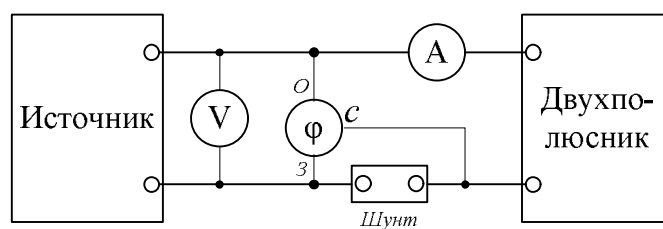


Рис.1. Схема измерений с фазометром

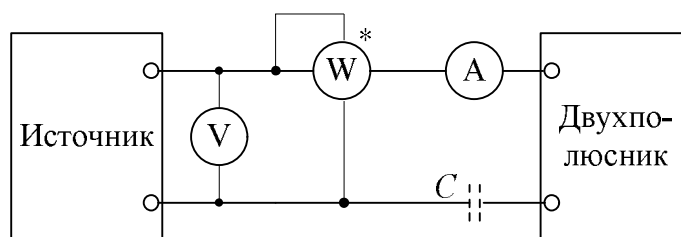


Рис.2. Схема измерений с ваттметром

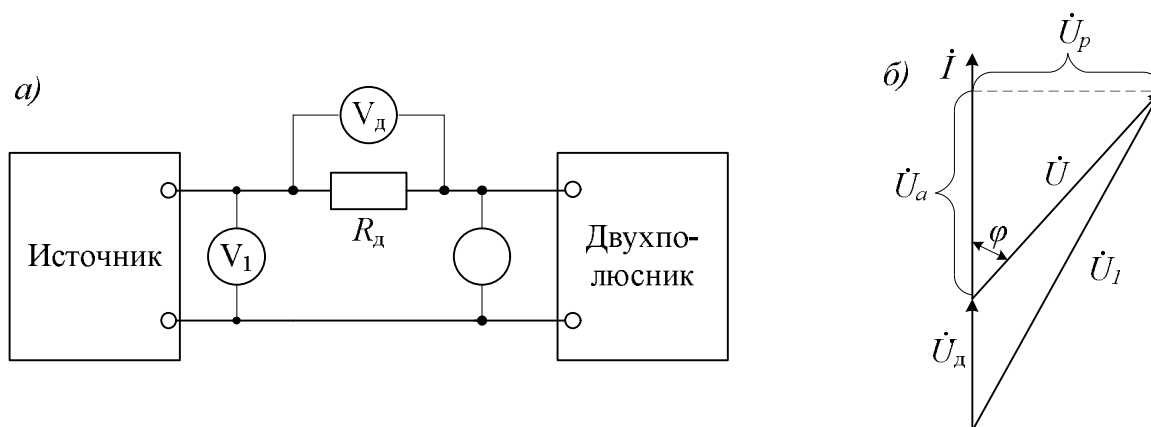


Рис.3. Определение параметров эквивалентных схем по методу

«трех вольтметров»: а – схема измерений; б – векторная диаграмма ($\varphi < 0$)

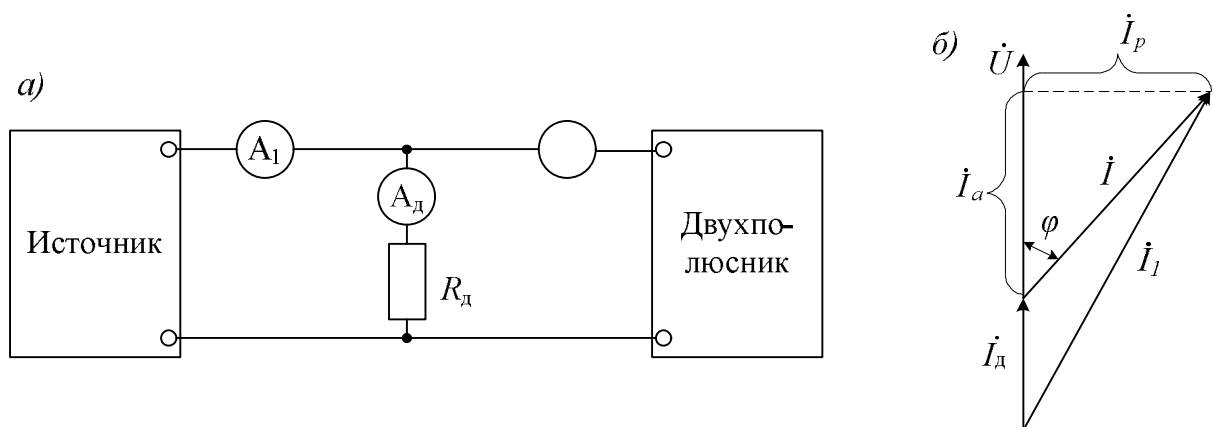


Рис.4. Определение параметров эквивалентных схем по методу «трех амперметров»: а – схема измерений; б – векторная диаграмма ($\varphi > 0$)

Библиографический список

1. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергоиздат, 1981, Ч.1. 533 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высш. Школа, 1978. 528 с.
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные цепи. М.: Энергия, 1970. 585 с.
4. Линейные электрические цепи, установившиеся режимы: Учеб. пособие/ П.Ю. Каасик, С.И. Бардинский, В.В. Колесников и др. ЛИАП. Л., 1985. 99 с.

Оглавление

Лабораторная работа № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....3

Лабораторная работа № 2.

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКА К ПРИЁМНИКУ10

Лабораторная работа № 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЦЕПЕЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО
ТОКА.....19

Лабораторная работа № 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОГО
ДВУХПОЛЮСНИКА28