

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

Кафедра общей электротехники

Т. М. Черникова

## **ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

**Методические указания к лабораторным занятиям  
для студентов всех форм обучения**

Рекомендованы учебно-методической комиссией специализации  
21.05.04.10 «Электрификация и автоматизация горного  
производства» в качестве электронного издания  
для использования в учебном процессе

Кемерово 2017

## Рецензенты

Дабаров В. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры общей электротехники

Буялич Г. Д. – доктор технических наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, председатель учебно-методической комиссии специализации 21.05.04.10 «Электрификация и автоматизация горного производства»

### **Черникова Татьяна Макаровна**

**Теория электрических цепей:** метод. указания к лабораторным занятиям [Электронный ресурс]: для студентов направления подготовки 21.05.04 «Горное дело», образовательная программа «Электрификация и автоматизация горного производства», всех форм обучения / Т. М. Черникова; КузГТУ. – Кемерово, 2017.

В работе предлагается студентам самостоятельно рассмотреть и решить вопросы подготовки к выполнению, оформлению и защите лабораторных работ по электрическим цепям. Даны краткие теоретические положения, облегчающие подготовку к занятиям, методические указания по выполнению и оформлению отчетов к лабораторным работам, ссылки на литературу.

© КузГТУ, 2017

© Черникова Т. М., 2017

## ОСНОВНОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

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

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

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

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

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

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

В качестве нагрузок на стенде используются три переменных резистора  $R1$  –  $R3$ , максимальное сопротивление которых составляет 10 кОм, три постоянных резистора  $R4$  –  $R6$  и нелинейное сопротивление  $R7$ , катушка переменной индуктивности  $L1$ , катушки со взаимной индукцией  $L2$ ,  $L3$  и  $L4$ ,  $L5$ , а также группы конденсаторов  $C1$  и  $C2$

– батареи параллельно подключаемых конденсаторов, емкость которых изменяется с помощью тумблеров SA1–SA12.

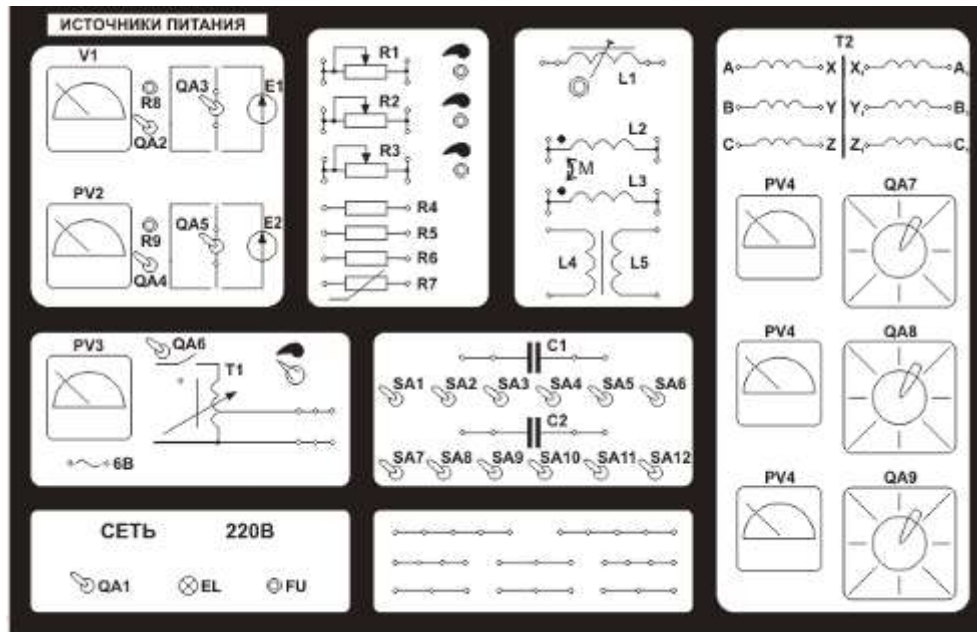


Рисунок 1. Лицевая панель универсального стенда № 1

Максимальный ток через нагрузку не должен превышать 300 мА.

Для обеспечения возможности параллельных соединений на стенде предусмотрены общие шины.

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

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

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

У ваттметра имеются две обмотки и четыре зажима. Два из них, отмеченные звездочками, называются генераторными. При измерении активной мощности эти зажимы включаются в один

узел. Второй зажим токовой обмотки подключается последовательно, а обмотки напряжения – параллельно измеряемому участку электрической цепи.

Цена деления ваттметра определяется по формуле

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

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

## ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

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

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

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

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

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

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

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

Показания приборов в соответствии с порядком выполнения работы записываются в таблицы рабочей тетради.

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

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

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

## **ПРАВИЛА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

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

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

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

Исходя из сказанного, следует руководствоваться следующими правилами безопасности:

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

## Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

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

### *Основные теоретические положения*

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

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

$$u_c = E \left( 1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (1.1)$$

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}, \quad (1.2)$$

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

При разрядке конденсатора на активное напряжение

$$u_c = U_c(0) e^{-t/\tau}, \quad (1.3)$$

$$i = -\frac{U_c(0)}{R} e^{-t/\tau}, \quad (1.4)$$

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

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

В случае периодического переходного процесса собственная



частота колебательного контура определяется по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}. \quad (1.5)$$

Переходный процесс характеризуется также коэффициентом затухания  $b = \frac{R}{2L}$  и декрементом затухания  $\Delta = \frac{i(t)}{i(t+T)} = e^{-bT_0}$ , где  $T_0$  – период затухающих колебаний.

