

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ульяновский государственный технический университет»

С. А. Курганов, Е. Н. Меньшов

**ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ**

УЛЬЯНОВСК

УлГТУ

2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ульяновский государственный технический университет»

ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ

Методические указания
к лабораторным работам
по теоретическим основам электротехники

Составители С. А. Курганов
Е. Н. Меньшов

Ульяновск
УлГТУ
2013

УДК 621.3: 621.372 (076)

ББК 31.21 я7

М54

Рецензент д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» УлГТУ В. Н. Дмитриев.

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета университета.

М54 **Переходные и установившиеся режимы в электрических и магнитных цепях: методические указания к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники / Сост. С. А. Курганов, Е. Н. Меньшов – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 40 с.**

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» – профилю «Электроснабжение» и «Электропривод и автоматика». Основой для методических указаний послужил сборник лабораторных работ, изданный на кафедре в 2006 году для соответствующих инженерных специальностей. Отредактированы и включены в настоящие указания работы по следующим разделам: несинусоидальные токи, переходные процессы, четырехполюсники и фильтры. Дополнительно изложена работа по исследованию магнитных цепей.

Методические указания подготовлены на кафедре «Электроснабжение».

Учебное издание

**ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ**

Методические указания

к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники

Составители: КУРГАНОВ Сергей Александрович

МЕНЬШОВ Евгений Николаевич

Редактор Н. А. Евдокимова

Подписано в печать 2013 г. Формат 60x84/16.

Усл.печ.л. Тираж 100 экз. Заказ .

Ульяновский государственный технический университет

432027, Ульяновск, Сев.Венец, 32.

Типография УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев.Венец, 32.

УДК 621.3 (076)

ББК 31.21 я7

© С. А. Курганов, Е.Н.Меньшов, составление, 2013

© Оформление УлГТУ, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы являются важным видом занятий для освоения дисциплины «Теоретические основы электротехника». Задачами лабораторных занятий являются: освоение техники электротехнического эксперимента, обучение грамотному оформлению результатов измерений, практическая проверка положений, изложенных в теоретической части курса и приобретение навыков работы с персональным компьютером при исследовании и обработке результатов экспериментов.

Настоящий сборник содержит методические указания к 5-ти лабораторным работам: «Несинусоидальные токи и напряжения в линейных электрических цепях», «Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях», «Исследование пассивных линейных четырехполюсников», «Исследование фильтра нижних частот», «Исследование магнитных цепей». Порядок выполнения работ выбирается преподавателем, у которого есть возможность согласовать их с лекционными и практическими занятиями в соответствии с рабочей программой, поскольку лаборатории ТОЭ позволяют проводить занятия фронтальным методом.

Лабораторные работы выполняются бригадами в составе двух–трех студентов. Перед проведением лабораторных работ студенты должны быть проинструктированы о безопасных правилах работы. Инструкции по безопасности находятся в лабораториях. Ниже кратко изложены их основные положения.

Отчет по лабораторной работе составляет каждый студент. Требования к оформлению отчета изложены в конце сборника. Для проведения следующей работы требуется защитить отчет по предыдущей работе. Только после сдачи отчета студент допускается к новой работе. В конце описания каждой лабораторной работы имеются контрольные вопросы, которые дают возможность студенту подготовиться к предстоящей работе и защите отчета.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ

Лаборатории теоретических основ электротехники кафедры «Электроснабжение» относятся к помещениям без повышенной опасности поражения током. Безопасным в этом случае считается напряжение до 42 вольт. Рабочие напряжения в лабораториях не выше указанного. При этом правила безопасной работы следующие.

1. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что выключатель стенда находится в отключенном состоянии.

2. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами и проводов с поврежденной изоляцией.

3. Перед тем как присоединить конденсатор, его необходимо предварительно разрядить, замкнув выводы накоротко проводником.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может быть включена только по его разрешению.

5. Перед включением цепи следует убедиться, что никто не прикасается к оголенным токоведущим частям.

6. Все необходимые изменения в схеме нужно производить только при отключенном напряжении. И всякое изменение в цепи должно быть проверено преподавателем.

7. Студентам не разрешается самостоятельно производить какие-либо переключения на распределительном щите лаборатории.

8. Если во время работы возникает какое-либо повреждение, в результате которого появляется дым, специфический запах или накаляются провода, то надо немедленно отключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся.

9. Если кто-либо попал под напряжение и не может сам оторваться от токоведущих частей, то не пытайтесь оттащить его. Немедленно отключите напряжение. Сообщите преподавателю о случившемся.

10. Студенты допускаются к работам после ознакомления с Инструкцией по безопасной работе, которая находится в лаборатории, что фиксируется в специальном журнале.

Лабораторная работа № 1

НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1. Основные положения

Электротехническое оборудование, как правило, рассчитывается на синусоидальное напряжение. Но из-за влияния различных искажающих факторов реальные токи и напряжения могут отличаться от синусоидальных. Кроме этого, несинусоидальные напряжения (прямоугольной, треугольной и других форм) широко используются в преобразовательной технике и электронике. Поэтому необходимо уметь анализировать схемы при наличии в них таких токов и напряжений.

Если электрическая цепь является линейной (параметры ее элементов не зависят от времени, напряжения, тока), то для анализа процессов в такой цепи может использоваться гармонический метод, согласно которому периодическая несинусоидальная функция $f(\omega t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле, может быть разложена в ряд Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{mk} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_{mk} \cos k\omega t, \quad (1.1)$$

где A_0 – постоянная составляющая; $k = 1, 2, \dots$ – номер гармонической составляющей; $\omega = 2\frac{\pi}{T}$ – частота основной (первой) гармоники; T – период функции $f(\omega t)$. Отметим, что постоянная составляющая иногда называется *нулевой гармоникой*.

Другая форма ряда Фурье имеет вид:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k). \quad (1.2)$$

Между выражениями (1.1) и (1.2) имеется связь:

$$A_{mk} = \sqrt{B_{mk}^2 + C_{mk}^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{C_{mk}}{B_{mk}}. \quad (1.3)$$

Составляющая $A_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k)$ называется *гармоникой*. При $k = 1$ мы имеем первую (основную) гармонику. Если аналитическое выражение функции $f(\omega t)$ известно, то коэффициенты ряда (1.1) могут быть найдены по формулам:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) dt; \quad B_{mk} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t dt; \quad C_{mk} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t dt. \quad (1.4)$$

Если аналитическое выражение функции $f(\omega t)$ является сложным (или оно неизвестно), но известен график этой функции, то можно использовать графический метод определения коэффициентов ряда Фурье. Он основывается на разбиении графика функции на N интервалов, на определении значений функции в середине каждого интервала и замене интеграла суммой конечного числа слагаемых. При этом коэффициенты принимают вид

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N f_p(x); \quad B_{mk} = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N f_p(x) \sin kx; \quad C_{mk} = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N f_p(x) \cos kx, \quad (1.5)$$

где N – число интервалов Δx ; $x_p, f_p(x)$ – значения соответственно аргумента и функции в середине интервала $p (p=1, 2, 3, \dots)$; k – число гармоник.

