

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
Часть 3**

ОМСК 2016

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
Часть 3

Утверждено редакционно-издательским советом университета

Омск 2016

УДК 621.3 (075.8)
ББК 31.21я73
К89

Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники». Часть 3 /
А. А. Кузнецов, А. В. Пономарев, А. Ю. Тэттэр, В. Ю. Тэттэр; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. 59 с.

Разработано в соответствии с программой дисциплины «Теоретические основы электротехники».

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления бакалавриата 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника», специальности 23.05.05 – «Системы обеспечения движения поездов», а также специальности 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог» специализации «Электрический транспорт железных дорог» и «Высокоскоростной наземный транспорт» при изучении дисциплины «Электротехника и электроника».

Библиогр.: 5 назв. Рис. 41. Табл. 10

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор К. И. Никитин;
доктор техн. наук, профессор В. В. Харламов;
канд. техн. наук, профессор А. А. Руппель.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Лабораторная работа 1. Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника.....	9
1.1. Общие сведения.....	9
1.2. Порядок выполнения работы.....	10
1.3. Контрольные вопросы.....	11
1.4. Содержание отчета.....	11
Лабораторная работа 2. Цепь с распределенными параметрами	14
2.1. Общие сведения.....	14
2.2. Порядок выполнения работы.....	16
2.3. Контрольные вопросы.....	17
2.4. Содержание отчета.....	18
Лабораторная работа 3. Нелинейная цепь постоянного тока	21
3.1. Общие сведения.....	21
3.2. Порядок выполнения работы.....	22
3.3. Контрольные вопросы.....	23
3.4. Содержание отчета.....	23
Лабораторная работа 4. Инерционные и безынерционные нелинейные элементы.....	27
4.1. Общие сведения.....	27
4.2. Порядок выполнения работы.....	28
4.3. Контрольные вопросы.....	30
4.4. Содержание отчета.....	30
Лабораторная работа 5. Нелинейная резистивная цепь.....	34
5.1. Общие сведения.....	34
5.2. Порядок выполнения работы.....	35
5.3. Контрольные вопросы.....	36
5.4. Содержание отчета.....	37
Лабораторная работа 6. Катушка с ферромагнитным сердечником	39
6.1. Общие сведения.....	39
6.2. Порядок выполнения работы.....	40
6.3. Контрольные вопросы.....	41
6.4. Содержание отчета.....	41

Лабораторная работа 7. Явление феррорезонанса напряжений	43
7.1. Общие сведения.....	43
7.2. Порядок выполнения работы.....	44
7.3. Контрольные вопросы.....	45
7.4. Содержание отчета.....	46
Лабораторная работа 8. Потери в сердечниках из ферромагнитных материалов.....	48
8.1. Общие сведения.....	48
8.2. Порядок выполнения работы.....	49
8.3. Контрольные вопросы.....	49
8.4. Содержание отчета.....	50
Лабораторная работа 9. Периодический процесс в нелинейной цепи переменного тока	52
9.1. Общие сведения.....	52
9.2. Порядок выполнения работы.....	55
9.3. Контрольные вопросы.....	55
9.4. Содержание отчета.....	56
Библиографический список.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Общие указания и правила выполнения лабораторных работ

Выполнение лабораторных работ – важная часть учебного процесса, преследующая цель более глубокого усвоения теоретических положений изучаемой дисциплины и приобретения навыков исследовательской работы.

В третьем семестре изучения ТОЭ выполняются работы по темам: «Четырехполюсники», «Цепи с распределенными параметрами» и «Нелинейные цепи».

Настоящее учебно-методическое пособие разработано в соответствии с методическими указаниями к проведению лабораторных работ на стенде «Теория электрических цепей» В.Н. Непалов, В.И. Сафонов, В.В. Шулдяков – Челябинск: Учтех-Профи, 2013. 113 с.

Перед началом лабораторных работ студенты должны изучить правила и технику безопасности работы в лаборатории.

До начала выполнения очередной лабораторной работы студент должен ознакомиться с соответствующими указаниями, рекомендованной литературой и заранее подготовить *протокол измерений* по требуемой форме. Прежде чем приступить к выполнению работы, студент должен твердо знать теоретический материал темы, к которой относится данная работа, ясно представлять поставленную в работе задачу, способы ее разрешения и ожидаемые результаты.

Вся экспериментальная часть работы выполняется в полном объеме и той последовательности, как это предусмотрено данными методическими рекомендациями, под наблюдением преподавателя.

Правильность и надежность получаемых экспериментальных результатов зависит от соответствия электрической цепи схеме замещения из протокола измерений.

Если составляются сложные схемы, следует придерживаться определенного порядка: сначала соединяются последовательно цепи всех приборов с соответствующей аппаратурой, а затем – все параллельные цепи приборов и аппаратура, относящаяся к ним. При соединении элементов цепи и измерительных приборов рекомендуется подключать к гнездам не более двух

проводников. Соединяя элементы цепи, следует обратить внимание на правильное включение зажимов приборов. В работах, содержащих источники постоянного напряжения, необходимо обращать внимание на полярность подключения приборов и направления токов.

Приступая к работе, нужно наметить порядок проведения отдельных операций, измерений и придерживаться установленного порядка в продолжение всей работы. Во всех случаях, когда возникает сомнение в правильности полученных результатов измерений, необходимо их повторить.

Обращение с приборами и оборудованием требует большой осторожности и внимательности. Включать напряжение для выполнения опыта можно только после проверки схемы преподавателем или лаборантом.

Составление протокола измерений

После выполнения каждой работы студент подписывает протокол измерений у преподавателя, ведущего занятие. Подписанный преподавателем протокол измерений хранится у студента до момента сдачи и защиты отчета по лабораторной работе.

Протокол измерений должен вестись с особой тщательностью, так как он является единственным документом, остающимся в распоряжении экспериментаторов. В протоколе должны отмечаться содержание соответствующего пункта лабораторной работы по программе, электрическая схема, по которой производились измерения.

Запись измерений необходимо вести карандашом в таблицах, указывая в заголовках граф таблиц наименование измеряемых величин и единицы измерения.

Ошибочные записи, промахи и сомнительные наблюдения зачеркиваются, но так, чтобы зачеркнутое можно было разобрать.

Если проведение опыта требует выполнения предварительных расчетов, то в протоколе должны быть указаны формулы, по которым они производились и числовые значения, подставленные в формулы.

Рекомендуется после выполнения каждого пункта работы производить, хотя бы ориентировочно, требуемые программой расчеты и построения. Это дает возможность установить правильность проведения опыта.

Результаты измерений предъявляются для просмотра преподавателю до разборки схемы исследуемой цепи, затем обводятся чернилами.

Если результаты наблюдений оказываются неудовлетворительными, то опыт необходимо повторить. Удовлетворительные результаты подписываются преподавателем.

Составление отчета

На основании протокола измерений составляется отчет о работе, который включает все данные, занесенные в протокол, а также все необходимые вычисления и построения.

Отчет по выполненной работе составляется по соответствующей форме, приведенной в каждой работе.

Представляя результаты в графической форме, следует пользоваться масштабами, которые давали бы возможность легко пользоваться графиком. Рекомендуется применять шкалы, масштаб которых выражается числами 1, 2 или 5, умноженными на 10^n , где n – целое число. Координатные оси должны быть обозначены с указанием единиц измерения. Пример оформления графика представлен на рис. 1.

На графиках экспериментальных зависимостей обязательно должны быть отмечены точки кривой, полученные в результате эксперимента. На расчетных кривых точки не ставятся (пунктирные линии на рис. 1).

Если на одном поле графика требуется нанести несколько кривых, причем размерность величин, откладываемых по оси ординат, различная, то для каждой величины должна быть дана шкала с условным обозначением величины (рис. 1).

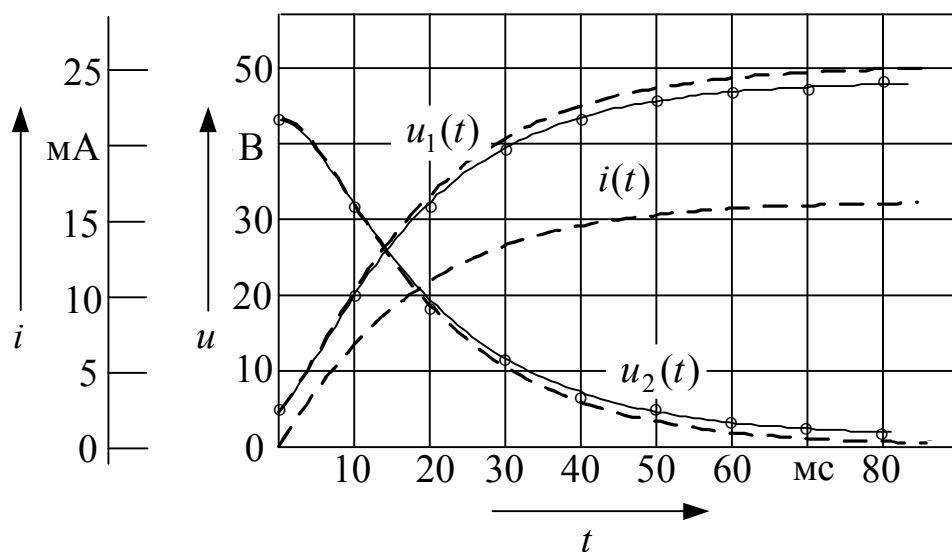


Рис. 1. Пример оформления графика

Векторные диаграммы должны быть построены в масштабе с указанием его на диаграмме. Масштаб на векторных диаграммах обозначается указанием масштабного коэффициента. Например, если на диаграмме напряжений отрезку 1 см соответствует 5 В, то следует писать $m_U = 5 \text{ В/см}$. Если на диаграмме токов отрезку 1 см соответствует 0,1 А, то следует писать $m_I = 0,1 \text{ А/см}$.

Отчет с обязательными ответами на контрольные вопросы представляется преподавателю к следующему лабораторному занятию отдельно каждым студентом. Без сдачи отчета студент не допускается к выполнению очередной работы.

Кроме того, вместе с отчетами каждый студент представляет протокол измерений, подписанный ранее преподавателем.

Краткое описание лабораторного стенда

Лабораторные работы выполняются на стенде, состоящем из блоков, расположение которых показано на рис.2.



Рис.2. Лабораторный стенд

Лабораторная работа 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ А-ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Целью работы является экспериментальное определение А- параметров четырехполосника в установившемся режиме синусоидальных токов и напряжений; определение параметров схемы замещения четырехполосника.

1.1. Общие сведения

Четырехполосником называется электрическая цепь, в которой выделены два входных и два выходных зажима. Направления токов и напряжений на входе U_1, I_1 и на выходе U_2, I_2 указаны на рис. 1.1.

Уравнения пассивного четырех-
полосника в форме A имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2. \end{cases} \quad (1.1)$$

Выполняется равенство

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1. \quad (1.2)$$

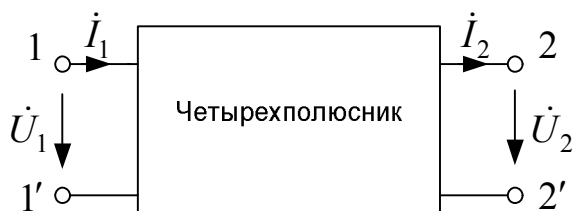


Рис. 1.1. Схема замещения
четырёхполосника

В опытах холостого хода и короткого замыкания при питании со стороны зажимов 1–1' измеряются действующие значения напряжения, тока и угол сдвига фаз между ними. Комплексные сопротивления рассчитываются по выражениям:

$$\underline{Z}_{1X} = \frac{U_{1X}}{I_{1X}} e^{j\varphi_{1X}}; \quad \underline{Z}_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} e^{j\varphi_{1K}}. \quad (1.3)$$

При обратном включении четырехполосника (питание со стороны зажимов 2–2') определяются комплексные сопротивления:

$$\underline{Z}_{2X} = \frac{U_{2X}}{I_{2X}} e^{j\varphi_{2X}}; \quad \underline{Z}_{2K} = \frac{U_{2K}}{I_{2K}} e^{j\varphi_{2K}}. \quad (1.4)$$

Параметры A четырехполосника находятся по выражениям:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1X}}{\underline{Z}_{2X} - \underline{Z}_{2K}}}; \quad \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2K}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1X}}; \quad \underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1K}}. \quad (1.5)$$

Пассивный четырехполюсник можно заменить эквивалентной схемой замещения, содержащей три комплексных сопротивления. На рис. 1.2 приведена Т-образная схема замещения.

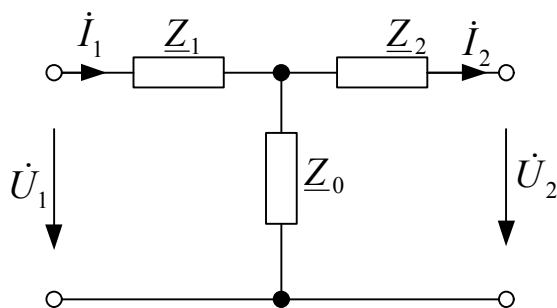


Рис. 1.2. Т-образная схема замещения четырехполюсника

Сопротивления схемы замещения выражаются через А параметры четырехполюсника:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}; \underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{C}}; \quad (1.6)$$

Схема замещения обычно не реализуется физическими элементами, а используется как расчетная.

1.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Рекомендуемое значение частоты 100...300 Гц. В работе используют мультиметр и измерительные приборы из блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗЫ**. Четырехполюсник собирают из элементов блоков **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** и **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**. Рекомендуемые значения: сопротивления $R_1 = 47$ или 68 Ом; $R_2 = 47, 68$ или 100 Ом; индуктивность $L = 30, 40, 50$ или 60 мГн; конденсатор емкостью $C = 10$ мкФ. Рекомендуемое сопротивление нагрузки $R_H = 47, 68$ или 100 Ом.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П.1 протокола. Подключить к зажимам 2 – 2' сопротивление $R_H = R_3$.