Ток в цепи определяется выражением:

$$i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} e^{-bt} \sin(\omega_0 t). \quad (1.6)$$

### Задание для самостоятельной подготовки

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

### Порядок выполнения работы

Данная работа выполняется на стенде № 2.

1. Соберите цепь по схеме рис. 1.1.
2. Включите с помощью ручного коммутатора  $K1$  цепь с заданными преподавателем параметрами  $R1$  и  $C1(C4)$  на постоянное напряжение  $U$  четырехполюсника  $\Pi 2$  и снимите зависимость  $u_c = f(t)$ . Опытные данные занесите в табл. 1.1.
3. Зная входное напряжение  $R$ -,  $C$ -цепи  $U$  и напряжение  $u_c$ , рассчитайте переходные значения напряжения на активном элементе  $R1$   $u_R$ , зарядный ток  $i_{зар}$ , а также постоянную времени  $\tau = RC$ . Расчетные данные занесите в табл. 1.1.
4. Постройте совмещенные графики зависимостей  $u_c$ ,  $i_{зар}$ ,  $u_R = f(t)$ . Определите графически постоянную  $\tau$ .

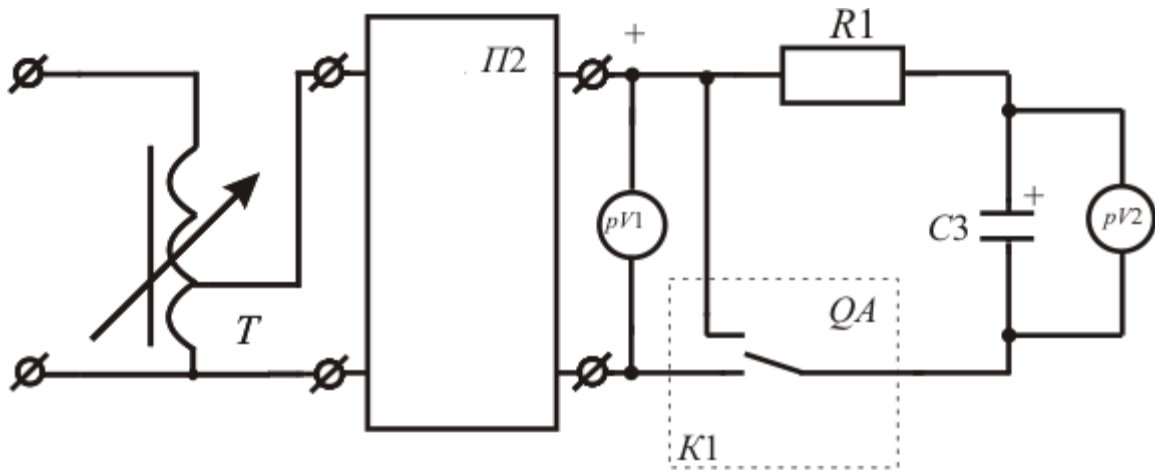


Рисунок 1.1

Таблица 1.1

Измерено			Вычислено		
$U, \text{В}$	$u_c, \text{В}$	$t, \text{с}$	$U_R, \text{В}$	$i_{зар}, \text{А}$	$\tau, \text{с}$

5. Закоротите конденсатор на активное сопротивление  $R1$ , переключив контакты  $QA$ . При зарядке конденсатора снимите зависимость  $u_c = f(t)$ . Опытные данные занесите в табл. 1.2.

6. Рассчитайте переходные значения  $u_R$  и  $i_{раз}$  и занесите их в табл. 1.2.

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

Таблица 1.2

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

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

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

рядке и разрядке конденсатора.

10. Соберите цепь по схеме рис. 1.2, содержащую автоматический коммутатор  $K2$ , который должен производить поочередное подключение конденсатора  $C1$  либо на постоянное напряжение моста  $П2$ , либо к разрядному сопротивлению  $R2$ . Напряжение, пропорциональное току переходного процесса  $i$  при подключении конденсатора  $C1$  на постоянное напряжение, с шунта  $Z2$  подается на пластины осциллографа.

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

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

13. Определите из кривых  $i = f(t)$  период затухающих колебаний  $T$  и угловую частоту  $\omega_0$ , рассчитайте декремент затухания  $\Delta$ .

14. Для выбранного значения  $R1$  теоретически рассчитайте  $i = f(t)$  по формуле (1.6) и величину  $\Delta$ .

Коэффициент затухания можно определить по формуле

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

Величина  $L1$  задается преподавателем, активные сопротивления необходимо измерить омметром. Постройте график теоретической зависимости  $i = f(t)$ .