Если функция $f(\omega t)$ симметрична относительно оси абсцисс, то обычно используется ее разложение на протяжении половины периода.

После определения гармонических составляющих ряда Фурье можно использовать принцип наложения для расчета токов и напряжений в исходной схеме при воздействии заданного несинусоидального воздействия. Это справедливо для линейной цепи.

Также отметим, что действующее значение несинусоидальной функции (1.2) определяется через действующие значения гармоник (включая нулевую гармонику) следующим образом:

$$F = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2}. \quad (1.6.)$$

2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является ознакомление с методами исследования линейных электрических цепей под воздействием несинусоидальных токов и напряжений.

Задача 1. Получение несинусоидального напряжения с помощью лабораторного оборудования и проведение необходимых измерений.

Задача 2. Разложение полученной несинусоидальной кривой в ряд Фурье и проведение необходимых вычислений.

3. Последовательность выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь согласно рис. 1.1 после определения сопротивления резистора R с помощью омметра. Источник несинусоидального напряжения представляет собой последовательно соединенные источник синусоидального напряжения и диод. Он расположен внутри стенда и имеет выходные зажимы 1 и 2. Частота входного напряжения равна 50 Гц.

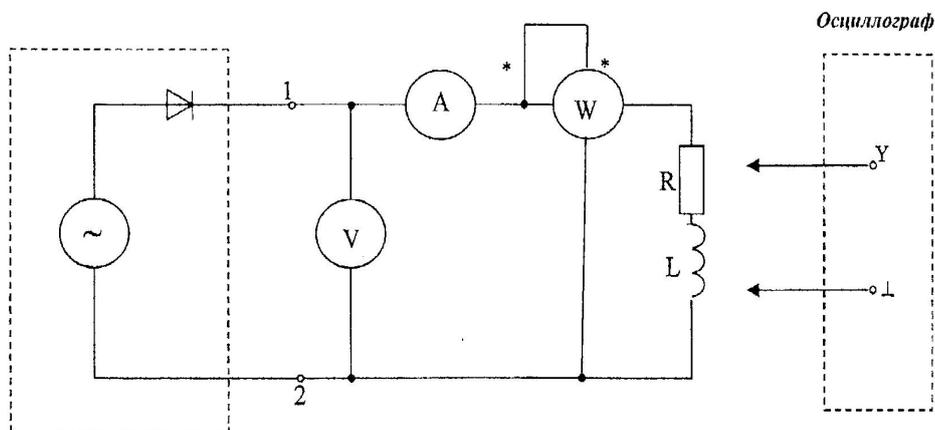


Рис. 1.1

2. Измерить следующие величины: активную мощность P , действующее U_L и среднее U_{Lcp} значения напряжения на индуктивности (с помощью вольтметра), а также максимальное значение U_{Lm} этого напряжения и действующее значение тока I в цепи. Все результаты занести в таблицу 1.1.

3. Скопировать кривые выходного напряжения источника, напряжения на индуктивности и тока в цепи (осциллограмма тока снимается по напряжению на резисторе).

4. Используя результаты измерений, определить коэффициент амплитуды $K_a = \frac{U_m}{U}$, коэффициент формы $K_\phi = \frac{U_L}{U_{Lcp}}$, для напряжения

на катушке индуктивности. Результаты занести в таблицу 1.1.

Примечание 1. Действующее значение измеряется электронным вольтметром в режиме измерения переменного напряжения, а среднее – в режиме измерения постоянного напряжения. При определении действующего значения необходимо иметь в виду, что вольтметр измеряет действующее значение только переменной составляющей – под корнем в формуле (1.6) отсутствует первое слагаемое A_0 .

Примечание 2. При определении амплитудного значения напряжения можно воспользоваться осциллографом, но предварительно необходимо его отградуировать, подав на вход синусоидальное напряжение, что позволяет использовать простое соотношение между амплитудным и действующим значениями напряжения (последнее измеряется вольтметром).

5. Разложить кривую напряжения на индуктивности в ряд Фурье. Ограничиться теми гармониками, амплитуды которых составляют 10 и более процентов от постоянной составляющей.

6. Рассчитать среднее значение напряжения U'_{Lcp} ; действующее значение напряжения U'_L , учитывая постоянную составляющую и первую гармонику; действующее значение напряжения U''_L , учитывая все рассчитанные гармоники. Результаты занести в таблицу 1.2.

7. Сравнить результаты вычислений по предыдущему пункту с экспериментальными данными. Определить при этом погрешности вычисления среднего значения δ_{cp} , вычисления действующих значений U'_L (погрешность δ) и U''_L (погрешность δ''). Результаты занести в таблицу 1.2.

8. Рассчитать постоянную составляющую тока I_0 ; активную мощность P_0 , обусловленную постоянными составляющими напряжения и тока; полную мощность S . Результаты занести в таблицу 1.2.

9. Начертить кривую напряжения на индуктивности $u(t)$ по ее ряду Фурье.

Таблица 1.1

$U_L,$ В	$U_{Lcp},$ В	$U_{Lm},$ В	$P,$ Вт	$I,$ А	$K_a,$	K_ϕ

Таблица 1.2

$U'_{Lcp},$ В	$U'_L,$ В	$U''_L,$ В	$\delta_{cp},\%$	$\delta',\%$	$\delta'',\%$	$I_0,$ А	$P_0,$ Вт	$S,$ В·А

4. Контрольные вопросы

1. Запишите две формы ряда Фурье и формулы, отражающие связь между ними.

2. Что означает термин «гармоника»?

3. Как можно рассчитать токи в линейной цепи при воздействии на ее вход несинусоидального напряжения?

4. По какой формуле вычисляется действующее значение напряжения при несинусоидальной форме воздействия?

5. Как найти среднее значение напряжения при несинусоидальной форме воздействия?