2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Установить заданные преподавателем величины R, L, C в блоках **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** и **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**.

4) Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Установить по заданию преподавателя на выходе генератора действующее значение синусоидального напряжения $U_1 = 5 - 7$ В и частоту $f = 100 - 300$ Гц. Записать данные в протокол.

5) Выполнить опыт с активным сопротивлением нагрузки R_H .

Для измерения действующих значений напряжения u_1 и тока i_1 и угла сдвига фаз φ использовать встроенные в **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗЫ** приборы. Опытные данные занести в табл. 1П протокола измерений.

Выходное напряжение четырехполюсника U_2 и активное сопротивление катушки R_k измерить мультиметром из блока **МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ**, остальные величины измерить приборами **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗЫ**. Измеренные значения занести в табл. 1П протокола измерений.

6) Выполнить опыты прямого холостого хода и короткого замыкания. Измеренные значения занести в табл. 1П.

7) Поменять местами входные $1-1'$ и выходные $2-2'$ зажимы. Выполнить опыты обратного холостого хода и короткого замыкания. Измеренные значения занести в табл. 1П.

8) Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений.

9) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

10) Выключить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

1.3. Контрольные вопросы

- 1) Дать определение четырехполюсника.
- 2) Какие величины связывают A -параметры?
- 3) Записать систему уравнений четырехполюсника с A -параметрами, в котором вход и выход поменяли местами.
- 4) Используя уравнения четырехполюсника при прямом и обратном включении и соотношение $\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$, вывести формулы для определения A -параметров по известным \underline{Z}_{1x} , \underline{Z}_{2x} и \underline{Z}_{2k} .

1.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений.
- 2) Расчет A -параметров четырехполюсника по экспериментальным данным. Выполнить проверку $\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$.
- 3) Расчет параметров Т-образной схемы замещения четырехполюсника.
- 4) Используя A -параметры, U_2 и R_n , провести расчет U_1 , I_1 и φ для четырехполюсника с нагрузкой. Сравнить с экспериментальными данными.
- 5) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 1 Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника

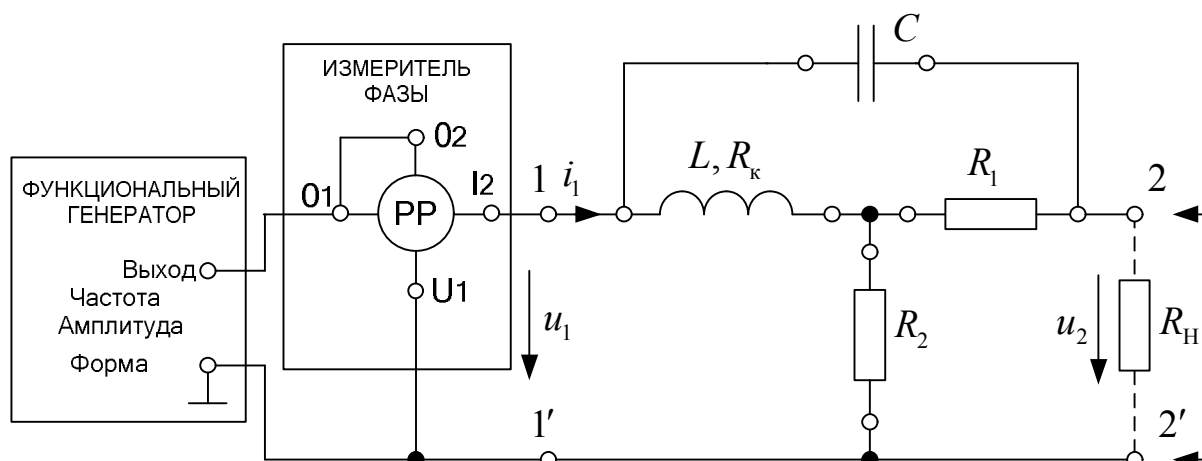


Рис. 1П.1. Схема опыта (прямое включение)

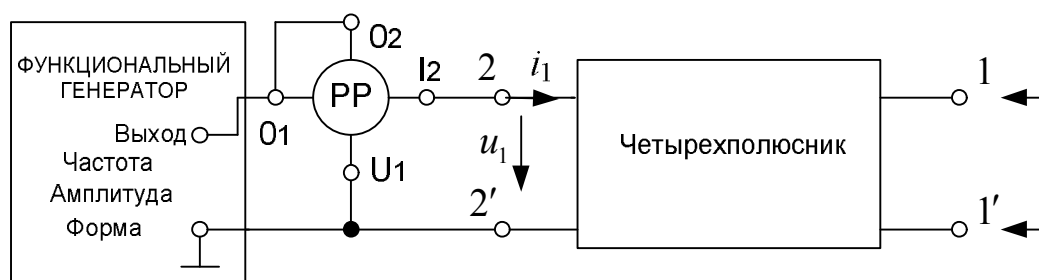


Рис. 1П.2. Схема опыта (обратное включение)

$f = \underline{\hspace{1cm}}$ Гц, $R_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом, $R_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом, $C = \underline{\hspace{1cm}}$ мкФ, $L = \underline{\hspace{1cm}}$ мГн,
 $R_k = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом; $U_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $R_H = R_3 = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом.

Таблица 1П

Результаты измерений

Режим		I_1 , мА	φ , град.	$\underline{Z} = \frac{U_1}{I_1} e^{j\varphi}$, Ом
Прямое включение	Нагрузка $Z_H = R_H$; $U_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ В			$\underline{Z}_{\text{ВХ}} =$
	Холостой ход ($Z_H = \infty$)			$\underline{Z}_{\text{1х}} =$
	Короткое замыкание ($Z_H = 0$)			$\underline{Z}_{\text{1к}} =$
Обратное включение	Холостой ход ($Z_H = \infty$)			$\underline{Z}_{\text{2х}} =$
	Короткое замыкание ($Z_H = 0$)			$\underline{Z}_{\text{2к}} =$

$$\frac{\underline{Z}_{1x}}{\underline{Z}_{1k}} = \underline{\hspace{2cm}} \qquad \frac{\underline{Z}_{2x}}{\underline{Z}_{2k}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x}}{\underline{Z}_{2x} - \underline{Z}_{2k}}} =$$

$$\underline{B} = \underline{A} \underline{Z}_{2k} =$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1x}} =$$

$$\underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1k}} =$$

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} =$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A} - 1}{\underline{C}} =$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{D} - 1}{\underline{C}} =$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{C}} =$$

$$\dot{U}_1 = \underline{A} \dot{U}_2 + \underline{B} \frac{\dot{U}_2}{R_H} =$$

$$i_1 = \underline{C} \dot{U}_2 + \underline{D} \frac{\dot{U}_2}{R_H} =$$

$$\varphi = \beta - \alpha =$$

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

Лабораторная работа 2

ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Целью работы является экспериментальное исследование распределения напряжения и тока вдоль однородной линии при различных режимах работы.

2.1. Общие сведения

При передаче энергии или сигнала на расстояния, соизмеримые с длиной волны λ , необходимо учитывать, что электрическая емкость, индуктивность и сопротивление распределены по всей длине цепи. В связи с этим используют погонные параметры цепи: индуктивность L_0 Гн/км; емкость C_0 Ф/км; активное сопротивление R_0 Ом/км; активная проводимость утечки G_0 1/Ом·км. Линии, в которых погонные параметры сохраняются неизменными по длине линии, называются однородными. На рис. 2.1 показана схема замещения участка линии.

Задача изучения электромагнитных процессов в цепях с распределенными параметрами упрощается, если считать линию идеальной, т. е. не имеющей потерь:

$$R_0 = G_0 = 0.$$

Напряжения и токи в длинной линии без потерь при установившемся синусоидальном режиме работы связаны уравнениями:

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_2 \cos \beta x' + j Z_C \dot{I}_2 \sin \beta x'; \quad (2.1)$$

$$\dot{I}(x') = j \frac{\dot{U}_2}{Z_C} \sin \beta x' + \dot{I}_2 \cos \beta x'. \quad (2.2)$$

Здесь \dot{U}_2 , \dot{I}_2 комплексные действующие значения напряжения, тока в конце линии; $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} = 2\pi/\lambda$ – коэффициент фазы, рад/км; $Z_C = \sqrt{L_0/C_0}$ – волновое сопротивление; $\dot{U}(x')$, $\dot{I}(x')$ комплексные действующие значения напряжения, тока на расстоянии x' от конца линии (рис. 2.2).

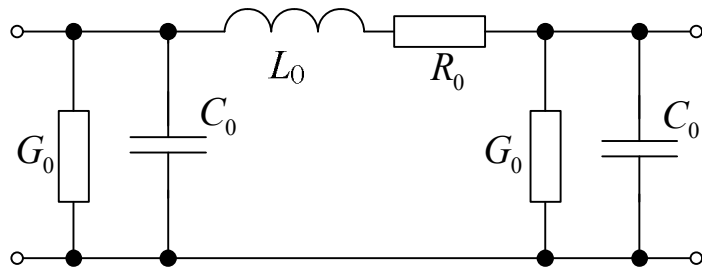


Рис. 2.1. Схема замещения участка линии

Распределение действующих значений напряжения $U(x')$ в линии зависит от нагрузки линии:

– при холостом ходе:

$$U_{xx}(x') = U_2 |\cos(\beta x')|; \quad (2.3)$$

– при коротком замыкании:

$$U_{кз}(x') = I_2 Z_C |\sin(\beta x')|; \quad (2.4)$$

– при согласованной нагрузке (натуральный режим):

$$R = Z_C; U_{нр}(x') = U_2. \quad (2.5)$$

Графики $U(x')$ в режимах холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки показаны на рис. 2.3.

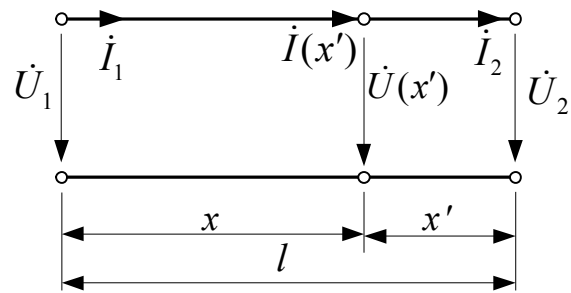


Рис.2.2. Обозначение токов и напряжений в линии

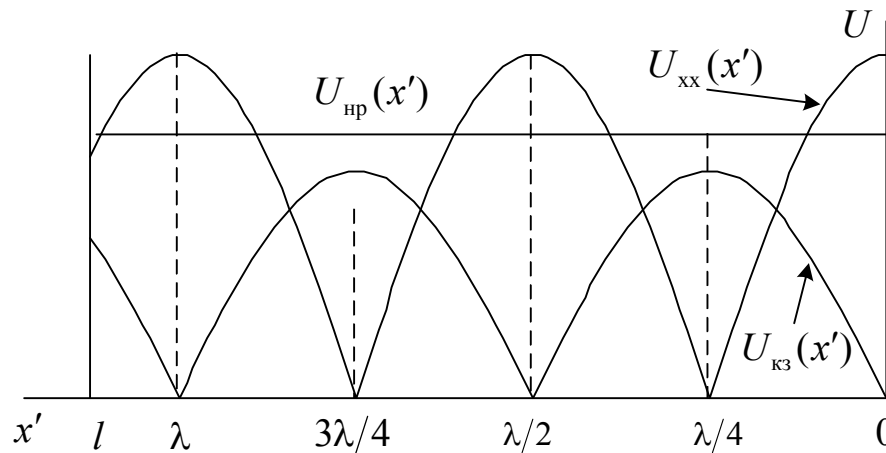


Рис.2.3. Графики $U(x')$

При холостом ходе и коротком замыкании в линии возникает режим стоячих волн. Точки, в которых напряжение равно нулю, называют узлами. Точки, в которых напряжение максимально, называют пучностями.

Режим работы линии, при котором сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии, называется натуральным.

Полагая в уравнениях линии $x' = l$, получаем

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \beta l + j Z_C \dot{I}_2 \sin \beta l, \quad \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_2}{Z_C} \sin \beta l + \dot{I}_2 \cos \beta l. \quad (2.6)$$

Эти уравнения представляют собой уравнения симметричного четырехполюсника в A -параметрах: $\underline{A} = \underline{D} = \cos \beta l$, $\underline{B} = jZ_C \sin \beta l$, $\underline{C} = j \frac{1}{Z_C} \sin \beta l$.

Разделив линию на отрезки равной длины и заменив каждый отрезок симметричным четырехполюсником, можно создать модель линии.

В лабораторной работе десятью Π -образными четырехполюсниками (звеньями) моделируется коаксиальная кабельная линия длиной $l = 10$ км. Погонные параметры кабельной линии: $L_0 = 0,25$ мГн/км, $C_0 = 0,09$ мкФ/км. Потерями в кабеле можно пренебречь $R_0 = G_0 = 0$.

2.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Измерительные приборы расположены в блоке **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ**. Модель линии представлена модулем **ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**.

1) Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 2П протокола измерений.

2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Записать заданную преподавателем частоту f в протокол измерений. Рекомендуемые значения частоты f от 12 до 16 кГц.

4) Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений.

5) Установить регулятор **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в положение 0. Включить тумблер **Сеть**. Переключатель **Форма** установить в положение \sim . Регулятором **Частота** установить на выходе модуля заданную частоту f .

6) Подключить вольтметр переменного тока блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** к гнездам $U_{\text{вх}}$ модуля **ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**. Регулятором **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить напряжение $U_{\text{вх}} = 5 \dots 7$ В.