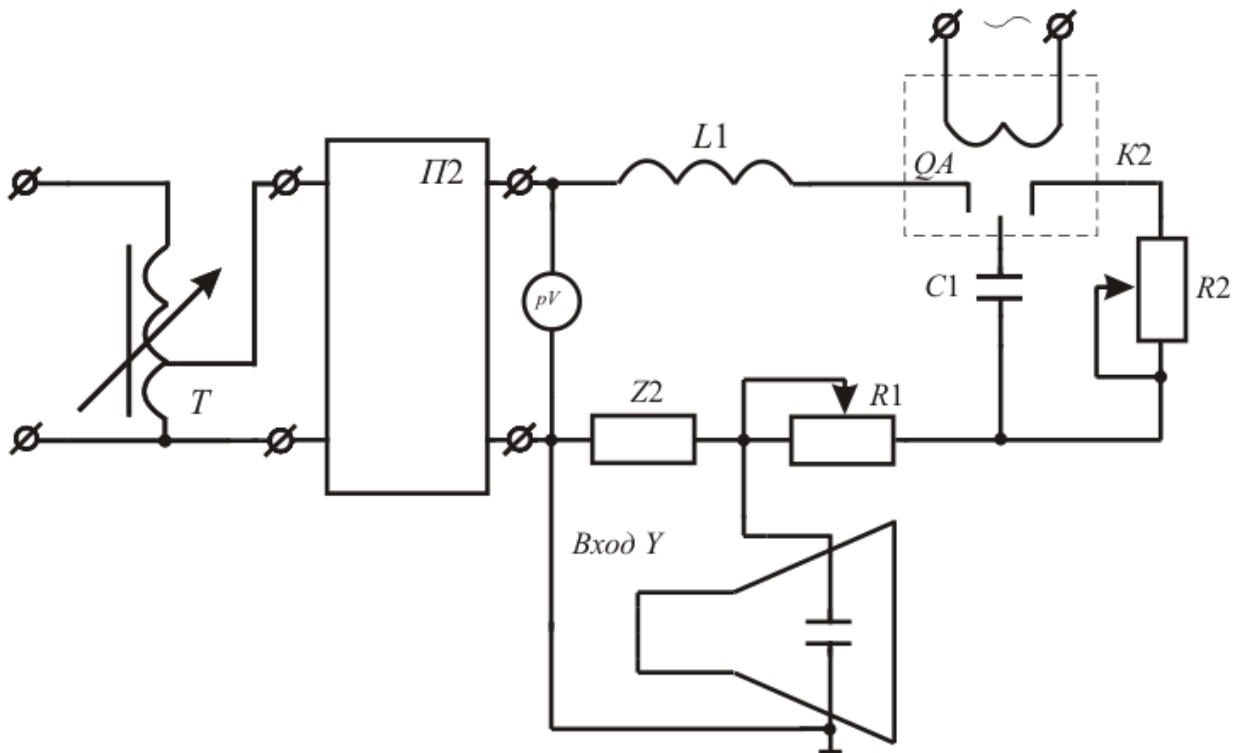


Рисунок 1.2

Литература: [1], § 8.1–8.21; [2], § 14.1–14.8; [8], § 3.1–3.6.

## Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

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

### Основные теоретические положения

Пассивный четырехполюсник, схема которого приведена на рис. 2.1, имеет два первичных (входных) зажима – 1 и 1' и два вторичных (выходных) – 2 и 2'.

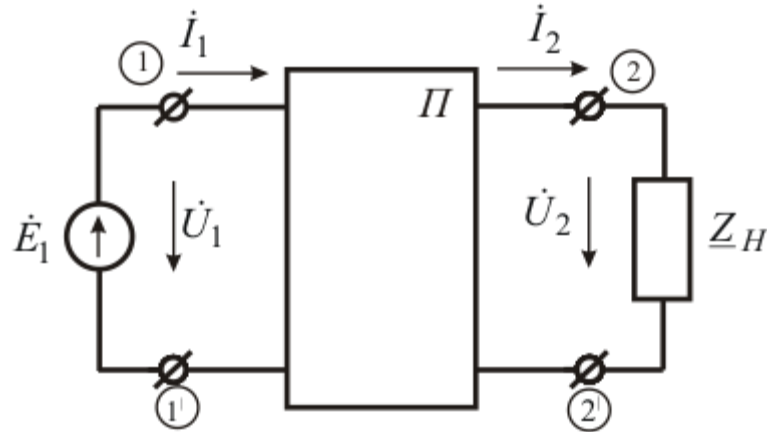


Рисунок 2.1

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

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{cases} \quad (2.1)$$

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

Для симметричного четырехполюсника  $A = D$ .

Первичные параметры можно определить с помощью сопротивлений холостого хода ( $\underline{Z}_0$ ) и короткого замыкания ( $\underline{Z}_K$ )

$$A = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{20} - \underline{Z}_{2K}}}; \quad (2.2)$$

$$B = A\underline{Z}_{2K}; \quad (2.3)$$

$$C = \frac{A}{\underline{Z}_{10}}; \quad (2.4)$$

$$D = A \frac{\underline{Z}_{20}}{\underline{Z}_{10}}, \quad (2.5)$$

где индекс «1» относится к сопротивлениям, определяемым при прямом питании четырехполюсника, индекс «2» – для обратного

питания (питание со стороны зажимов 2–2').

На рис. 2.2 и рис. 2.3 изображены соответственно  $T$ - и  $\Pi$ -образные схемы замещения четырехполюсника.

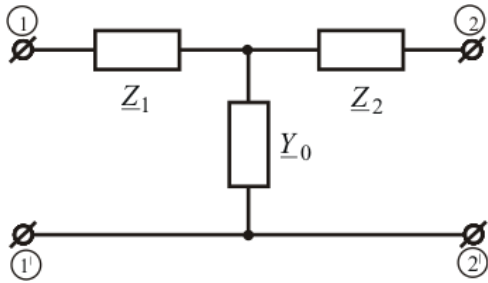


Рисунок 2.2

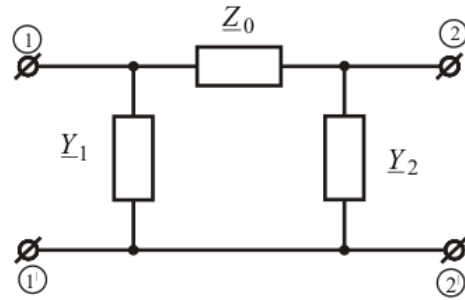


Рисунок 2.3

Параметры схем замещения могут быть определены через первичные параметры по формулам

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

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

Входное сопротивление четырехполюсника при прямом питании можно определить по формуле

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{A\underline{Z}_н + B}{C\underline{Z}_н + D} \quad (2.6)$$

### Задание для самостоятельной подготовки

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

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

### Порядок выполнения работы

1. На лабораторном стенде № 2 соберите цепь по схеме рис. 2.4 при прямом питании четырехполюсника. Пассивный четырехполюсник собирается по  $T$ - или  $\Pi$ -образной схеме из элементов, заданных преподавателем.