6. Для цепи, схема которой приведена на рисунке ниже, найдите показание амперметра (он измеряет действующее значение тока) при следующих данных: $u(t) = 100 + 80 \sin(\omega t) + 40 \sin(2\omega t) В$, $R = 10 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$ $f = 50 \text{ Гц}$.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1. Основные теоретические положения

В линейной электрической цепи, содержащей реактивные элементы, при переходе от одного режима к другому возникает переходный процесс, характер и длительность которого определяется топологией схемы и параметрами элементов. Токи и напряжения на участках цепи при переходном процессе изменяются не мгновенно, а по сложным законам.

Переходные процессы в линейных цепях описываются системой линейных интегро-дифференциальных уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Анализ переходных процессов сводится к решению этих дифференциальных уравнений и основывается на двух законах коммутации.

Первый закон коммутации утверждает, что в ветви электрической цепи с катушками индуктивности ток и магнитный поток не могут измениться скачком, в первый момент после коммутации они сохраняют те значения, которые имели до коммутации.

Согласно второму закону коммутации напряжение на обкладках конденсатора и его заряд не могут измениться скачком, в первый момент после коммутации они сохраняют те значения, которые имели до коммутации.

При подключении конденсатора C через резистор R к источнику постоянного напряжения U_0 напряжение на обкладках конденсатора изменяется по показательному закону:

$$u_c(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right), \quad (2.1)$$

а ток изменяется в соответствии с выражением:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2.2)$$

Произведение $RC = \tau$, имеющее размерность времени, называется *постоянной времени* и характеризует скорость переходного процесса. Через время $t = \tau$ напряжение на конденсаторе возрастает до $u_c = 0,63U_0$, а ток уменьшается в e раз $t = \tau$

Цепь, состоящая из катушки индуктивности L и резистора R , при подключении к источнику постоянного напряжения ведет себя по-другому. Ток не может измениться мгновенно и нарастает по закону:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right), \quad (2.3)$$

а напряжение на катушке индуктивности убывает в соответствии с выражением:

$$u_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (2.4)$$

Скорость переходного процесса в такой цепи определяется постоянной времени $\tau = \frac{L}{R}$.

При подключении резистора, катушки индуктивности и конденсатора, соединенных последовательно, к источнику напряжения $e(t)$ переходный процесс описывается вторым законом Кирхгофа:

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt + u_c(0) = e(t), \quad (2.5)$$

где $u_c(0)$ – напряжение на конденсаторе в начальный момент переходного процесса.

При разряде предварительно заряженного конденсатора на электрическую цепь, содержащую последовательно соединенные резистор и катушку индуктивности, переходный процесс описывается уравнением:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i = 0. \quad (2.6)$$

Характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (2.6), имеет вид:

$$P^2 + \frac{R}{L} \cdot P + \frac{1}{LC} = 0. \quad (2.7)$$

Корни характеристического уравнения (2.7)

$$P_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (2.8)$$

могут быть вещественными, кратными или комплексно-сопряженными в зависимости от параметров элементов.

При $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ или $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ (2.9)

корни характеристического уравнения будут вещественными, разными, отрицательными. Такой процесс разряда конденсатора называется *апериодическим*, а условие его возникновения будет

$$R > R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Решения дифференциального уравнения (2.6) запишутся в виде:

$$i(t) = \frac{u_c(0)}{L(P_2 - P_1)} \cdot (e^{P_1 t} - e^{P_2 t}), \quad (2.10)$$

$$i_c(t) = \frac{u_c(0)}{(P_2 - P_1)} \cdot (P_2 e^{P_1 t} - P_1 e^{P_2 t}), \quad (2.11)$$

$$i_L(t) = \frac{u_c(0)}{(P_2 - P_1)} \cdot (P_2 e^{P_1 t} - P_1 e^{P_2 t}). \quad (2.12)$$

При $R < R_{кр}$ корни характеристического уравнения – комплексно-сопряженные, а процесс разряда конденсатора называется *колебательным*. Решения дифференциального уравнения при комплексно-сопряженных корнях имеют вид:

$$i(t) = \frac{u_c(0)}{\omega' L} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin \omega' t, \quad (2.13)$$

$$i_c(t) = -u_c(0) \cdot \frac{\omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega' t - \Theta), \quad (2.14)$$

$$i_L(t) = u_c(0) \cdot \frac{\omega_0}{\omega'} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega' t + \Theta), \quad (2.15)$$

где $\beta = \frac{R}{2L} \omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и $\Theta = \arctg\left(\frac{\omega'}{-\beta}\right)$.

При $R=R_{кр}$ получается предельный апериодический разряд, называемый *критическим*.

2. Цель и задачи работы

Цель лабораторной работы – экспериментальное и теоретическое исследование переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами.

Задача работы – изучение характера переходных процессов в электрических цепях первого и второго порядков и влияния параметров элементов цепи на характер переходного процесса.

3. Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.1. Установка состоит из источника питания (ИП) U_0 , двухпозиционного электронного ключа (ЭК) и набора элементов. Постоянное напряжение необходимо измерять на клеммах 1-2. Набор элементов R, L, C позволяет собрать цепь первого и второго порядков с различными параметрами, что дает возможность исследовать характер переходного процесса экспериментально – на экране осциллографа. Электронный ключ производит переключения конденсатора с частотой 50 Гц. Таким образом, длительность периода «заряд – разряд» составляет 0,2 с.

4. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь первого порядка, содержащую резистор R и конденсатор C (рис. 2.1) для исследования заряда и разряда конденсатора: $u_{с\text{заряд}}(t)$; $i_{с\text{заряд}}(t)$; $u_{с\text{разряд}}(t)$; $i_{с\text{разряд}}(t)$.

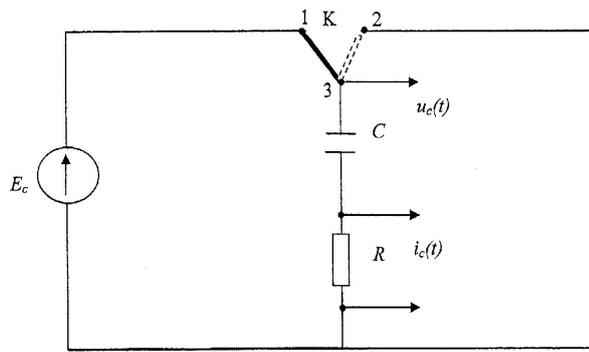


Рис. 2.1

Кривые изменения напряжения и тока скопировать с экрана осциллографа. Провести расчет кривых по заданным параметрам R, C, E_0 , используя следующие формулы:

$$u_{\text{сЗаряд}}(t) = E_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right); \quad i_{\text{сЗаряд}}(t) = \frac{E_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$u_{\text{сРазряд}}(t) = E_0 e^{-\frac{t}{RC}}; \quad i_{\text{сРазряд}}(t) = -\frac{E_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}.$$

2. Собрать электрическую цепь первого порядка, содержащую резистор R и катушку индуктивности L (рис. 2.2) для исследования процессов при включении и отключении постоянного источника.