7) *Холостой ход*. Поочередно подключая вольтметр блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** к гнездам 0 км, 1 км, ... 10 км измерить распределение

напряжения $U_{xx}(x')$ вдоль модели линии в режиме холостого хода. Измеренные значения занести в табл. 2П протокола измерений. *Указанный порядок применять в других режимах.*

8) *Короткое замыкание.* Закоротить гнезда Z_C . Измерить вольтметром блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** распределение напряжения $U_{кз}(x')$ вдоль модели линии в режиме короткого замыкания и занести значения в табл. 1П. Измерить и записать в протокол напряжение U_R на резисторе R .

9) *Натуральный режим.* Подключить к гнездам Z_C волновое сопротивление линии. Для этого рекомендуется из блока **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** два резистора по 100 Ом соединить параллельно. Измерить распределение напряжения $U_{нр}(x')$ вдоль модели линии в режиме близком к натуральному. Измеренные значения занести в табл. 2П.

10) Разомкнуть гнезда Z_C и подключить к ним вольтметр блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ**. Установить регулятор **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в положение 0.

11) Регулятором **Частота**, установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту $f_{\lambda/4}$. Регулятором **Амплитуда** модуля установить на гнездах Z_C напряжение $U_2 = 5 \dots 7$ В.

12) Подключить вольтметр блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** к гнезду U_1 (гнездо 10 км) модуля **ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**. Убедиться, что напряжение $U_1 \cong 0$.

13) Измерить распределение напряжения $U_{\lambda/4}(x')$ вдоль модели линии в режиме холостого хода четвертьволновой линии. Измеренные значения занести в табл. 2П.

14) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

15) Выключить тумблер **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

2.3. Контрольные вопросы

- 1) При какой длине линии необходимо учитывать ее распределенные параметры R, L, C, G ?
- 2) Дать определение R_0, L_0, C_0, G_0 .
- 3) Как определяются Z_C и γ ?

- 4) Как определяются Z_C и γ для линии без потерь?
- 5) Записать уравнение для напряжения $\dot{U}(x')$ и тока $\dot{I}(x')$ в зависимости от расстояния x' от конца линии без потерь.
- 6) Записать соотношения для определения $\dot{U}(x')$ при:
 - холостом ходе;
 - коротком замыкании;
 - согласованной нагрузке.

2.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений.
- 2) Расчет зависимости действующих значений напряжения в линии от координаты x' для каждого режима по данным таблицы 2П.

При расчете зависимости

$$U_{\text{кз}}(x') = Z_C I_2 |\sin(\beta x')|, \quad (2.7)$$

где ток $I_2 = \frac{I_1}{|\cos \beta l|}$, а ток I_1 определяется

по схеме замещения линии (рис.2.4):

$$I_1 = \frac{U_R}{R}. \quad (2.8)$$

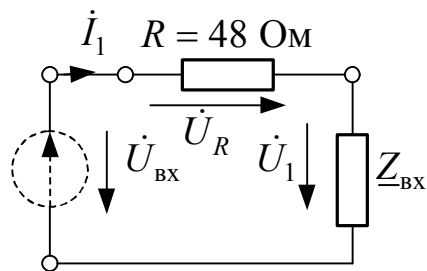


Рис 2.4 Схема замещения
линии

- 3) Результаты расчета $U_{\text{хх}}(x')$, $U_{\text{кз}}(x')$, $U_{\text{нр}}(x')$ и $U_{\lambda/4}(x')$ записать в таблицу 2П протокола измерений.
- 4) Графики расчетных функций напряжения. Сравнить их с данными, полученными экспериментально, объяснить расхождение.
- 5) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 2

Цепь с распределенными параметрами

Электрическая схема цепи представлена на рис. 2П.

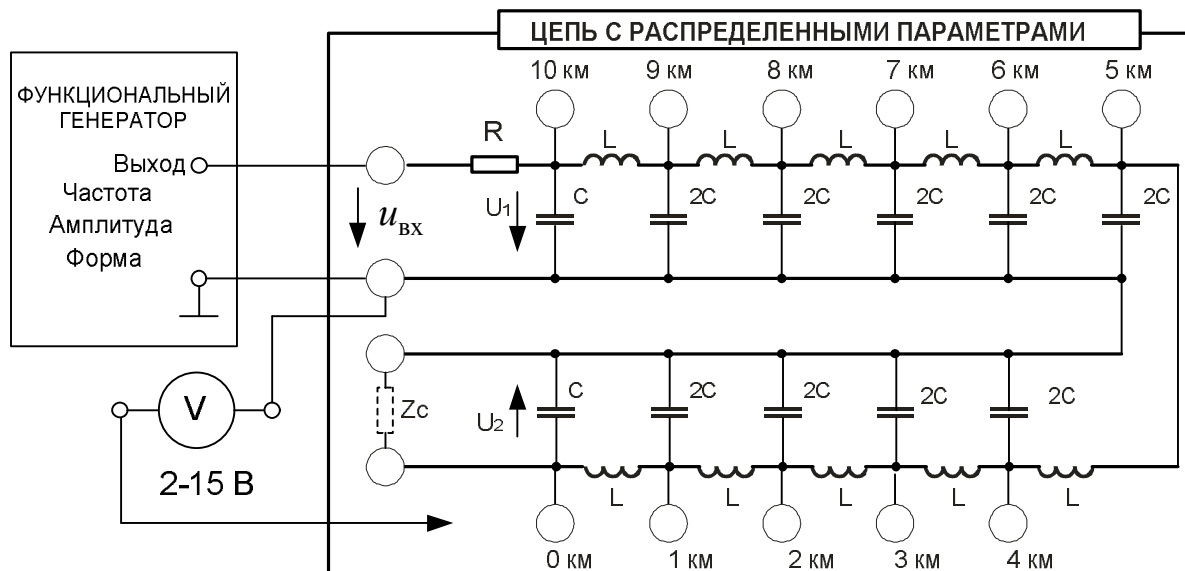


Рис. 2П. Электрическая схема цепи

Частота $f =$ кГц. Длина линии $l = 10$ км. $R = 48$ Ом. Входное напряжение $U_{вх} =$ В. В режиме короткого замыкания (КЗ) $U_R =$.

Погонные параметры линии: $L_0 = 0,25$ мГн/км, $C_0 = 0,09$ мкФ/км.

Волновое сопротивление $Z_C = \sqrt{L_0 / C_0} =$ Ом.

Коэффициент фазы $\beta = 2\pi f \sqrt{L_0 C_0} =$ рад/км. Длина волны $\lambda = 2\pi / \beta =$ км. Четвертьволновая линия: $\lambda = 4l = 40$ км;

$\beta_{\lambda/4} = 2\pi / 4l =$ рад/км; $f_{\lambda/4} = \frac{\beta_{\lambda/4}}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}} =$ Гц.

Экспериментальные данные представлены в табл. 2П.

Таблица 2.П.

Результаты эксперимента и расчета

x' , км											
Экспер. $U_{xx}(x')$, В											
Расчет $U_{xx}(x')$, В											
Экспер. $U_{kз}(x')$, В											
Расчет $U_{kз}(x')$, В											
Экспер. $U_{нр}(x')$, В											
Расчет $U_{нр}(x')$, В											
Экспер. $U_{\lambda/4}(x')$, В											
Расчет $U_{\lambda/4}(x')$, В											

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Целью работы является экспериментальное получение характеристик нелинейных резистивных элементов, расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

3.1. Общие сведения

Нелинейным называется резистивный элемент электрической цепи, сопротивление которого R зависит от напряжения и тока. Нелинейной является электрическая цепь, в которой есть хотя бы один нелинейный элемент.

Зависимость напряжения от тока в резисторе называется его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). ВАХ элемента зависит от условий, в которых проводился эксперимент. Если измерения проводились при постоянных токе и напряжении, то характеристика нелинейного элемента называется *статической*.

Для получения статических характеристик нелинейных элементов необходимо измерить ряд значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи (рис. 3.1).

Характеристики нелинейных элементов $U(I)$ или $I(U)$ определяют экспериментально и задают в виде таблиц или графиков, что предопределяет широкое использование графических (графоаналитических) методов расчета.

В лабораторной работе исследуется цепь со смешанным соединением элементов, приведенная на рис. 3.2. Уравнения Кирхгофа имеют вид:

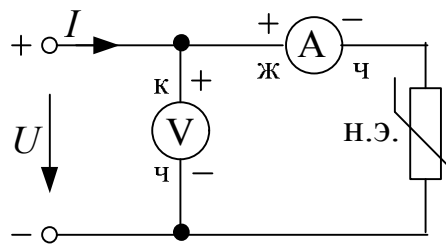


Рис. 3.1. Схема для снятия ВАХ

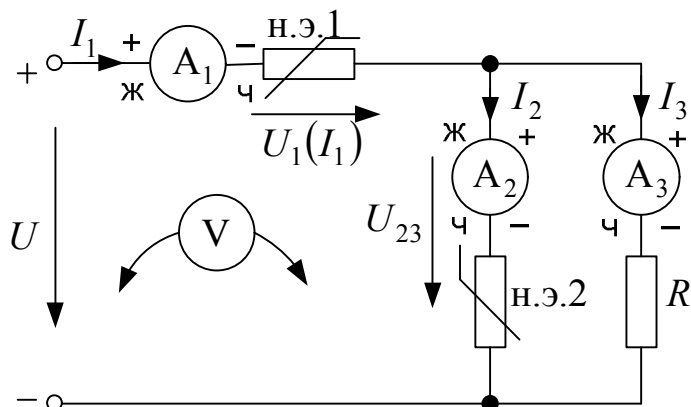


Рис. 3.2. Исследуемая цепь

$$I_1(U_{23}) = I_2(U_{23}) + I_3(U_{23}); \quad (3.1)$$

$$U_1(I_1) + U_{23}(I_1) = U(I_1); \quad (3.2)$$

$$U_2(I_2) = U_3(I_3) = U_{23}(I_1). \quad (3.3)$$

Уравнения Кирхгофа решают графически. Участки с токами I_2 и I_3 соединены параллельно. Характеристика $U_{23}(I_1)$ при графическом методе решения получается в результате суммирования характеристик н.э.2 и резистивного R при одинаковых значениях напряжения. Участки с напряжениями U_1 и U_{23} соединены последовательно. Характеристика $U(I_1)$ – сумма характеристик н.э.1 и $U_{23}(I_1)$ при одинаковых значениях тока (рис. 3.3).

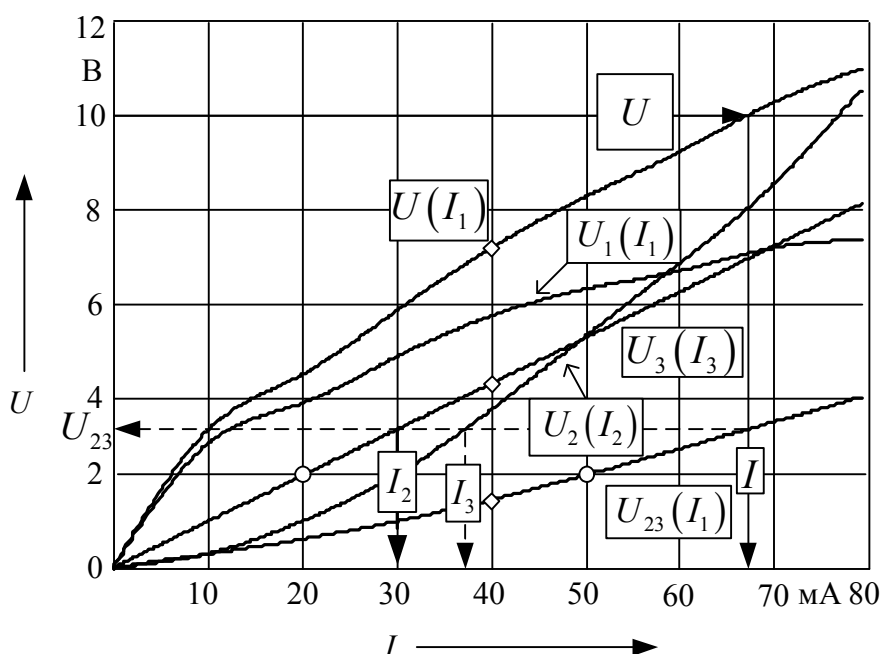


Рис. 3.3. Графический метод решения уравнений Кирхгофа

3.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе используется источник регулируемого по величине постоянного напряжения $U = 0...12$ В из блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4**. Измерительные приборы расположены в блоке **ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ**. Тумблеры SA1 и SA2 – в положении « = » Нелинейные элементы электрической цепи выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** (н.э.1 – «R1», н.э.2 – «HL», линейный резистор R – «R4»).

- 1) Собрать цепь по схеме, показанной на рис. 3П.1 протокола измерений.
- 2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4 0...12 В**. Установить напряжение $U = 0$.

4) Плавно изменяя регулятором напряжения ток I от нуля до 80 мА с шагом 10 мА экспериментально получить статические характеристики нелинейных элементов н.э.1, н.э.2. Для резистора R измерить напряжение U_R при токе 50 мА. Полученные ВАХ учитывают сопротивления амперметров, которыми нельзя пренебречь. Все измеренные величины занести в табл. 3П.1 протокола измерений.

5) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 3П.2

6) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

7) Установить на входе цепи указанное преподавателем напряжение U . Измерить токи ветвей, напряжения U_1 и U_2 . Результаты измерений занести в табл. 3П.2

8) Утвердить протокол измерений у преподавателя.

9) Выключить тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

3.3. Контрольные вопросы

- 1) Какие элементы называют нелинейными?
- 2) Как характеризуют свойства нелинейных резистивных элементов?
- 3) Какие ВАХ называют статическими?
- 4) Как определяется статическое сопротивление в заданной точке ВАХ?
- 5) Как определяется дифференциальное сопротивление в заданной точке ВАХ?
- 6) Как графически рассчитываются нелинейные цепи постоянного тока при последовательном, параллельном и смешанном соединениях?