2. Прodelайте опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны зажимов 2–2'. Данные опытов занесите в табл. 2.1.

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

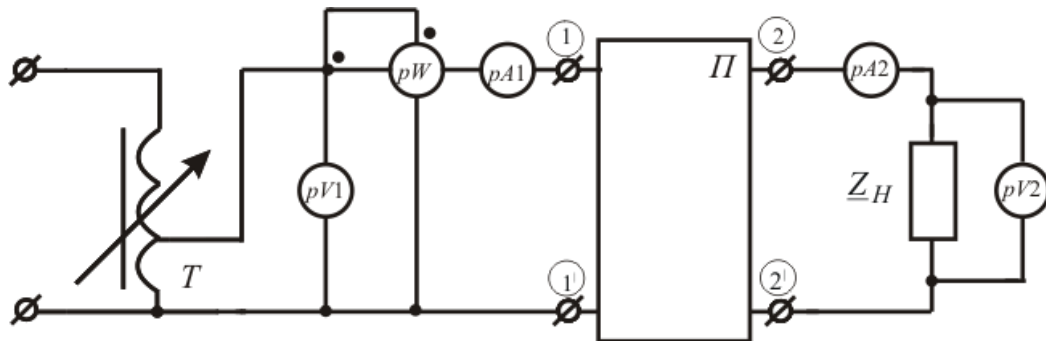


Рисунок 2.4

4. Прodelайте опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны зажимов 1–1'. Данные опытов занесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

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

5. По опытным данным определите входные сопротивления четырехполюсника, с помощью которых по формулам (2.2)–(2.5) рассчитайте постоянные коэффициенты четырехполюсника  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . Полученные значения коэффициентов используйте для расчета сопротивлений заданной схемы четырехполюсника.

6. При прямом питании четырехполюсника подключите к

его зажимам 2–2' нагрузку  $Z_H = R_1$ . Изменяя сопротивление нагрузки, снимите три замера приборов. Результаты опытов занесите в табл. 2.2.

7. По опытным данным определите  $Z_H$  и  $Z_{BX}$ . Рассчитайте по формуле 2.6 значения входного сопротивления  $Z'_{BX}$  и сравните их с экспериментальными данными. Результаты расчетов занесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

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

Литература: [1], § 4.1–6.8; [2], § 9.1–9.14; [6], § 8.1–8.8.



### Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

#### *Основные теоретические положения*

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

На рис. 3.1 приведена схема с последовательным соединением двух нелинейных элементов, а на рис. 3.2 – графическое определение тока в цепи при заданной величине ЭДС источника  $E$  и ВАХ элементов  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$ .

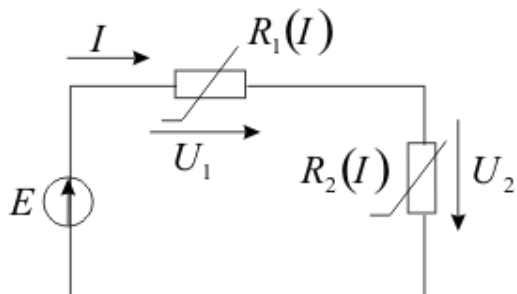


Рисунок. 3.1

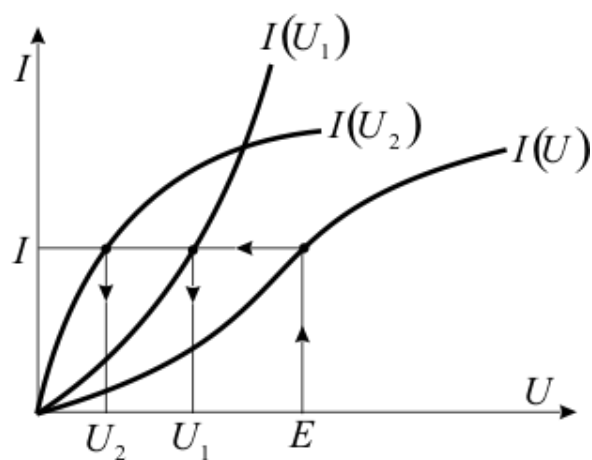


Рисунок. 3.2

Предварительно строится вспомогательная характеристика цепи  $I(U_1 + U_2)$  или ВАХ цепи  $I(U)$  путем суммирования абсцисс двух нелинейных ВАХ для одних и тех же значений тока, на которую проецируется величина ЭДС, определяющая ток цепи  $I$ . Точки пересечения линии тока цепи с ВАХ элементов отмечают на оси абсцисс падения напряжения на нелинейных элементах  $U_1$  и  $U_2$ .

Расчет параллельной схемы, показанной на рис. 3.3, приве-

ден на рис. 3.4. ВАХ цепи  $I(U)$ , где  $I = I_1 + I_2$ , строится путем суммирования ординат двух нелинейных ВАХ для одних и тех же значений напряжения. Перпендикуляр к оси абсцисс из точки с  $U = E$  до пересечения с ВАХ цепи и параллельных ветвей определит общий ток  $I$  и токи в ветвях  $I_1$  и  $I_2$ .