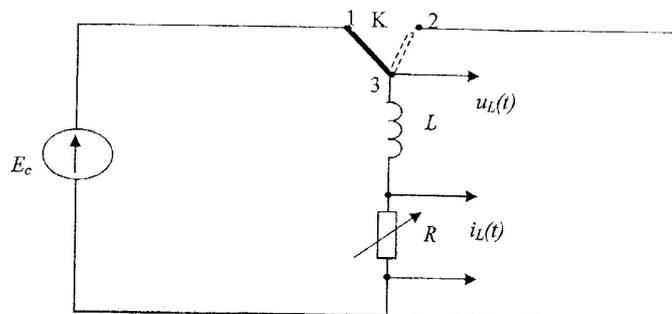


Рис. 2.2.

Кривые изменения тока и напряжения $i_{L\text{Вкл}}(t)$ $u_L(t)$ вкл.; $i_L(t)$ откл. скопировать с экрана осциллографа. Провести расчет по заданным параметрам R, L, E_0 , используя следующие формулы:

$$i_{L\text{Вкл}}(t) = \frac{E_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right); \quad u_{L\text{Вкл}}(t) = E_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t};$$

$$i_{L\text{Отк}}(t) = \frac{E_0}{R} e^{-\frac{R}{L}t}; \quad u_{L\text{Отк}}(t) = -E_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}.$$

3. Собрать электрическую цепь RLC второго порядка (рис. 2.3) для исследования аperiodического, критического и колебательного процессов.

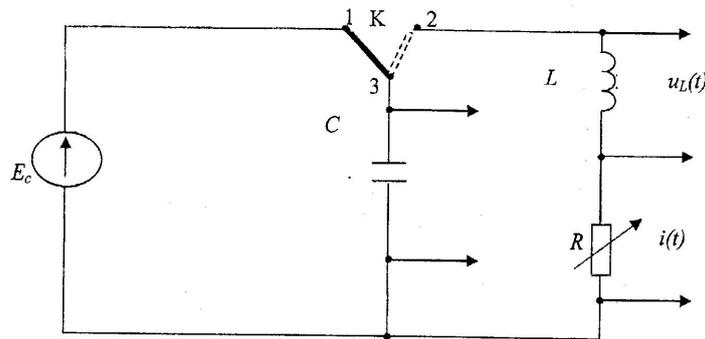


Рис. 2.3

Записать параметры элементов цепи (R, L, C). Скопировать с экрана осциллографа кривые: $u_{cАпер}(t)$; $u_{cКр}(t)$; $u_{cКол}(t)$; $u_{LАпер}(t)$; $i_{Апер}(t)$.

4. Рассчитать по формулам (2.10) и (2.13) кривые тока аperiodического и колебательного режима. Построить графики. Нанести на графики для сравнения точки соответствующих экспериментальных кривых.

5. Оформить отчет по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Физический смысл постоянной времени цепи?
2. Как найти постоянную времени произвольной линейной цепи?
3. Какие колебания называются свободными?
4. Как найти частоту свободных колебаний?
5. Сформулируйте законы коммутации.
6. Оцените частоту свободных колебаний по результатам эксперимента.
7. Дайте определение постоянной затухания.
8. Как найти постоянную затухания произвольной линейной электрической цепи.
9. Как находятся постоянные интегрирования в формулах для откликов в переходном режиме?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

1. Основные теоретические положения

Четырехполюсник, который не содержит источников электрической энергии, а содержит линейные пассивные элементы, называется пассивным линейным четырехполюсником. Четырехполюсник, имеющий два входных 1–1' и два выходных 2–2' зажима (рис. 3.1) называется проходным.

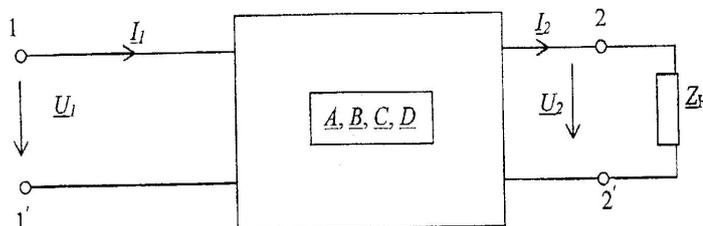


Рис. 3.1

Для пассивного четырехполюсника напряжение и ток на входе $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ связаны с напряжением и током на выходе $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ следующими уравнениями

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2,\end{aligned}\tag{3.1}$$

где $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ – А-параметры – комплексные коэффициенты, зависящие от схемы четырехполюсника.

Параметры пассивного четырехполюсника связаны между собой уравнением

$$\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1.\tag{3.2}$$

А-параметры четырехполюсника могут определяться либо расчетным путем, если известны параметры элементов и схема соединения четырехполюсника, либо экспериментальным путем по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

При подключении источника напряжения к входным зажимам следует провести два указанных опыта. При холостом ходе на выходе четырехполюсника его входное сопротивление имеет вид

$$\underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \underline{Z}_{10} \cdot e^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}, \quad (3.3)$$

где
$$Z_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad \varphi_{10} = \arccos \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}}.$$

При коротком замыкании на выходе входное сопротивление четырехполюсника определяется следующим образом

$$\underline{Z}_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} = \underline{Z}_{1K} \cdot e^{j\varphi_{1K}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}, \quad (3.4)$$

где
$$Z_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}, \quad \varphi_{1K} = \arccos \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}}.$$

При подключении источника к выходным зажимам достаточно провести один опыт, например, короткого замыкания на входе четырехполюсника. При этом выходное (со стороны зажимов 2–2') сопротивление четырехполюсника определяется по формуле

$$\underline{Z}_{2K} = \frac{U_{2K}}{I_{2K}} = \underline{Z}_{2K} \cdot e^{j\varphi_{2K}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}, \quad (3.5)$$

где
$$Z_{2K} = \frac{U_{2K}}{I_{2K}}, \quad \varphi_{2K} = \arccos \frac{P_{2K}}{U_{2K} \cdot I_{2K}}.$$

В формулах (3.3)–(3.5) нижние индексы O и K означают принадлежность величины к опытам холостого хода и короткого замыкания, а индексы 1 и 2 – принадлежность переменной к входным или выходным зажимам соответственно. Выражения (3.3) и (3.4) получены из (3.1) при $\underline{I}_2=0$ и $\underline{U}_2=0$, а (3.5) – из первого уравнения (3.1) при $\underline{U}_1=0$.