3.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений.
- 2) Вольт-амперные характеристики элементов.

3) Уравнения Кирхгофа и графический расчет токов и напряжений в схеме рис. 3П.2. Результаты графического решения уравнений Кирхгофа для заданного напряжения U представить в табл. 3П.2 протокола измерений.

Сравнить результаты графического расчета с экспериментальными данными, объяснить расхождение.

4) Расчет статического и дифференциального сопротивлений цепи для напряжения $U = 5 \text{ В}$.

5) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 3 Нелинейная цепь постоянного тока

Схема для измерения статической ВАХ показана на рис. 3П.1.

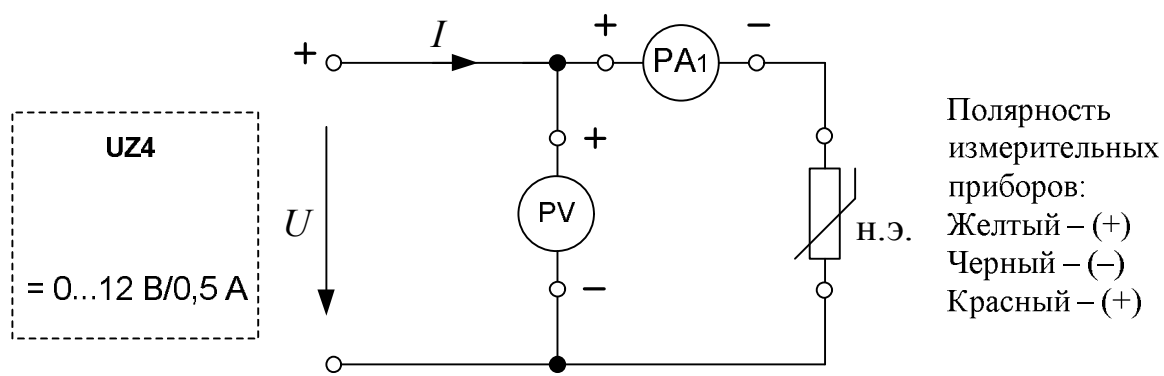


Рис. 3П.1. Схема измерения статической ВАХ

Экспериментальные данные представлены в табл. 3П.1.

Таблица 3П.1

Результаты измерений

I , мА	10	20	30	40	50	60	70	80
$U_{нэ1} (U_{R1})$, В								
$U_{нэ2} (U_{HL})$, В								
$U_R (U_{R4})$, В								

Схема исследуемой электрической цепи представлена на рис. 3П.2.

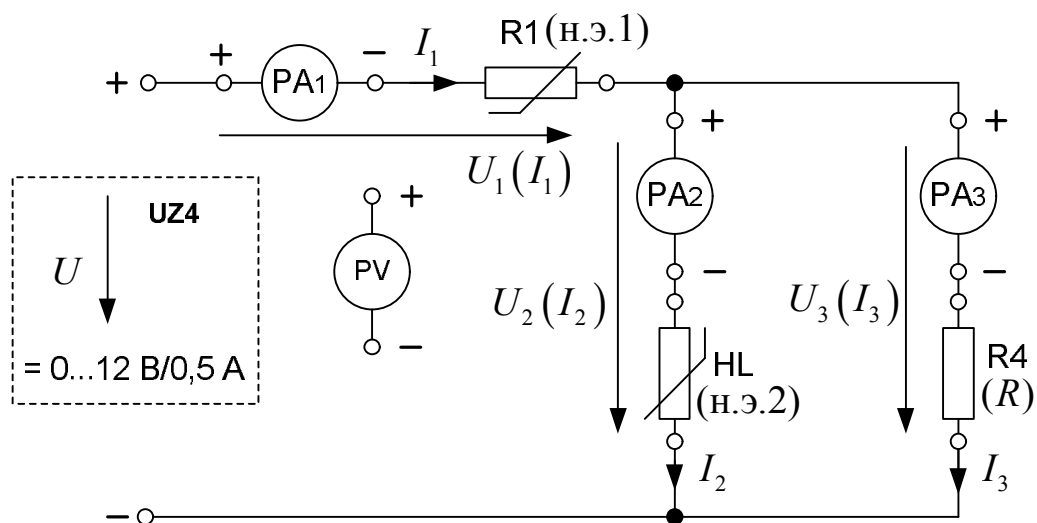


Рис. 3П.2. Схема исследуемой электрической цепи

Результаты измерений и графического расчета представлены в табл. 3П.2.

Таблица 3П.2

Результаты эксперимента и расчета

Способ определения	U , В	U_1 , В	U_2 , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА
Опыт						
Графический расчет						

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

Лабораторная работа 4

ИНЕРЦИОННЫЕ И БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Целью лабораторной работы являются исследование явления инерционности в нелинейных цепях, а также освоение методов расчета нелинейных цепей с синусоидальными источниками.

4.1. Общие сведения

Решающее влияние на характер процессов в цепях переменного тока оказывают инерционные свойства нелинейных элементов. По степени инерционности процессов нелинейные элементы разделяют на инерционные и безынерционные.

Параметры инерционных элементов не успевают измениться за период входного напряжения. Поэтому динамическая характеристика (для мгновенных значений токов и напряжений) инерционного элемента остается линейной, а для действующих значений становится нелинейной. Благодаря линейной динамической характеристике в цепи с источниками синусоидального напряжения токи и напряжения остаются синусоидальными. Для расчета можно использовать комплексный метод.

Значительно сложнее процессы в цепях с безынерционными элементами, параметры которых меняются вместе с изменением мгновенных значений токов и напряжений. Поэтому в цепи с источниками синусоидального напряжения токи и напряжения в цепи становятся несинусоидальными.

В лабораторной работе рассмотрен безынерционный элемент со слабой нелинейностью. Действующее значение возникших в результате нелинейности высших гармоник составляет не более 30 процентов от действующего значения основной гармоники. Поскольку кривая тока симметрична относительно оси абсцисс, в ее разложении в ряд Фурье будут содержаться только нечетные синусоиды и косинусоиды, а суммирование проводится на половине периода.

Для определения спектрального состава тока, заданного осциллограммой, на половине периода выполняют разбиение функции тока на N равных участков. Пусть $N = 10$ (рис. 4.1). Тогда по значениям величин i_k коэффициенты разложения в ряд Фурье по синусам и косинусам вычисляются по выражениям:

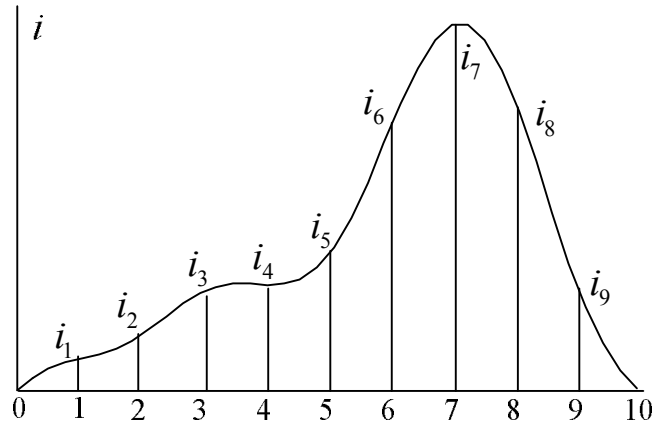


Рис. 4.1 Определение i_k

$$B_{(n)} = \frac{2}{10} \sum_{k=1}^{10} i_k \sin\left(n \frac{k\pi}{10}\right), \quad C_{(n)} = \frac{2}{10} \sum_{k=1}^{10} i_k \cos\left(n \frac{k\pi}{10}\right). \quad (4.1)$$

Амплитуды A_{nm} и начальные фазы ψ_n гармоник ряда

$$i = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots \quad (4.2)$$

определяются по формулам:

$$A_{nm} = \sqrt{B_{(n)}^2 + C_{(n)}^2}; \quad \Psi_n = \arctg \frac{C_{(n)}}{B_{(n)}}. \quad (4.3)$$

4.2. Порядок выполнения работы

Источником синусоидального напряжения частотой $f = 50$ Гц является **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ3**. Измерительные приборы расположены в модуле **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**. Нелинейные элементы электрической цепи и линейный резистор $R_3 = 1$ Ом выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Для получения зависимостей от времени используют **ОСЦИЛЛОГРАФ**.

Работа состоит из двух частей. В первой части исследуется цепь с инерционным резистивным элементом HL , а во второй – с безынерционным нелинейным элементом – катушкой индуктивности L с ферромагнитным сердечником.

1) Собрать электрическую цепь с инерционным резистивным элементом HL (схема рис. 4П.1 протокола измерений).

2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**, тумблер **SA1 МОДУЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗЫ** и тумблер **SA2 МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ3**. Установить напряжение $U = 0$.

4) Плавно изменяя регулятором напряжения ток I от нуля до 80 мА с шагом 10 мА, экспериментально получить характеристику нелинейного элемента. Измеренные величины занести в табл. 1П протокола измерений. Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** (сфотографировать) зависимости $u(t)$, $u_{R3}(t)$ и $i(u)$ при $I = 10 - 20$ мА и $I = 60 - 70$ мА.

5) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 4П.2. $C = 10 \dots 22$ мкФ.

6) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

7) Выполнить расчеты для указанного преподавателем значения тока I из табл. 4П1 (см. протокол).

8) Регулятором напряжения модуля **UZ3** установить указанное преподавателем значение тока I (30 – 60 мА). Измерить входное напряжение, мощность и угол сдвига фаз. Напряжения U_{HL} и U_C измерить мультиметром **PV1 МОДУЛЯ ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ (SA1 в положении «~»)**. Результаты измерений занести в табл. 4П.2.

9) Подключить **Вход 1** и **Вход 2** осциллографа согласно рис. 4П.2. Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** (сфотографировать) кривые зависимости $u(t)$ и $u_{HL}(t)$. Подключить Вход 1 к резистору R_3 , зафиксировать зависимости $u(t)$ и $u_{R3}(t)$, записать масштабы m_{u1} , m_{u2} и m_t .

10) Собрать электрическую цепь с катушкой L (схема рис. 4П.3).

11) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

12) Установить на входе цепи напряжение U , при котором действующее значение тока $I = 60 - 75$ мА.

13) Подключить входы **ОСЦИЛЛОГРАФА** согласно рис. 4П.3. Срисовать с экрана на кальку (сфотографировать) кривые зависимостей $u(t)$ и $u_{R3}(t) = R_3 i(t)$, а также $u_{R3}(t)$ на половине периода во весь экран. При $R_3 = 1$ Ом кривая $u_{R3}(t)$ тождественна зависимости $i(t)$. На осциллограмме написать масштабы m_u усиления по вертикальной оси (по входам 1 и 2) и m_t временной развертки.

14) Утвердить протокол измерений у преподавателя.

15) Выключить тумблер **SA2** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ3** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

4.3. Контрольные вопросы

- 1) Каковы основные свойства инерционных и безынерционных нелинейных элементов?
- 2) Как с помощью осциллографа получить зависимости $i(t)$, $i(u)$?
- 3) Как изменяется статическое сопротивление НЛ при увеличении напряжения?
- 4) Какие составляющие содержит ряд $i(t)$ безынерционного нелинейного элемента L ?
- 5) Как подсчитывается действующее значение несинусоидального тока, представленного рядом Фурье?

4.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений.
- 2) Инерционный элемент НЛ.
 - 2.1) Схема цепи с инерционным резистивным элементом НЛ для экспериментального определения зависимостей $I(U)$, $u(t)$ и $i(t)$.
 - 2.2) Вольтамперная характеристика $I(U)$ нелинейного элемента НЛ для действующих значений по данным табл. 4П.1 протокола измерений.
 - 2.3) Осциллограммы $u(t)$, $i(t)$ и $i(u)$ для нелинейного элемента НЛ при $I = 10-20$ мА и $I = 60-70$ мА.
 - 2.4) Схема цепи с последовательным соединением C и НЛ.
 - 2.5) Осциллограммы $u(t)$ и $u_{HL}(t)$, $u(t)$ и $i(t)$ при заданном токе I и емкости C .
 - 2.6) Рассчитать U_C , U_{HL} , U , R_{HL} , φ , P . Полученные данные записать в таблицу 4П.2, сравнить с экспериментальными данными, объяснить причины расхождения.
- 3) Безынерционный элемент L .
 - 3.1) Схема для экспериментального получения зависимостей $u(t)$ и $i(t)$.
 - 3.2) Осциллограммы $u(t)$ и $i(t)$, а также $i(t)$ на половине периода во весь экран.

3.3) По осциллограмме $i(t)$ найти 10 значений тока i_k на интервале от 0 до $T/2$ через $T/20 = 1$ мс.

3.4) Вычислить значения коэффициентов разложения в ряд Фурье по синусам и косинусам для первой и третьей гармоник функции тока:

$$B_{(n)} = \frac{2}{10} \sum_{k=1}^{10} i_k \sin\left(n \frac{k\pi}{10}\right) = \frac{2}{10} \sum_{k=1}^{10} i_k \sin(nk18^\circ); \quad (4.4)$$

$$C_{(n)} = \frac{2}{10} \sum_{k=1}^{10} i_k \cos\left(n \frac{k\pi}{10}\right) = \frac{2}{10} \sum_{k=1}^{10} i_k \cos(nk18^\circ); \quad (4.5)$$

По этим данным рассчитать амплитуды и начальные фазы:

$$A_{nm} = \sqrt{B_{(n)}^2 + C_{(n)}^2}; \quad \Psi_n = \arctg \frac{C_{(n)}}{B_{(n)}}. \quad (4.6)$$

При расчете Ψ_n по формуле (4.6) следует помнить, что в случае, когда $B_{(n)} < 0$, к полученному на калькуляторе углу необходимо прибавить 180° (при положительном $C_{(n)}$) или вычесть 180° (при отрицательном $C_{(n)}$).