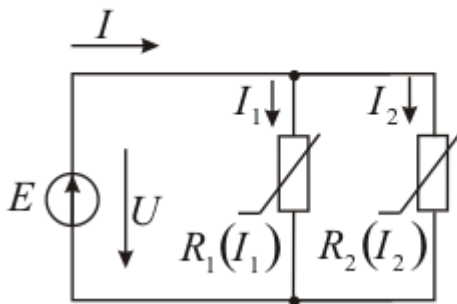


Рисунок 3.3

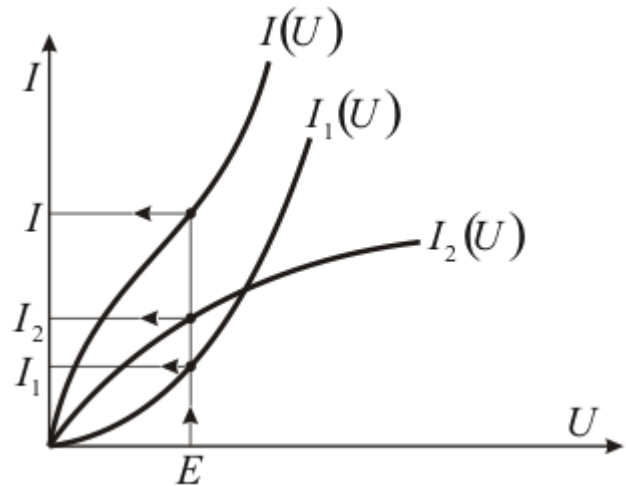


Рисунок 3.4

На рис. 3.5 показан пример схемы со смешанным соединением, графический расчет которой приведен на рис. 3.6.

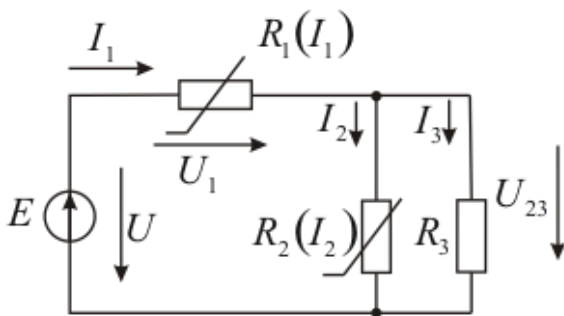


Рисунок 3.5

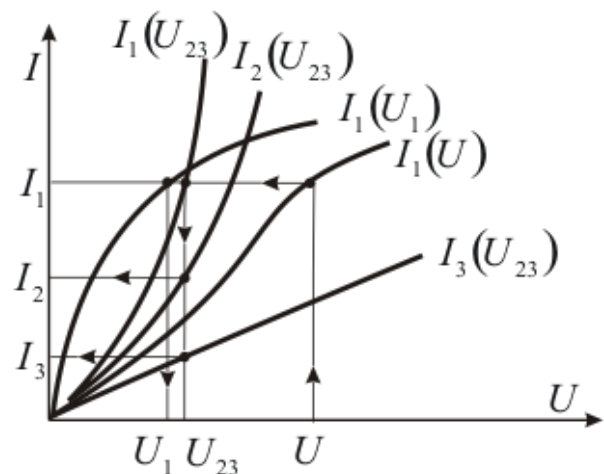


Рисунок 3.6

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

суммированием абсцисс  $I_1(U_1)$  и  $I_1(U_{23})$  для одних и тех же значений тока строится ВАХ всей цепи  $I_1(U_1+U_{23})=I_1(U)$ .

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

### ***Задание для самостоятельной подготовки***

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

### ***Порядок выполнения работы***

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде № 1.

1. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 3.7.
2. Закоротите резистор  $R_1$  и снимите ВАХ резистора  $R_7$ , изменяя напряжение источника  $E_1$ . Снимите закоротку.
3. Закоротите резистор  $R_7$  и снимите ВАХ резистора  $R_1$ , изменяя величину  $E_1$ . Снимите закоротку.
4. Снимите ВАХ цепи, состоящей из  $R_1$  и  $R_7$ , изменяя величину  $E_1$ . Результаты опытов п.п. 2–4 занесите в табл. 3.1. В одной системе координат постройте полученные ВАХ.
5. По ВАХ элементов  $R_1$  и  $R_7$  постройте графически ВАХ последовательной цепи.
6. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 3.8.
7. Снимите ВАХ цепи, изменяя величину  $E_1$ . Данные опыта занесите в табл. 3.1. Постройте экспериментальную ВАХ цепи.
8. По ВАХ элементов  $R_1$  и  $R_7$  постройте графически ВАХ параллельной цепи.

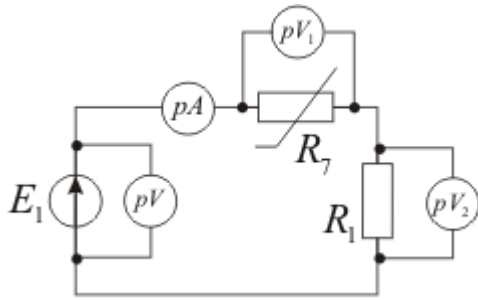


Рисунок 3.7

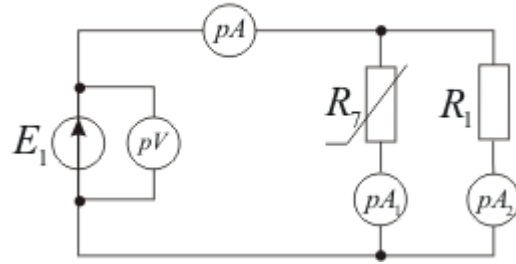


Рисунок 3.8

9. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 3.9.