С помощью соотношений (3.2)–(3.5) можно определить коэффициенты четырехполюсника:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10} \cdot \underline{Z}_{1K}}{\underline{Z}_{2K}(\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1K})}}; \underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2K}; \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{10}}; \underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1K}}. \quad (3.6)$$

Пассивный линейный четырехполюсник можно заменить Т- или П-образной схемой замещения (рис. 3.2 а,б).

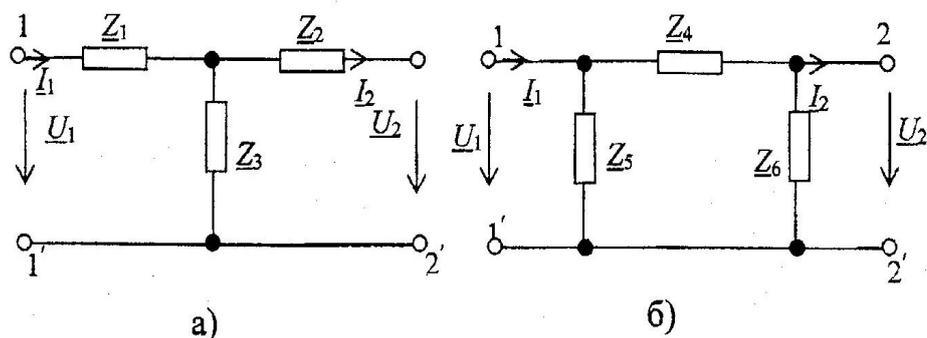


Рис. 3.2

Параметры схем замещения выражаются через коэффициенты соотношениями:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{C}}; \tag{3.7}$$

$$\underline{Z}_4 = \underline{B}; \quad \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1}; \quad \underline{Z}_6 = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}.$$

2. Цель лабораторной работы

Целью работы является опытное определение А-параметров четырехполюсника.

3. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему электрической цепи (рис. 3.3).

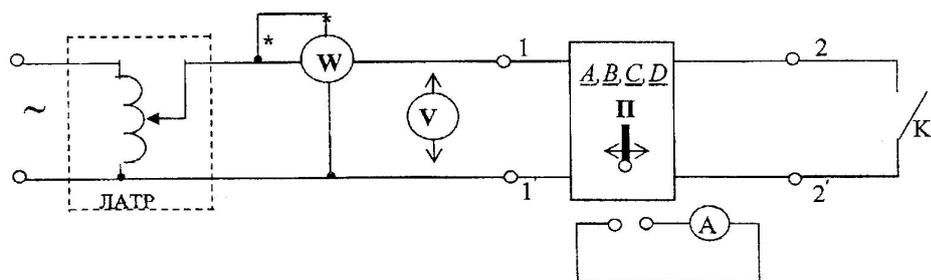


Рис. 3.3

Примечание. Специальный ключ Π позволяет одним амперметром измерять ток в зависимости от положения тумблера на первичной или вторичной стороне четырехполюсника. ЛАТР – лабораторный автотрансформатор.

2. Провести опыты холостого хода (ключ K разомкнут) и короткого замыкания (ключ K замкнут) при прямом питании, которые в строках 1 и 2 табл. 3.1 обозначены сокращенно: Пр. ХХ и Пр. КЗ. Выполнить измерения переменных в соответствии с табл. 3.1 и заполнить указанные строки.

3. Изменить схему на рис. 3.3 – отключить источник и ваттметр от входных зажимов и подключить их аналогичным образом к выходным (2-2') зажимам (обратное питание четырехполюсника). Выполнить опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны входных зажимов (в табл. 3.1 обозначены как Обр.ХХ и Обр.КЗ). Провести измерения и заполнить строки 3 и 4 в табл. 3.1.

4. Собрать схему на рис. 3.4.

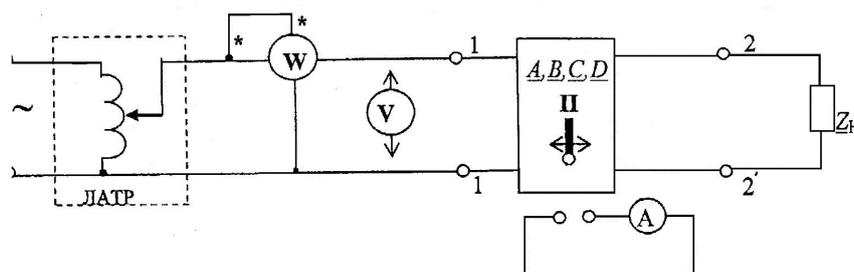


Рис. 3.4

5. Выполнить исследование режима прямого питания при конечной нагрузке Z_n . Сопротивление нагрузки Z_n активное, задает преподаватель. Результаты измерений занести в последнюю строку табл. 3.1.

Таблица 3.1

№	Опыт	Измерено					Вычислено	
		U_1 , В	I_1 , А	P , Вт	U_2 , В	I_2 , А	Z , Ом	φ , град
1.	Пр. ХХ							
2.	Пр. КЗ							
3.	Обр. ХХ							
4.	Обр. КЗ							
5.	Пр. Z_n							

4. Работа над отчетом

1. Вычислить комплексные сопротивления $\underline{Z}_{10}, \underline{Z}_{1K}, \underline{Z}_{2K}$ и занести в табл. 3.1.

Примечание. При записи комплексных сопротивлений учесть, что цепь внутренней схемы четырехполюсника выполнена на конденсаторах, поэтому угол φ отрицателен.

2. Вычислить А-параметры четырехполюсника по формулам (3.6).

3. Провести проверку расчета по уравнению (3.2).

4. Воспользовавшись найденными значениями коэффициентов и выходными данными U_2 и I_2 из п.5 в табл. 3.1 четырехполюсника, вычислить по уравнениям напряжение и ток на входе U_1 и I_1 . Результат расчета сопоставить с экспериментальными данными.

5. Рассчитать параметры Т- и П-образных схем замещения через параметры четырехполюсника.

6. Сделать выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Определить А-параметры для четырехполюсника на рис. 3.5.