Записать $i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(3)}(t)$.

3.5) Рассчитать действующее значение тока. Сравнить расчетное и полученное экспериментально значения тока i , объяснить расхождение.

4) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 4 Инерционные и безынерционные нелинейные элементы

1. Инерционный элемент HL

Схема для измерения характеристики инерционного элемента показана на рис. 4П.1. Результаты измерений представлены в табл. 4П.1.

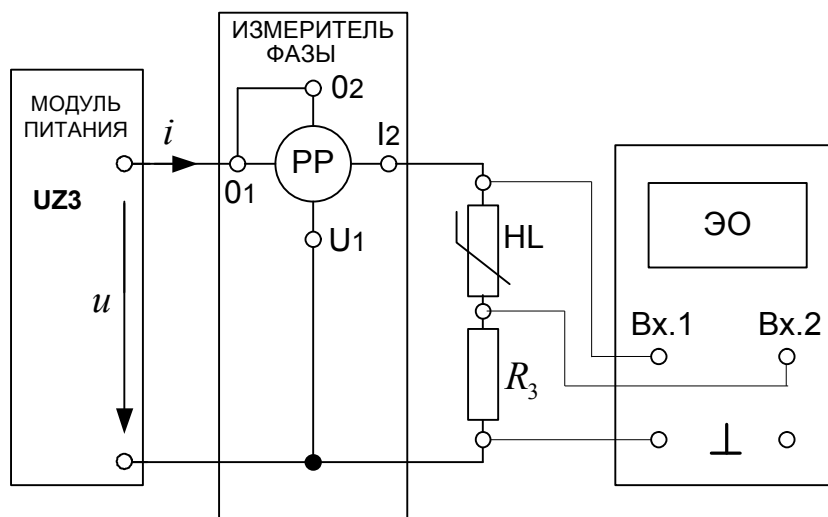


Рис. 4П.1. Схема измерения характеристики инерционного элемента

Таблица 4П.1

I , мА	10	20	30	40	50	60	70	80
U , В								

Схема с нелинейным инерционным элементом показана на рис. 4П.2. Частота $f = 50$ Гц; период $T = 1/f = 20$ мс; емкость конденсатора $C =$ _____ мкФ, реактивное сопротивление $X_C =$ _____ Ом. Осциллограммы $u(t)$, $i(t)$ и $i(u)$ приложены к протоколу.

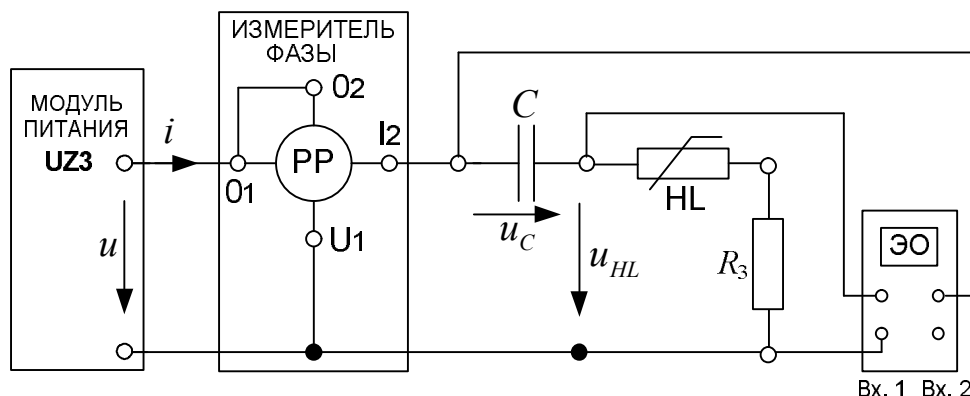


Рис. 4П.2. Схема с нелинейным инерционным элементом.

Лабораторная работа 5

НЕЛИНЕЙНАЯ РЕЗИСТИВНАЯ ЦЕПЬ

Целью лабораторной является исследование электрической цепи с нелинейным безынерционным резистивным элементом.

5.1. Общие сведения

Параметры безынерционных нелинейных элементов меняются вместе с изменением мгновенных значений токов и напряжений.

В качестве вольт-амперной характеристики $u(i)$ безынерционного нелинейного элемента можно принять его статическую характеристику (рис. 5.1). Из рисунка следует, что при синусоидальном напряжении $u(t)$ ток $i(t)$ в его цепи будет несинусоидальный.

Характеристика $u(i)$ обычно представляется в виде таблицы или графика.

При аналитическом расчете используют аппроксимацию.

Аппроксимирующую функцию выбирают так, чтобы она была близка исходной зависимости, а расчет цепи был прост. Обоим условиям удовлетворяет кусочно-линейная функция.

Расчет цепи производится отдельно для каждого линейного участка аппроксимации. На рис. 5.2 показана аппроксимация ВАХ тремя участками. Решения, полученные для каждого участка, стыкуют, исходя из условия непрерывности (моменты времени t_1 , t_3 и t_4 на рис 5.2).

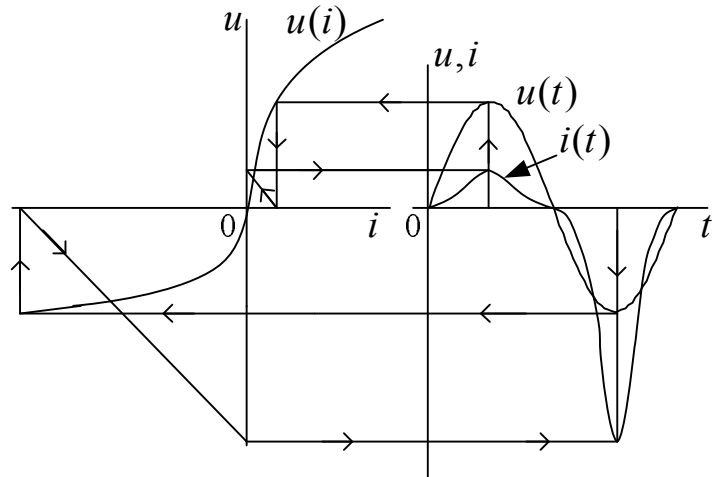


Рис. 5.1. Статическая характеристика безынерционного нелинейного элемента

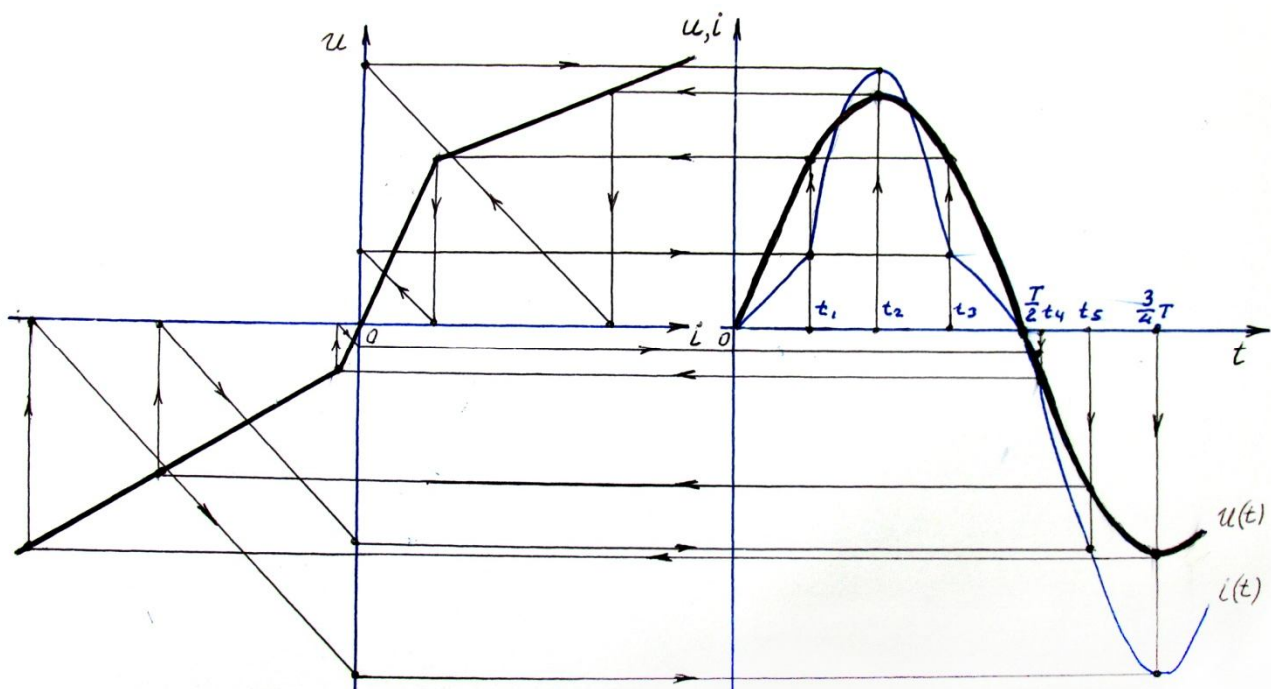


Рис 5.2. Графическое построение $i(t)$

5.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе используют источник синусоидального напряжения из модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и источник регулируемого по величине постоянного напряжения $U = 0...12$ В из блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4**. Измерительные приборы расположены в блоке **ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ**. Элементы электрической цепи R_1 , R_3 выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Для получения зависимостей от времени используют **ОСЦИЛЛОГРАФ**.

1) Собрать цепь по схеме, показанной на рис. 5П.1 протокола измерений. Переключатель **SA1** блока **ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ** в положении « \Rightarrow ».

2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** 0...12 В. Установить напряжение $U = 0$.

4) Плавно изменяя регулятором напряжения ток I от нуля до 90 мА с шагом 10 мА экспериментально получить статическую характеристику нелинейного элемента. Измеренные величины занести в табл. 5П протокола измерений.

5) Изменить полярность подключения входного напряжения. Повторить измерения тока и напряжения. Измеренные величины занести в табл. 5П.

6) Выключить тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

7) Собрать цепь по схеме, показанной на рис. 5П.2. Нелинейный элемент R_1 и линейный резистор $R_3 = 1$ Ом взять из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Переключатель **SA1** блока **ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ** в положении « \sim ».

8) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

9) Включить тумблер **СЕТЬ** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель **Форма** установить в положение \sim . Регулятором **Частота** установить частоту $f = 20 - 28$ Гц. Регулятором **Амплитуда** установить по показаниям **PV1** величину действующего значения напряжения $U = 4 - 7$ В.

10) Включить **ОСЦИЛЛОГРАФ**.

11) Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Настроить переключатель усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана.

12) Подключить **Вход 2** осциллографа к резистору R_3 . Установить инвертирование напряжения на входе 2. Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** (сфотографировать) кривые зависимостей $u(t)$ и $u_{R_3}(t)$. Записать масштабы усиления по напряжению.

13) Утвердить протокол измерений у преподавателя.

14) Выключить тумблер **СЕТЬ** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

5.3. Контрольные вопросы

1) Какие виды аппроксимации характеристик нелинейных элементов вам известны?

2) Что такое кусочно-линейная аппроксимация?

3) Какими преимуществами обладает кусочно-линейная аппроксимация?

5.4. Содержание отчета

- 1) Протокол измерений.
- 2) График ВАХ нелинейного элемента R_1 . ВАХ R_1 , аппроксимированная тремя звеньями ломаной линии.
- 3) Осциллограммы зависимостей $u(t)$ и $u_{R3}(t)$.
- 4) Расчет (аналитический и графический) тока в цепи с нелинейным элементом R_1 с использованием кусочно-линейной аппроксимации ВАХ.
- 5) Расчетная зависимость $i(t)$, полученная в результате аналитического и графического расчета.
- 6) Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей тока, объяснение причин расхождения.
- 7) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 5

Нелинейная резистивная цепь

Схема для измерения ВАХ нелинейного элемента показана на рис. 5П.1.

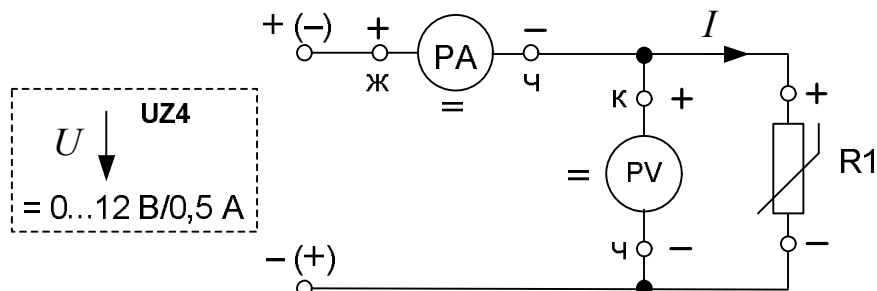


Рис. 5П.1. Схема измерения ВАХ нелинейного элемента

Экспериментальная ВАХ элемента представлена в табл. 5П.

Таблица 5П

При прямой полярности подключения										
I, mA	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U, V										
При обратной полярности подключения										
I, mA	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
U, V										

Схема с нелинейным элементом показана на рис. 5П.2.

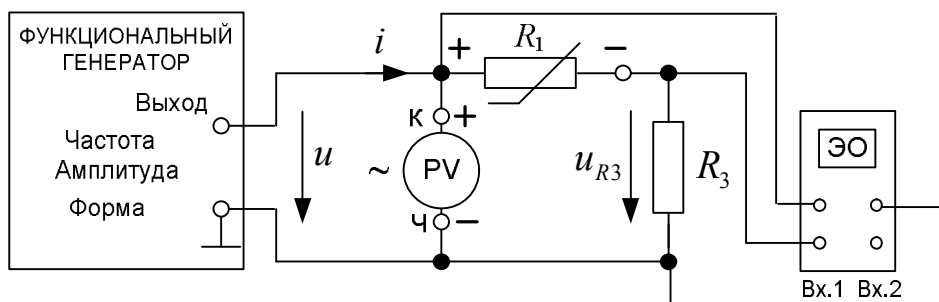


Рис. 5П.2. Схема с нелинейным элементом

Частота $f =$ Гц, сопротивление $R_3 = 1 \text{ Ом}$, $U =$ В, $m_u =$ В/дел,

$m_{u_{R3}} =$ В/дел.