Таблица 3.1

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

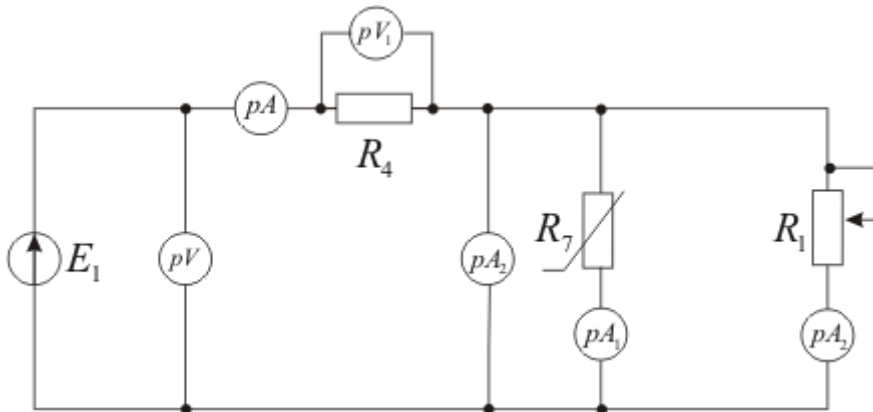


Рисунок 3.9

10. При неизменном напряжении источника  $E_1$ , изменяя сопротивление  $R_1$ , снимите пять замеров. Результаты занесите в табл. 3.2. Постройте совмещенные графики  $U_1, U_2, I, I_1 = f(I_2)$ .

11. Установив известные значения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_4$  и изменяя величину  $E_1$ , снимите пять замеров. Результаты занесите в табл. 3.2. Постройте совмещенные графики  $U_1, U_2, I, I_1, I_2 = f(U)$ .

Таблица 3.2

Условия опыта	$U$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I$ , А	$I_1$ , А	$I_2$ , А
$R_1$ – var						
$U$ – var						

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

Литература: [1, §13.1 – 13.13; 3, §1.1–1.7; 6, §23.1; 5, § 2.1–2.6].

#### Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕЙ КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

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

##### *Основные теоретические положения*

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

При изменении основного магнитного потока  $\Phi_M$  в сердечнике катушки по синусоидальному закону уравнение электрического состояния имеет вид

$$\dot{U} = \dot{I} R + j\omega L_S \dot{I} + \dot{U}_\Phi, \quad (4.1)$$

где  $\dot{I}$  и  $\dot{U}$  – соответственно ток и напряжение на катушке;  $L_S$  – индуктивность рассеяния, обусловленная потоком рассеяния;  $\dot{U}_\Phi$  – напряжение, уравнивающее ЭДС, наводимую основным

магнитным потоком;  $R$  – активное сопротивление обмотки катушки.

Схема замещения катушки приведена на рис. 4.1.

Напряжение  $\dot{U}_\Phi$ , называемое напряжением, соответствующим трансформаторной ЭДС, определяется по формуле

$$\dot{U}_\Phi = j4,44 f W \dot{\Phi}_m, \quad (4.2)$$

где  $W$  – число витков обмотки.

Можно допустить, что  $\dot{U}_\Phi$  падает на участке схемы с сопротивлением  $\underline{Z}_0$ , которое можно разложить на составляющие по двум схемам, изображенным на рис. 4.1, с  $R_0$  и  $X_0$  либо с  $g_0$  и  $b_0$ .

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

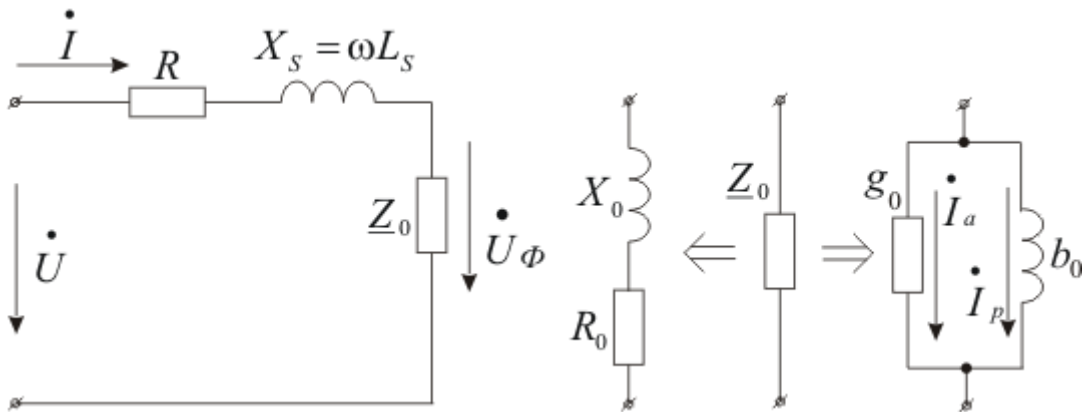


Рисунок 4.1

Потери мощности в стали  $P_{cm}$  пропорциональны мощности петли гистерезиса материала сердечника, с другой стороны их можно определить по формуле

$$P_{cm} = U_\Phi I \cos \theta = U_\Phi I_a, \quad (4.3)$$

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

На рис. 4.2 показана векторная диаграмма катушки с ферромагнитным сердечником.