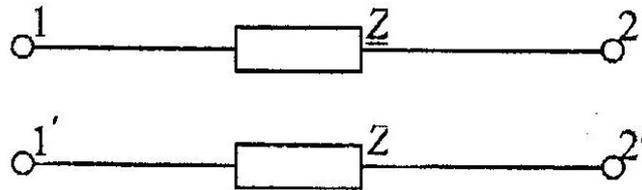


Рис. 3.5

2. Определить комплексное входное сопротивление четырехполюсника при прямом питании в режиме холостого хода и короткого замыкания, схема которого приведена на рис. 3.2,а. Сравнить результат с данными табл. 3.1.

3. Дайте определение пассивного четырехполюсника. Как по матрице А-параметров определить, пассивный или активный четырехполюсник рассматривается?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

В работе исследуется Т-образный фильтр нижних частот типа K , схема которого представлена на рис. 4.1.

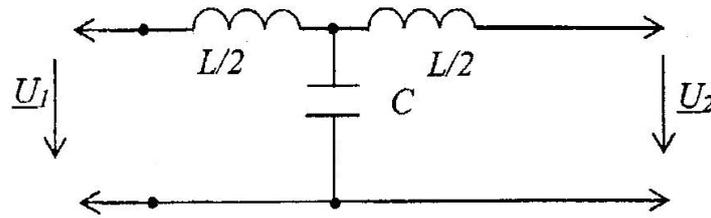


Рис. 4.1

Структура фильтра симметричная: каждое плечо схемы обладает индуктивностью $\frac{L}{2}$. Характеристики фильтра и формулы для их определения приведены ниже [4]:

– частота среза $f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{L \cdot C}}$; (4.1)

– характеристическое сопротивление $\underline{Z}_c = R_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$; (4.2)

– номинальное характеристическое сопротивление $R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$; (4.3)

– комплексный коэффициент передачи по напряжению

$$\underline{K}_U = \frac{U_2}{U_1} = K_U e^{j\varphi_K}; \quad (4.4)$$

– комплексный коэффициент ослабления напряжения

$$\underline{A} = \frac{U_1}{U_2} = A e^{j\varphi_A} = \frac{1}{\underline{K}_U}; \quad (4.5)$$

– амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента передачи

$$K_U = \frac{U_2}{U_1}; \quad (4.6)$$

– фазо-частотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи

$$\varphi_K = \psi_{U_2} - \psi_{U_1}; \quad (4.7)$$

– АЧХ коэффициента ослабления $A = \frac{U_1}{U_2}$; $A(\text{Нп}) = \ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)$; (4.8)

$$A(\text{дБ}) = 20 \ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right);$$

$$A(\text{дБ}) = 8,68A(\text{Нп});$$

$$A(\text{Нп}) = 0,115A(\text{дБ});$$

– ФЧХ коэффициента ослабления

$$\varphi_A = \varphi_{U1} - \varphi_{U2} - \varphi_K; \quad (4.9)$$

– АЧХ коэффициента ослабления при согласованном режиме

$$A(f) = \text{arcch}\left(2\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1\right); \quad (4.10)$$

– ФЧХ коэффициента ослабления при согласованном режиме

$$\varphi_A(f) = \begin{cases} \arccos\left(1 - 2\left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right); \\ \end{cases} \quad (4.11)$$

при $f \leq f_c$

180° (или π) при $f \geq f_c$

– операторный коэффициент передачи при резистивной нагрузке

$$K_U(p) = \frac{a_0}{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0};$$

$$a_0 = 4; b_0 = 4; b_4 = \frac{4L}{R_H}; \quad (4.12)$$

$$b_2 = 2CL; b_3 = \frac{CL^2}{R_H}.$$

Экспериментальные АЧХ фильтра $K_U(f)$, $A(f)$ определяются путем измерения входного и выходного напряжения фильтра при гармоническом воздействии в заданном диапазоне частот с последующим использованием формул (4.6), (4.8).

2. Цель и задачи лабораторной работы

Цель работы: исследовать основные режимы работы Т-образного фильтра нижних частот типа K и сопоставить математические модели с характеристиками реального фильтра.

Задачи:

– рассчитать частоту среза f_c и номинальное характеристическое сопротивление R_0 выданного преподавателем фильтра;

– снять экспериментальным путем ФЧХ коэффициента затухания фильтра в полосе пропускания при согласованной нагрузке, данные представить в двух единицах измерения: неперах и децибелах;

– получить экспериментально АЧХ коэффициента передачи K_U и коэффициент затухания A в широком диапазоне частот при сопротивлении нагрузки R_H , равном номинальному характеристическому сопротивлению R_0 ;

– рассчитать теоретические АЧХ и ФЧХ коэффициента затухания исследуемого фильтра при идеальной – согласованной нагрузке в широком диапазоне частот, построить графики, нанести на них экспериментальные точки;

– сделать выводы по работе.

3. Порядок выполнения работы

1. Получите у преподавателя значения L и C .
2. Рассчитайте по формуле (4.1) частоту среза f_c фильтра.
3. Соберите цепь для снятия ФЧХ фильтра, представленную на рис. 4.2.

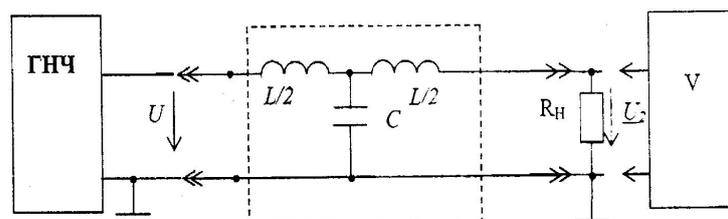


Рис. 4.2

Обозначения: ГНЧ – генератор низких частот; V – вольтметр; пунктиром выделен исследуемый фильтр.

4. Снимите экспериментальные АЧХ коэффициента ослабления фильтра при согласованном режиме $R_H = Z_c$. Для получения АЧХ достаточно измерить напряжение U_1 и U_2 при заданных частотах входного воздействия. Данные занести в таблицу 4.1. Характеристические сопротивления рассчитайте до проведения эксперимента по формулам (4.2), (4.3).