Осциллограмма $u(t)$ и $u_{R3}(t)$ прикреплена к протоколу измерений.

Работу выполнил _____

Работу проверил _____

Лабораторная работа 6

КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Целью работы является экспериментальное определение параметров схемы замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником для основного магнитного потока.

6.1. Общие сведения

При расчетах установившегося периодического процесса несинусоидальный ток в катушке с ферромагнитным сердечником заменяют эквивалентным синусоидальным $i_{\text{эк}} = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Это дает возможность записывать уравнения цепи в комплексной форме и строить векторные диаграммы.

Амплитудное значение эквивалентного синусоидального тока $I_m = \sqrt{2}I$, где I действующее значение несинусоидального тока катушки. Начальная фаза ψ_i определяется из условия сохранения потерь в сердечнике и сопротивлении провода катушки $P = P_{\text{фер}} + I^2 R_k$.

Пренебрегаем магнитным потоком рассеяния. Синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, приложенное к катушке, уравнивает ЭДС самоиндукции от изменения основного магнитного потока и падение напряжения на сопротивлении R_k катушки

$$u = \frac{d\Psi_0}{dt} + iR_k, \quad (6.1)$$

где Ψ_0 – потокосцепление основного магнитного потока Φ_0 (Φ_0 замыкается по материалу сердечника). При $\frac{d\Psi_0}{dt} \gg iR_k$ падением напряжения на R_k можно пренебречь. В этом случае $u = U_m \sin \omega t \approx \frac{d\Psi_0}{dt}$. Тогда потокосцепление

$\Psi_0 = \int u dt = \frac{U_m}{\omega} \sin(\omega t - \pi/2)$, как и напряжение u , является синусоидальным и отстает от напряжения на угол $\pi/2$. Из-за нелинейных свойств катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником ток по форме отличается от синусоиды. Эквивалентный синусоидальный ток отстает от напряжения на угол

$\varphi < \pi/2$ из-за наличия потерь в сердечнике и проводе катушки индуктивности. Из условия сохранения потерь в цепи:

$$UI \cos \varphi = P_{\text{фер}} + I^2 R_{\text{к}}, \quad (6.2)$$

поэтому начальная фаза эквивалентного синусоидального тока $\psi_i = -\varphi$.

Замена несинусоидального тока эквивалентным синусоидальным позволяет экспериментально определить параметры схемы замещения катушки индуктивности R_0 , X_0 (рис. 6.1) или G_0 , B_0 (рис. 6.2). Параметры определяются из физического эксперимента, в котором для заданного напряжения измеряют действующие значения тока I , напряжения U и активную мощность P (рис. 6.3).

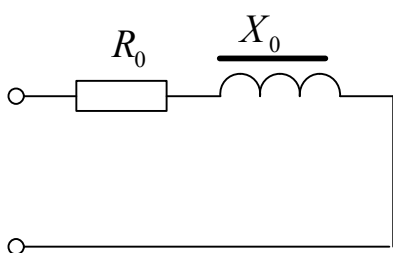


Рис. 6.1. Последовательная схема замещения катушки индуктивности

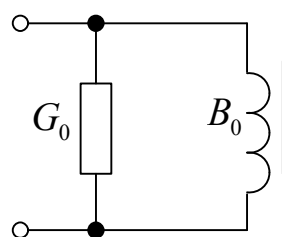


Рис. 6.2. Параллельная схема замещения катушки индуктивности

Параметры R_0 , X_0 , G_0 , B_0 определяются по формулам:

$$Z_0 = \frac{U}{I}; \cos \varphi = \frac{P}{UI}; R_0 = Z_0 \cos \varphi; \quad (6.3)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad (6.4)$$

$$Y_0 = \frac{I}{U}; G_0 = Y_0 \cos \varphi; B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2}. \quad (6.5)$$

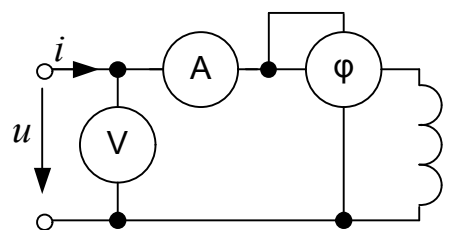


Рис. 6.3. Схема эксперимента

В отличие от линейной цепи величины R_0 , X_0 , G_0 , B_0 зависят от напряжения, приложенного к катушке.

6.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуют катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Источником синусоидального напряжения частотой $f = 50$ Гц является **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ3**. Измерительные приборы модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.

1) Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 6П протокола измерений.

2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Включить выключатель **QF** модуля питания и тумблер **SA2** источника **UZ3**. Установить на входе цепи напряжение $U = 3$ В.

4) Измерить действующее значение тока I , угол сдвига фаз φ . Данные занести в протокол измерений.

5) Выполнить измерения при напряжениях $U = 4, 5, 6$ В. Данные занести в протокол измерений.

6) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

7) Выключить тумблеры **СЕТЬ** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и выключатель **QF** модуля питания.

6.3. Контрольные вопросы

1) Как по заданным значениям R и X последовательной схемы замещения катушки индуктивности получить значения G и B для параллельной схемы замещения?

2) Как по заданным значениям G и B параллельной схемы замещения катушки индуктивности получить значения R и X для последовательной схемы замещения?

3) Как по известным значениям φ , U и I определить параметры последовательной схемы замещения катушки R_0 и X_0 и параллельной схемы замещения G_0 и B_0 ?

6.4. Содержание отчета

1) Протокол измерений

2) Схемы замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником с параметрами R_0 , X_0 и G_0 , B_0 .

3) Расчет параметров последовательной Z_0 , R_0 , X_0 и параллельной Y_0 , G_0 , B_0 схем замещения катушки с ферромагнитным сердечником с использованием экспериментальных данных. Рассчитанные значения занести в таблицу 6.1.

4) Графики зависимостей параметров элементов схемы R_0 , X_0 , G_0 , B_0 от величины приложенного напряжения.

5) Векторные диаграммы напряжений и токов для последовательной и параллельной схем замещения катушки для напряжения $U = 5$ В.

6) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 6

Схема замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником

Схема замещения электрической цепи представлена на рис. 6П.

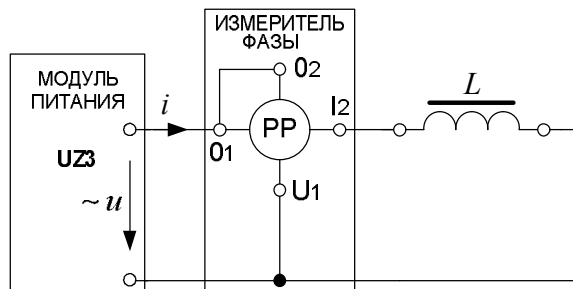


Рис. 6П. Схема измерений

Экспериментальные и расчетные данные представлены в табл. 6П.

Таблица 6П

	$U = 3 \text{ В}$	$U = 4 \text{ В}$	$U = 5 \text{ В}$	$U = 6 \text{ В}$
$I, \text{ мА}$				
$\varphi, \text{ град.}$				
$\cos \varphi$				
$\sin \varphi$				
$Z_0 = \frac{U}{I}, \text{ Ом}$				
$R_0 = Z_0 \cos \varphi, \text{ Ом}$				
$X_0 = Z_0 \sin \varphi, \text{ Ом}$				
$Y_0 = \frac{I}{U}, \text{ См}$				
$G_0 = Y_0 \cos \varphi, \text{ См}$				
$B_0 = Y_0 \sin \varphi, \text{ См}$				

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Целью работы является экспериментальное получение характеристик для действующих значений напряжения и тока в нелинейной цепи при питании ее от источника синусоидального напряжения и исследование явления феррорезонанса напряжений.

7.1. Общие сведения

В лабораторной работе исследуется цепь с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. При расчетах напряжений и токов установившегося периодического режима в этой цепи используется метод эквивалентных синусоид. Пренебрегая потоками рассеяния, примем схему замещения катушки в виде последовательного соединения активного сопротивления R и нелинейной индуктивности L . Тогда схема замещения исследуемой цепи примет вид, показанный на рис. 7.1.

Согласно принятым допущениям можно определить реактивное сопротивление катушки

$$X_L(I) = U_L(I)/I. \quad (7.1)$$

Зависимость $U_L(I)$ является нелинейной функцией тока I (рис. 7.2). Тогда зависимость $X_L(I)$ также нелинейная функция тока.

Изменяя величину входного напряжения, можно получить ток $I = I_0$, при котором

$$X_L(I_0) = X_C(I_0) \quad (7.2)$$

и, следовательно, $U_{L0} = U_{C0}$.

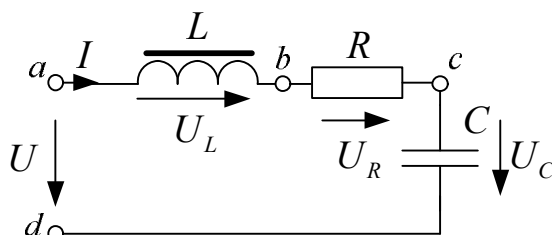


Рис. 7.1. Схема замещения исследуемой цепи

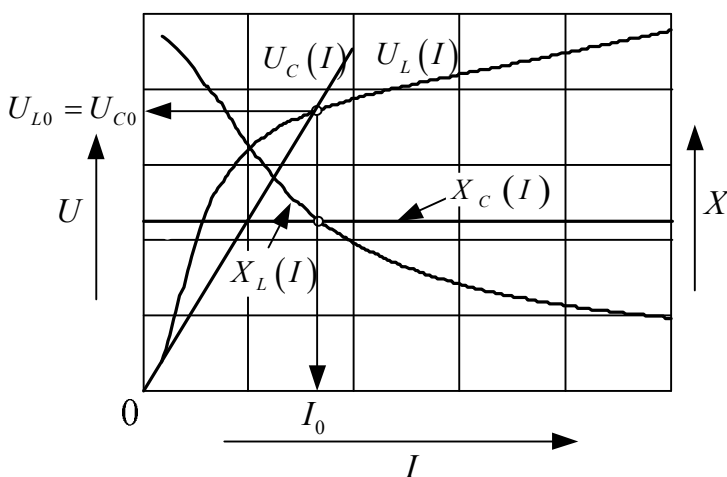


Рис. 7.2. Зависимости $U(I)$ и $X(I)$

В цепи возникает *резонанс*. В отличие от линейной цепи, состояние резонанса в цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора достигается *изменением величины приложенного напряжения*. Это явление называется *феррорезонансом напряжений*.

На рис. 7.3 показана векторная диаграмма напряжений цепи, приведенной на рис. 7.1. На основе этой диаграммы получены соотношения, связывающие токи и напряжения исследуемой цепи:

$$U_L(I) = \sqrt{(U_{RL}(I))^2 - (IR)^2}; \quad (7.3)$$

$$U_{LC}(I) = |U_L(I) - IX_C|; \quad (7.4)$$

$$U(I) = \sqrt{(U_{LC}(I))^2 + (IR)^2}. \quad (7.5)$$

График зависимости $U(I)$ показан на рис. 7.4. Участок 2-4 кривой $U(I)$ обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением и поэтому является неустойчивым. При изменении входного напряжения возникают скачкообразные изменения тока (на рис. 7.4 от точки 2 к 3 и от точки 4 к 1).

Режим феррорезонанса соответствует точке 4 кривой $U(I)$. В этом режиме входное сопротивление цепи активное $R = U_0 / I_0$.

7.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуется нелинейная цепь с последовательным соединением катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Источником синусоидального напряжения частотой $f = 50$ Гц является **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ3**. Измерения выполняются приборами из блока **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**. Катушка с ферромагнитным сердечником расположена в модуле **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**, конденсатор – в модуле **РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Рекомендуемая величина емкости C – 47 или 57 мкФ.

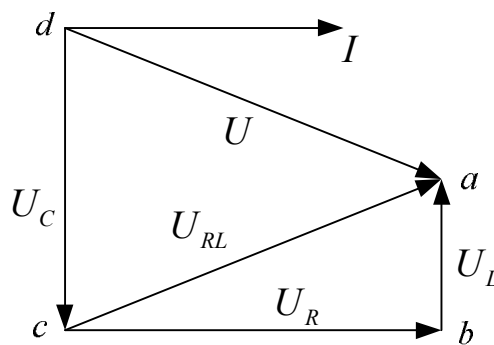


Рис. 7.3. Векторная диаграмма напряжений исследуемой цепи

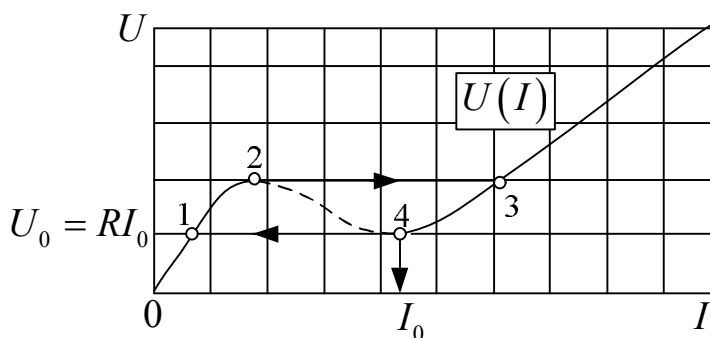


Рис. 7.4. График зависимости $U(I)$

1) Собрать электрическую цепь, показанную на рис. 7П протокола измерений.