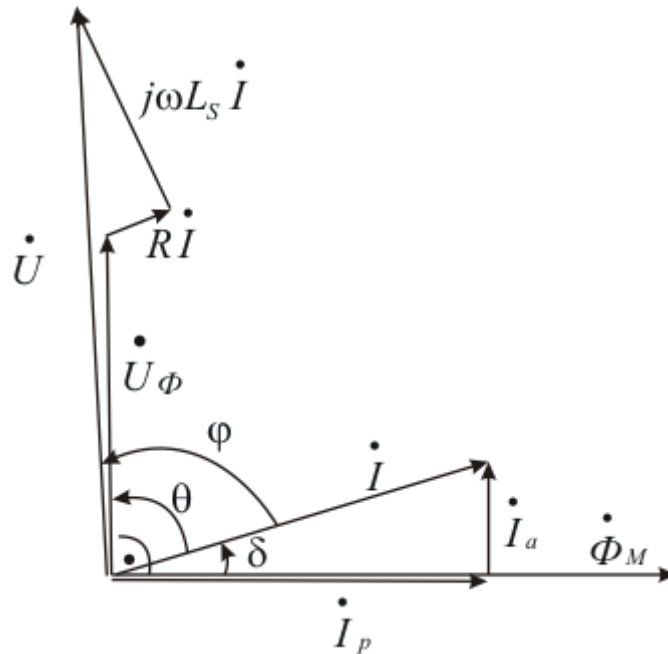


Рисунок 4.2

### Задание для самостоятельной подготовки

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

### Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде № 1.

1. Произведите градуировку осциллографа, для чего подайте известное напряжение от источника переменного напряжения

поочередно на каналы  $X$  и  $Y$  осциллографа. Масштабы определяются по формулам

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

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

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

2. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 4.3.

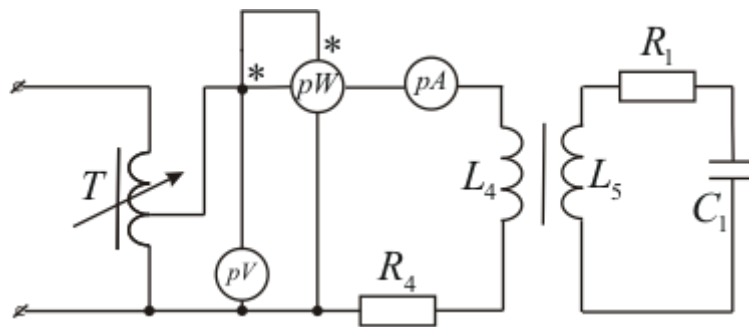


Рисунок 4.3

3. Подайте сигнал с шунта  $R_4$  на вход  $Y$  осциллографа. Изменяя входное напряжение автотрансформатора  $T$ , снимите ВАХ катушки  $U(I)$ . Для трех значений напряжений, соответствующих ненасыщенному, промежуточному и насыщенному состоянию сердечника, зарисуйте кривые тока  $i$  катушки.

4. По ВАХ катушки вычислите зависимость  $Z = f(I)$ . Результаты опыта занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

$U$ , В	$I$ , А	$Z$ , Ом

5. Для одного значения напряжения  $U$  (при насыщенном сердечнике) произведите измерение потерь мощности в магнито-



проводе, подав на выход  $X$  осциллографа сигнал с шунта  $R_4$ , пропорциональный напряженности  $H$  магнитного поля сердечника, а на вход  $Y$  – сигнал с конденсатора  $C_1$ , пропорциональный магнитной индукции  $B$ . На экране осциллографа (при отключенной развертке) будет наблюдаться динамическая петля гистерезиса, которую необходимо зарисовать и измерить ее площадь  $S_n$  в квадратных миллиметрах ( $\text{мм}^2$ ).

Масштаб в единицах магнитной индукции определится по формуле

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

где  $W_2$  – число витков катушки  $L_5$ ;  $S$  – поперечное сечение сердечника,  $\text{м}^2$ .

Масштаб в единицах напряженности определится по формуле

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

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

Максимальные значения индукции и напряженности подсчитайте по формулам

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

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

Удельные потери мощности в магнитопроводе подсчитайте по формуле

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

где  $\gamma$  – плотность материала сердечника,  $\text{кг/м}^3$ ;  $f$  – частота напряжения, подаваемого на катушку  $L_4$ , Гц.

Потери в стали определяются по формуле

$$P_{cm} = p m, \text{ Вт},$$

где  $m$  – масса магнитопровода, кг.

Показания приборов запишите в табл. 4.2, у преподавателя получите недостающие данные:  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $l_{cp}$ ,  $\gamma$ ,  $m$ ,  $C_1$ .

Таблица 4.2

$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$R_1$ , Ом	$R_4$ , Ом

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

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

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

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

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

7. Постройте векторную диаграмму для катушки  $L_4$ .

Литература: [1, § 15.4 – 15.8; 3, § 4.1 – 4.3; 5, § 3.4, 3.7].

### Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

**Цель работы:** Исследование нелинейной цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки с ферромагнитным

сердечником и конденсатора.

### ***Основные теоретические положения***

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

Анализ данных цепей удобно производить методом эквивалентных синусоид.

При последовательном соединении катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора может возникать феррорезонанс напряжений. На рис. 5.1 приведена схема данной цепи, на рис. 5.2 – ее графический расчет.