Таблица 4.1

Задано	f / f_c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Расчет	f , кГц									
	Z_c , Ом									
Измерения	U_1 , В									
	U_2 , В									
Расчет	A									
	A , Нп									
	A , дБ									

5. Получите экспериментально АЧХ фильтра при сопротивлении нагрузки, равном характеристическому сопротивлению. Для этого используйте схему на рис. 4.2 при $R_H = R_0$. Данные занесите в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Задано	f / f_c	0.1	0.3	0.5	0.7	1	3	5	7
	f , кГц								
Измерено	U_1 , В								
	U_2 , В								
Рассчитано (4.8)	K_U								
	A								
	A , Нп								

4. Работа над отчетом

1. Расчет теоретических АЧХ и ФЧХ фильтра при согласованной нагрузке проведите по формулам (4.10) и (4.11). Результаты занесите в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

f / f_c	0	0.1	0.3	0.5	0,7	1	3	5	7
$A, \text{Нп}$									
$\varphi_K,$ град (рад)									

2. Получите теоретические АЧХ и ФЧХ фильтра при $R_H = R_0$. Результаты занесите в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

f / f_c	0	0.1	0.3	0.5	0,7	1	3	5	7	10
K_U										
$\varphi_K,$ град (рад)										

5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение фильтра типа K .
2. В чем проблема согласования фильтра типа K с нагрузкой?
3. Какую форму имеет АЧХ коэффициента передачи фильтра на холостом ходу?
4. Как влияет сопротивление нагрузки на форму АЧХ коэффициента передачи фильтра?
5. Дайте определение характеристического сопротивления фильтра.
6. Чем отличаются фильтры нижних и верхних частот?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

1. Основные теоретические положения

Магнитной цепью называется совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны при помощи понятий магнитодвижущей силы (МДС) F , магнитного потока Φ и падения магнитного напряжения U_m . Магнитное поле создается электрическим током. Для характеристики магнитного поля можно использовать две величины. Первая, силовая характеристика – *вектор магнитной индукции* \vec{B} , [Тл] = [Вб/м²]. Вторая – *вектор напряженности магнитного поля* \vec{H} , [А/м]. Магнитная индукция и напряжённость поля связаны простым соотношением

$$H = \mu_a B. \quad (5.1)$$

Здесь: $\mu_a = \mu_0 \mu$, [Гн/м] – *абсолютная магнитная проницаемость*, характеризующая магнитные свойства вещества; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, [Гн/м] – *магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума)*; μ – *относительная магнитная проницаемость вещества* (для дерева, меди, алюминия $\mu \cong 1$; для ферромагнетиков, например, стали – $\mu \gg 1$).

Количественная связь между напряженностью магнитного поля и электрическим током устанавливается *законом полного тока*.

Закон полного тока

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_k I_k(l), \quad (5.2)$$

который гласит: линейный интеграл от вектора напряженности магнитного поля вдоль любого произвольного контура (замкнутого пути) l равен алгебраической сумме токов, охваченных этим контуром.

Закон полного тока является одним из основных законов, используемых для анализа магнитных цепей, из которого следует *второй закон Кирхгофа для магнитных цепей*. Разбивая контур интегрирования l ,

например, на два участка $l=l_1+l_2$, получаем разложение линейного интеграла в формуле (5.2) на составляющие:

$$\oint_{l=l_1+l_2} \vec{H} d\vec{l} = \int_{l_1} \vec{H} d\vec{l} + \int_{l_2} \vec{H} d\vec{l} = U_{M1} + U_{M2}, \quad (5.3)$$

где

$$U_{Mk} = \int_{l_k} \vec{H} d\vec{l} \quad (5.4)$$

есть падение магнитного напряжения вдоль пути интегрирования l_k , где $k=1,2$. Единица измерения U_{Mk} ампер, [А].

В случае, когда контур интегрирования охватывает W витков катушки (рис. 5.1), тогда (5.2) с учетом (5.3) и (5.4) примет вид:

$$U_{M1} + U_{M2} = IW, \quad (5.5)$$

где величина $F=IW$ – называется *магнитодвижущей силой*, а $U_{M1} + U_{M2} = U_M$ – падением магнитного напряжения вдоль замкнутого пути (контур интегрирования). Уравнение (5.5) выражает *второй закон Кирхгофа* для магнитной цепи цилиндрической катушки, изображенной на рис. 5.1, в которой контур обхода совпадает с магнитной линией.

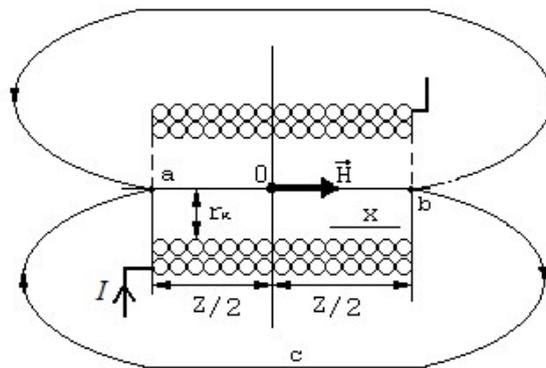


Рис. 5.1. Геометрия цилиндрической катушки и силовые магнитные линии:
путь aob есть l_1 ; путь bca есть l_2 .

Падение напряжения на каждом участке можно рассчитать по закону Ома для магнитных цепей

$$U_M = R_M \Phi. \quad (5.6)$$

Магнитное сопротивление на участке в однородном магнитном поле

вычисляется по формуле

$$R_M = \frac{l}{\mu\mu_0 S}, \quad (5.7)$$

где l – длина участка, μ – относительная магнитная проницаемость материала участка, μ_0 – магнитная постоянная, S – площадь поперечного сопротивления участка.

В формуле (5.6) магнитный поток Φ характеризует совокупное магнитное поле, пронизывающее поверхность S , численное значение которого можно определить на основе анализа магнитного состояния магнитных цепей. На рис. 5.2 представлено два варианта магнитной схемы замещения цилиндрической катушки с электрическим током.

В случае, когда магнитное поле на участке *однородное*, тогда *магнитный поток* вычисляется по формуле

$$\Phi = BS. \quad (5.8)$$

Здесь S – площадь поперечного сопротивления участка магнитной цепи, по которому проходит магнитный поток. На таком участке вычисление *падения магнитного напряжения* (5.4) упрощается

$$U_{Mk} = Hl. \quad (5.9)$$

При внесении в катушку незамкнутого ферромагнитного сердечника будет иметь место *перераспределение* падение магнитного напряжения вдоль силовой магнитной линии, между внутренней областью катушки, занятой сердечником, и внешней областью – воздушной средой, окружающей катушку.