2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

3) Включить автоматический выключатель **QF** модуля питания и тумблер **SA2** источника **UZ3**. Установить на входе цепи напряжение $U = 0$.

4) Плавно *увеличивая* величину приложенного напряжения, получить зависимость $U(I)$. Обязательно зафиксировать напряжение, при котором происходит скачкообразное увеличение тока. Данные занести в табл. 7П.1 протокола измерений.

5) Плавно *уменьшая* величину приложенного напряжения, получить зависимость $U(I)$. Обязательно зафиксировать напряжение на входе, при котором происходит скачкообразное уменьшение тока. Данные занести в табл. 7П.2. Выполнить расчеты, приведенные в протоколе измерений.

6) Закоротить участок цепи с конденсатором. Плавно *увеличивая* величину приложенного напряжения, получить зависимости напряжения $U_{RL}(I)$ и активной мощности $P_{RL}(I)$. Данные занести в табл. 7П.2.

7) Протокол измерений утвердить у преподавателя.

8) Выключить тумблер **SA2** и выключатель **QF** модуля питания.

7.3. Контрольные вопросы

1) В чем заключается явление феррорезонанса напряжений?

2) Объяснить, почему явление скачка тока в феррорезонансной цепи называют опрокидыванием фазы?

3) Чем явление феррорезонанса отличается от резонанса в линейной цепи?

4) Чем объясняется наличие скачка тока при изменении приложенного напряжения?

5) Как выглядит векторная диаграмма напряжений при феррорезонансе напряжений и учёте потерь в катушке?

7.4. Содержание отчета

1) Протокол измерений.

2) Расчет зависимости $R(I) = \frac{P_{RL}}{I^2}$. Результаты расчета записать в табл.

7П.2. Используя экспериментальную характеристику $U_{RL}(I)$ катушки индуктивности и рассчитанную зависимость $R(I)$, рассчитать зависимости $U_R(I) = IR$ и $U_L(I) = \sqrt{U_{RL}^2 - (IR)^2}$. Рассчитать зависимости $U_C(I) = IX_C$, $U_{LC}(I) = |U_L(I) - IX_C|$ и $U(I) = \sqrt{(IR)^2 + (U_{LC})^2}$. Результаты расчета привести в табл. 7П. 2.

3) На одном поле графика построить зависимости: $U(I)$ – по данным табл. 7П.1 (экспериментальную) и расчетные $U_L(I)$, $U_C(I) = X_C I$, $U(I)$ – по данным табл. 7П.2.

4) Диаграмма напряжений по данным табл. 7П.2 для тока, наиболее близкого к резонансному.

5) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 7

Явление феррорезонанса напряжений

Схема исследуемой цепи показана на рис. 7П.

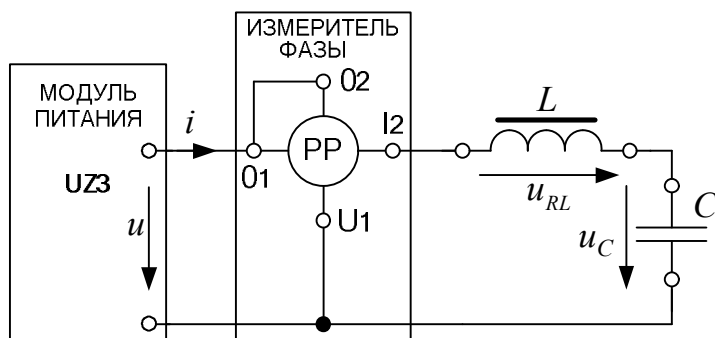


Рис. 7П. Схема исследуемой цепи

Экспериментальные ВАХ цепи при увеличении и при уменьшении напряжения представлены в табл. 7П.1.

Таблица 7П.1

При увеличении напряжения								
$I, \text{мА}$	0							
$U, \text{В}$	0							
При уменьшении напряжения								
$I, \text{мА}$								0
$U, \text{В}$								0

Частота $f = \underline{\hspace{1cm}}$ Гц. Емкость $C = \underline{\hspace{1cm}}$ мкФ. $X_C = 1/2\pi fC = \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом.

Таблица 7П.2

Экспериментальные и расчетные зависимости $U_{RL}(I)$, $P_{RL}(I)$

$I, \text{мА}$	0							
$U_{RL}, \text{В}$	0							
$P_{RL}, \text{Вт}$	0							
$R, \text{Ом}$	—							
$U_R = RI$	0							
$U_C = X_C I$	0							
$U_L, \text{В}$	0							
$U_{LC}, \text{В}$	0							
$U, \text{В}$	0							

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

Лабораторная работа 8

ПОТЕРИ В СЕРДЕЧНИКАХ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью работы является выполнение опытов по разделению ферромагнитных потерь на гистерезис и на вихревые токи.

8.1. Общие сведения

Потери в катушке с сердечником из ферромагнитного материала состоят из потерь в обмотке катушки P_m и потерь в сердечнике $P_{\text{фер}}$. Потери в ферромагнитных материалах состоят из потерь на гистерезис и на вихревые токи. При амплитудах магнитной индукции в сердечнике катушки порядка $B_m = 1,6 - 1,8$ Тл в объеме V на частоте f мощности потерь на гистерезис $P_{\Gamma} = \eta B_m^2 f V$ и на вихревые токи $P_B = \xi B_m^2 f^2 V$. Таким образом, мощность ферромагнитных потерь

$$P_{\text{фер}} = P_{\Gamma} + P_B = \eta B_m^2 f V + \xi B_m^2 f^2 V = k_{\Gamma} f + k_B f^2, \quad (8.1)$$

где $k_{\Gamma} = \eta B_m^2 V$ и $k_B = \xi B_m^2 V$ – коэффициенты, зависящие от свойств сердечника.

Из последнего уравнения следует, что можно экспериментально разделить $P_{\text{фер}}$ на частоте f на P_{Γ} и P_B . Для этого необходимо выполнить измерения мощности при одинаковой магнитной индукции B_m на двух частотах f_1 и f_2 .

При синусоидальном магнитном потоке и $R \rightarrow 0$ действующее значение напряжения $U = 4,44 B_m S f w$, где S – площадь поперечного сечения магнитопровода, w – число витков в катушке. Для выполнения условия $B_{m1} = B_{m2} = B_m$, напряжения и частоты в опытах должны удовлетворять соотношению

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{B_{m1} f_1}{B_{m2} f_2} \text{ или } \frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (8.2)$$

Для определения коэффициентов k_{Γ} и k_B выполняют два эксперимента по схеме, показанной на рис. 8.1.

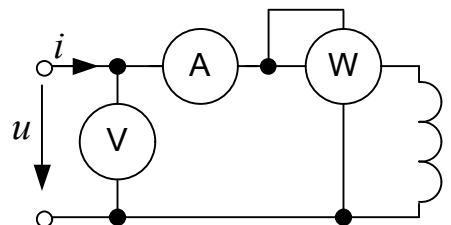


Рис. 8.1. Схема измерений

8.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуют катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**.

Источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Измерительные приборы расположены в модуле **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**. Сопротивление провода катушки индуктивности измеряют мультиметром из **МОДУЛЯ МУЛЬТИМЕТРОВ**.

- 1) Собрать электрическую цепь по схеме рис. 8П.1 протокола измерений.
- 2) Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- 3) Включить автоматический выключатель **QF** модуля питания.
- 4) Включить тумблер **СЕТЬ** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель **Форма** установить в положение \sim . Регулятором **Частота** установить частоту $f_1 = 40$ Гц. Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения напряжения $U_1 = 4-5$ В.
- 5) Измерить активную мощность P и ток I . Данные занести в табл. 8П.1.
- 6) Повторить измерения мощности при частотах $f_2 = 50$ Гц и $f_3 = 60$ Гц. Величины напряжений должны быть равны $U_2 = U_1 f_2 / f_1$ и $U_3 = U_1 f_3 / f_1$, соответственно. Данные занести в табл. 8П.1.
- 7) Измерить сопротивление провода катушки индуктивности мультиметром. Данные занести в табл. 8П.1.
- 8) Выполнить расчеты, приведенные в протоколе измерений.
- 9) Протокол измерений утвердить у преподавателя.
- 10) Выключить тумблеры **СЕТЬ** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и автоматический выключатель **QF** модуля питания.

8.3. Контрольные вопросы

- 1) На какие составляющие можно разложить потери в катушке индуктивности с ферромагнитным сердечником?
- 2) Из чего состоят потери в ферромагнитном сердечнике?
- 3) Как зависят от частоты потери на гистерезис и вихревые токи?
- 4) В каком соотношении должны быть напряжения и частоты для выполнения условия $B_m = const$?

8.4. Содержание отчета

1) Протокол измерений.

2) Расчет коэффициентов $k_B = \frac{P_{\text{фер}1}/f_1 - P_{\text{фер}2}/f_2}{f_1 - f_2}$, $k_\Gamma = P_{\text{фер}1}/f_1 - k_B f_1$.

3) Разделение потерь в сердечнике на потери от вихревых токов и потери на гистерезис. Представление результатов расчета в таблице 8П.

4) Расчет потерь на частоте $f_3 = 60$ Гц $P_{\text{фер}} = k_\Gamma f_3 + k_B f_3^2$, сравнение с экспериментом, объяснение расхождений.

5) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 8 Потери в сердечниках из ферромагнитных материалов»

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 8П.1.

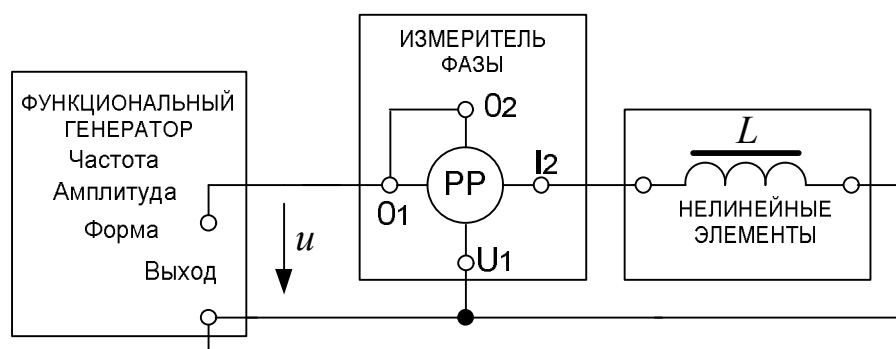


Рис. 8П.1. Схема исследуемой цепи

Экспериментальные и расчетные данные представлены в табл. 8П

Таблица 8П

Эксперимент	1	2	3
f , Гц	40	50	60
U , В			
I , мА			
P , Вт			
$P_m = I^2 R_m$, Вт			
$P_{\text{фер}} = P - P_m$, Вт			
$P_{\Gamma} = k_{\Gamma} f$, Вт			
$P_B = k_B f^2$, Вт			

Проверка отношений $\frac{f_2}{f_1} =$; $\frac{U_2}{U_1} =$; $\frac{f_3}{f_1} =$; $\frac{U_3}{U_1} =$.

Сопротивление провода катушки индуктивности, измеренное мультиметром: $R_m =$ ____ Ом.

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ц е л ь р а б о т ы: исследование процессов в цепи с полупроводниковым диодом и катушкой индуктивности при синусоидальном входном напряжении, а также расчет тока в установившемся режиме с использованием кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики диода.

9.1. Общие сведения

В работе исследуется установившийся режим цепи, содержащей диод и индуктивную катушку, при синусоидальном приложенном напряжении (рис. 9.1, а).

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода при использовании кусочно-линейной аппроксимации может быть представлена двумя линейными участками – 1 и 2 (рис. 9.1, б). Для идеального диода характерно то, что на участке 1 ($i > 0, u_d = 0$) его сопротивление $r_1 = 0$, а на участке 2 ($i = 0, u_d < 0$) сопротивление $r_2 = \infty$, что соответствует идеальному ключу.

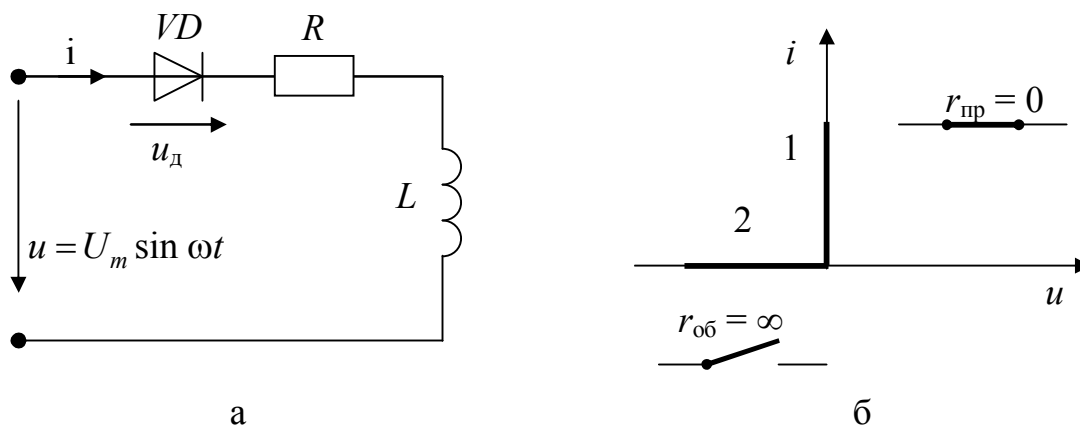


Рис. 9.1. Схема цепи с идеальным диодом (а) и ВАХ диода (б)

Уравнение электрического состояния цепи (см. рис. 9.1, а) имеет вид:

$$u_d + Ri + L \frac{di}{dt} = u. \quad (9.1)$$

Принятая аппроксимация ВАХ двумя линейными отрезками делит период приложенного напряжения T на два интервала:

$[0; t_1]$ – диод открыт, проводит ток (первый интервал);

$[t_1; T]$ – диод закрыт, цепь разорвана (второй интервал).