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

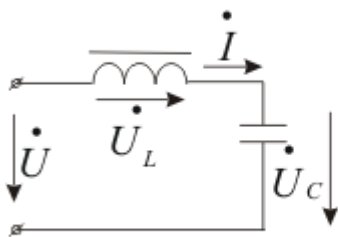


Рисунок 5.1

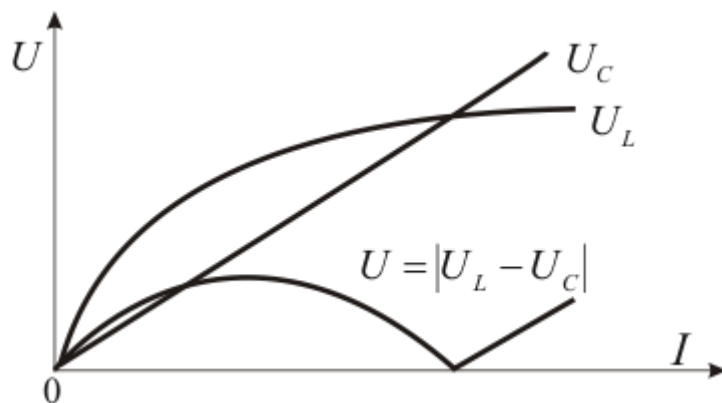


Рисунок 5.2

Точка соприкосновения кривой  $U(I)$  с осью абсцисс на рис. 5.2 соответствует феррорезонансу напряжений ( $U_L = U_C$ ).

Практически из-за потерь в стали и в сопротивлении обмотки кривая  $U(I)$  имеет вид, показанный на рис. 5.3.

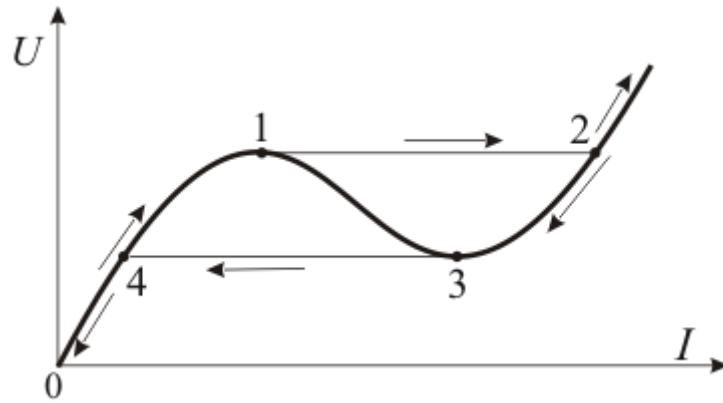


Рисунок 5.3

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

### *Задание для самостоятельной подготовки*

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

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

3. При каких параметрах данной цепи феррорезонанс напряжения невозможен?

4. Составьте бланк отчета.

### Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется на стенде № 2.

1. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 5.4.

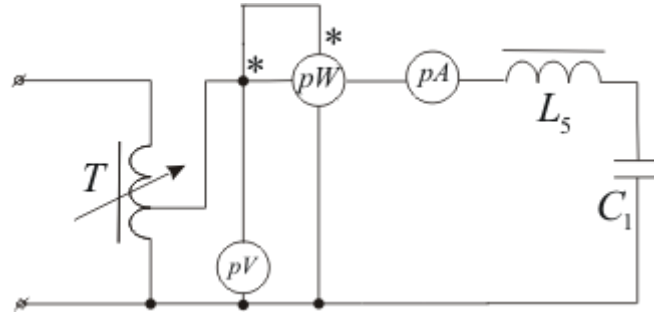


Рисунок 5.4

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

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

Результаты измерений пп. 2 и 3 занесите в табл. 5.1.

4. По данным табл. 5.1 графически постройте результирующую ВАХ цепи, содержащей последовательно включенные катушки  $L_5$  и конденсатор  $C_1$ . При этом активные составляющие напряжений складываются арифметически, реактивные составляющие – алгебраически, а полные – геометрически.

Таблица 5.1

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

5. Для феррорезонансного контура (рис. 5.4) снимите восходящую и нисходящую ветви ВАХ путем регулирования напряжения на входе цепи. Результаты замеров занесите в табл. 5.2.

Таблица 5.2

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

6. Соберите цепь по схеме, приведенной на рис. 5.5

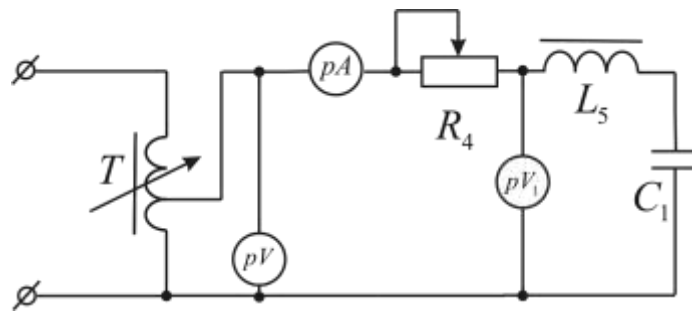


Рисунок 5.5

7. Снимите восходящую и нисходящую ветви ВАХ  $U_1(I)$  феррорезонансного контура ( $L_5 - C_1$ ), регулируя ток в цепи с помощью реостата  $R_4$ . Напряжение на входе цепи  $U$  должно быть неизменным. Результаты замеров занесите в табл. 5.2.

8. По данным табл. 5.2 постройте ВАХ цепи. Сопоставьте экспериментальную и расчетную ВАХ.

Литература: [1, § 15.57–15.60; 3, § 4.6; 5, § 3.11].

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

11. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г. И. Атабеков. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=90](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=90)

3. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле / Г. И. Атабеков [и др.]. – СПб.: Лань, 2010. – 432 с.

[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=644](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=644)

4. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 1 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – 512 с.

5. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – 431 с.

6. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин. – Л.: Энергия, 1989. – 528 с.

7. Электрические измерения / под ред. А. В. Фремке, Е. М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

8. Теоретические основы электротехники. Т. 1 / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Высш. шк. 1976. – 544 с.