Уравнение (9.1) при этом распадается на две части.

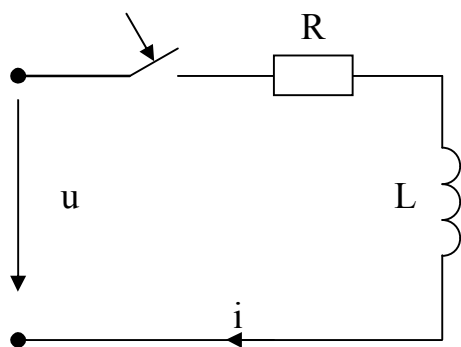


Рис. 9.2. Эквивалентная расчетная схема для первого интервала

Первому интервалу соответствуют схема, приведенная на рис. 9.2, и дифференциальное уравнение

$$Ri + L \frac{di}{dt} = U_m \sin \omega t. \quad (9.2)$$

Начало интервала $t = 0$ определяется моментом прохождения $u(t)$ через нуль в сторону положительных значений.

Решая уравнение (9.2) классическим методом, получим:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = I_m \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (9.3)$$

Из начальных условий при $t = 0+$ и закона коммутации для тока в индуктивности $i_L(0+) = i_L(0-) = 0$ имеем $A = I_m \sin \varphi$, где

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \quad (9.4)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}. \quad (9.5)$$

Окончательное решение для тока имеет вид:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi) + I_m \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (9.6)$$

Конец интервала $t = t_1$ соответствует равенству тока $i(t_1)$ нулю.

Решить трансцендентное уравнение

$$i(t_1) = I_m \left[\sin(\omega t_1 - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t_1} \right] = 0 \quad (9.7)$$

можно графически путем сложения принужденной и свободной составляющих тока (рис. 9.3):

$t_0 = \frac{\varphi}{\omega}$ – время, соответствующее начальной фазе φ принужденной

составляющей тока;

$T = 1/f$ – период приложенного напряжения.

В момент $t_1 > \frac{T}{2}$ отрицательное напряжение на входе $u(t_1)$ закрывает диод.

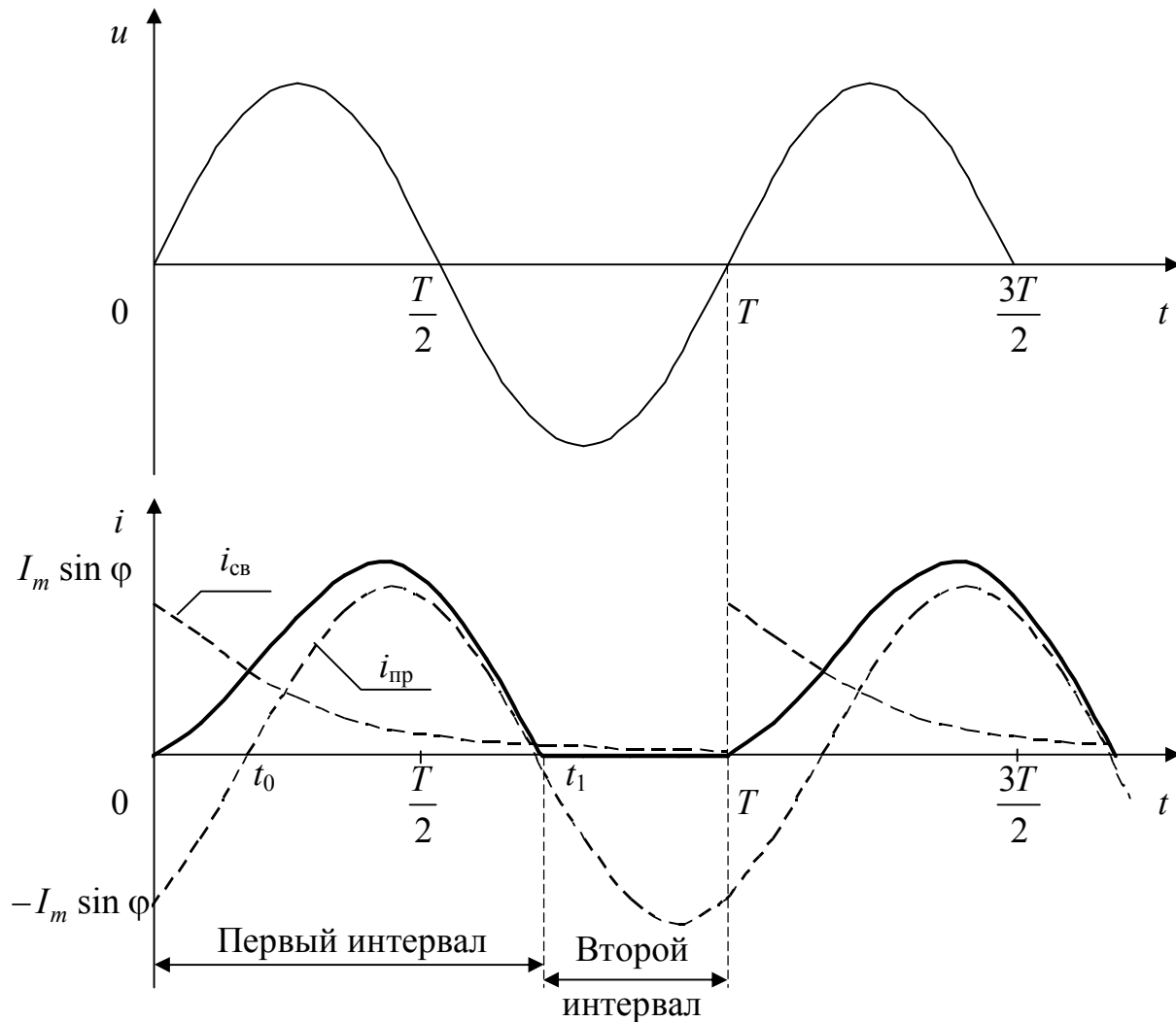


Рис. 9.3. Графики напряжения и тока в цепи с диодом

На втором интервале $[t_1; T]$ $i=0$ (участок 2) уравнение электрического состояния согласно выражению (9.1) имеет вид:

$$u_d = u. \quad (9.8)$$

Заканчивается второй интервал в момент $t = T$, и далее процесс повторяется в каждом периоде. Имеет место установившийся (периодический) процесс.

9.2. Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуется цепь с полупроводниковым диодом $VD1$ и линейным резистором R_2 из блока **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**, катушкой индуктивности L из **МОДУЛЯ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**. Источником синусоидального напряжения служит модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Зависимости $u(t)$, $u(i)$ получают с помощью осциллографа. Сопротивления R_K и R_2 измеряют омметром из **МОДУЛЯ МУЛЬТИМЕТРОВ**, напряжение – вольтметром $PV1$ блока **ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ**.

1) Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9П.1.

Переключатель модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить в положение « ~ 10 В». По указанию преподавателя установить напряжение на выходе генератора $U = 5 - 8$ В, частоту $f = 200 - 600$ Гц, $L = 40 - 100$ мГн. Напряжение на Вх. 2 осциллографа необходимо инвертировать.

При выключенной развертке получить зависимость $i(u)$ – ВАХ полупроводникового диода.

2) Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9П.2. Зафиксировать зависимости $u(t)$ и $u_{R2}(t)$, пропорциональную току $i(t)$.

3) Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9П.3. Зафиксировать зависимости $u(t)$ и $u_{R2}(t)$, записать в протокол измерений масштабные коэффициенты m_u , $m_{u_{R2}}$, определить амплитуду входного напряжения U_m . Выключить **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Омметром из блока **МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ** измерить R_K и R_2 . Значения U_m , f , L , R_K и R_2 занести в протокол измерений.

9.3. Контрольные вопросы

1) Как изменится аппроксимированная характеристика диода (см. рис. 9.1, б), если $r_{np} \neq 0$?

2) Как в этом случае запишется уравнение (9.1)?

- 3) Почему первый интервал $[0; t_1]$ не равен второму $[t_1; T]$ (см. рис. 9.3)?
- 4) Можно ли регулировать длительность проводящего интервала?
- 5) Изобразить график тока $i(t)$ для случая $L = 0$.

9.4. Содержание отчета

1) Протокол измерений.

2) Осциллограммы $i(u)$ диода $VD1$; $u(t)$ и $u_{R2}(t)$ в цепи с диодом $VD1$ и резистором R_2 ; $u(t)$ и $u_{R2}(t)$ в цепи с диодом $VD1$, катушкой индуктивности L и резистором R_2 .

3) По значениям U_m (измеренному осциллографом), f , L , $R = R_K + R_2$ рассчитать $i(t)$ на проводящем интервале, построить зависимость $i(t)$, определить длительность проводящего интервала t .

4) Сравнить график $i(t)$ с осциллограммой $u_{R2}(t)$.

5) Ответы на контрольные вопросы.

Протокол измерений к лабораторной работе 9

«Периодический процесс в нелинейной цепи переменного тока»

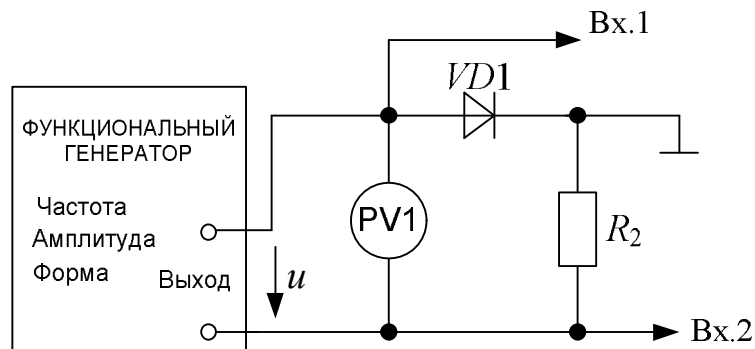


Рис. 9П.1. Получение ВАХ диода

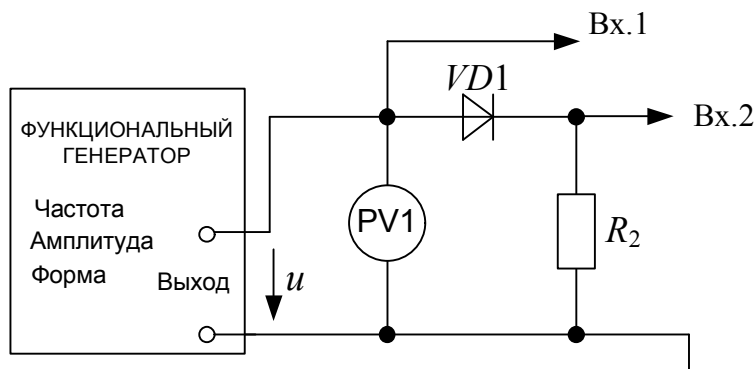


Рис. 9П.2. Получение зависимостей $u(t)$ и $i(t)$ в цепи с диодом и линейным резистором

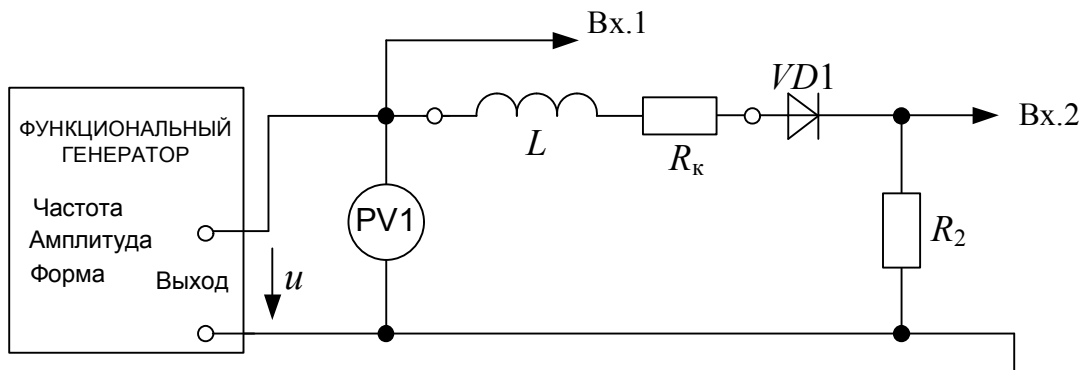


Рис. 9П.3. Получение зависимостей $u(t)$ и $i(t)$ в цепи с диодом и катушкой индуктивности

$U_m =$ _____ В; $f =$ _____ Гц; $L =$ _____ мГн; $R_k =$ _____ Ом; $R_2 =$ _____ Ом.

Работу выполнил: _____

Работу проверил: _____

Библиографический список

1. Теоретические основы электротехники: Учебник: В 3 т. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман и др. СПб: Питер, 2004. Т.2. 432 с.
2. Четырехполюсники: Методические указания для самостоятельной работы студентов / А. Г. Зверев, А. А. Рублева, А. Ю. Тэттэр, В. Ю. Тэттэр; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2010. 37 с.
3. Электрические цепи с распределенными параметрами: Учебное пособие / А. А. Комяков, Н. В. Пашкова, А. В. Пономарев, А. Ю. Тэттэр; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. 71 с.
4. Нелинейные цепи: Учебное пособие / А. Г. Зверев, Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, А. Ю. Тэттэр; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. 86 с.
5. Теория электрических цепей: Методические указания к проведению лабораторных работ / В. Н. Непалов, В. И. Сафонов, В. В. Шуляков; Челябинск: Учтех-Профи, 2013. 113 с.

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович,
ПОНОМАРЕВ Антон Витальевич,
ТЭТТЭР Александр Юрьевич
ТЭТТЭР Владимир Юрьевич

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
Часть 3

Редактор Н. А. Майорова
Корректор И. А. Сенеджук

Подписано в печать 2016. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. . . . Уч.-изд. л. . . .
Тираж 500 экз. Заказ

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35