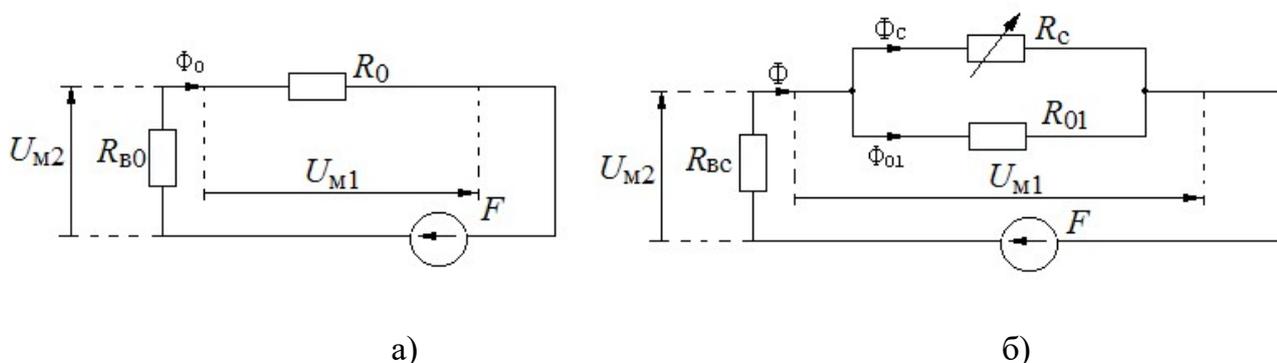


Рис. 5.2. Магнитные цепи катушки с сердечником:

а) для случая с немагнитным сердечником; б) для случая с магнитным сердечником

На рис. 5.2 представлены две магнитные схемы замещения цилиндрической катушки с током. Одна с немагнитным сердечником (из материала дерево, алюминий, медь), вторая с магнитным сердечником – из стали. На этих схемах используются следующие обозначения:

U_{M1} , U_{M2} – падения магнитных напряжений соответственно во внутренней области катушки и во внешней, воздушной среде;

R_{B0} , R_{Bc} – магнитные сопротивления внешней воздушной среды (по которой происходит замыкание полного магнитного потока катушки) соответственно с немагнитным сердечником и с магнитным сердечником;

R_c – магнитное сопротивление области, занимаемой стальным сердечником;

R_0 – магнитное сопротивление внутренней полости катушки с немагнитным сердечником;

R_{01} – магнитное сопротивление воздушной полости стального сердечника.

Отметим, что для случая на рис. 5.2,б напряженность магнитного поля H_c во внутренней области катушки, как в воздушной полости сердечника, так и в теле стального сердечника одинаковые (сердечник имеет форму полого цилиндра длиной Z).

Распределение магнитного поля во внутренней области катушки можно принять равномерным, тогда магнитные сопротивления R_0 , R_c , R_{01} на этом участке можно вычислить по формуле (5.7). При этом следует подставлять геометрические параметры (S_0 , S_c , S_{01} – площади поперечных сечений внутренней области катушки, сердечника и его воздушной полости соответственно) и магнитные параметры (μ_B , μ_c – относительные магнитные проницаемости немагнитных и стальных сред) соответствующих участков.

Магнитные сопротивления внешней, воздушной области катушки вычисляются по формулам [5]:

– для случая, соответствующего рис. 5.2, а

$$R_{B0} = \frac{2\sqrt{r_k^2 + Z^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{r_k}{Z} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r_k}{Z} \right)^2} \right]}{\mu_0 S_k}, \quad (5.10)$$

где $S_k = \pi r_{k.c.p.}^2$ – площадь поперечного сечения катушки, $r_{k.c.p.} = 0.5(r_k + r_{обм})$, $r_{обм}$ – наружный радиус обмотки, r_k – внутренний радиус обмотки (рис. 5.1);

– для случая, соответствующего рис. 5.2, б

$$R_{BC} = R_{B0} \cdot \left[\frac{S_c R_{01} + S_0 R_c}{S_k (R_{01} + R_c)} \right]. \quad (5.11)$$

В формуле (5.11) соответствующие магнитные сопротивления рассчитываются по формулам

$$R_0 = \frac{Z}{\mu_0 S_0}, \quad R_c = \frac{Z}{\mu_0 \mu_c S_c}, \quad R_{01} = \frac{Z}{\mu_0 S_{01}}, \quad (5.12)$$

где S_c – площадь поперечного сечения стального сердечника

$$S_c = \pi(r_c^2 - r_{01}^2), \quad (5.13)$$

S_{01} – площадь поперечного сечения воздушной полости в стальном сердечнике, r_c – внешний радиус стального сердечника, r_{01} – радиус полости сердечника, $S_0 = \pi r_{k.c.p.}^2$.

2. Цель и задачи лабораторной работы

Цель работы.

Уяснение закона полного тока – одного из важнейших законов теории магнитных цепей, а также первого и второго законов Кирхгофа для магнитных цепей.

Задачи исследования.

1. Экспериментально исследовать перераспределение падения магнитного напряжения между отдельными участками замкнутого пути, охватывающего обмотку катушки, при замене сердечников.

2. Проверить расчётом на основе составления и решения полной

системы алгебраических уравнений на основе законов Кирхгофа правомерность распределения падений магнитного напряжения по магнитным схемам замещения магнитной цепи цилиндрической катушки с электрическим током.

3. Лабораторное оборудование

1. Исследуемая катушка с числом витков W (рис 5.3).
2. Измерительная катушка с числом витков W_1 (рис.5.4).
3. Магнитный пояс (рис.5.5).
4. Автотрансформатор.
5. Амперметр для измерения тока до 1 А.
6. Вольтметр.
7. Ваттметр.

Исследуемая катушка. Обмотка катушки имеет W витков, уложенных в несколько слоев. Средний диаметр $d_{\text{ср.}}$ обмотки и число витков указаны на катушке. Внутри катушки может быть вложен как немагнитный, так и стальной цилиндрические сердечники. Сердечник имеет продольный цилиндрический осевой канал, в который вводится небольшая измерительная катушка, служащая для измерения напряженности магнитного поля. Цилиндрический сердечник довольно плотно входит в просвет каркаса исследуемой катушки. Точно также стержень с измерительной катушкой входит достаточно плотно в канал сердечника.

Для исключения влияния вихревых токов в стальном сердечнике делается продольный надрез. При необходимости стальной сердечник заменяют цилиндром из немагнитного материала, имеющим точно такую же форму.

Измерительная катушка. Обмотка измерительной катушки имеет W_1 витков тонкой изолированной проволоки, предназначенная для измерения *напряженности магнитного поля*. Эта катушка посажена на длинный стержень. Стержень имеет достаточную длину для того, чтобы

измерительную катушку можно вставлять в полость внутри сердечника исследуемой катушки. На стержне имеются деления в сантиметрах, дающие возможность определить положение измерительной катушки внутри сердечника. Средний диаметр и число витков измерительной катушки указаны на стержне.

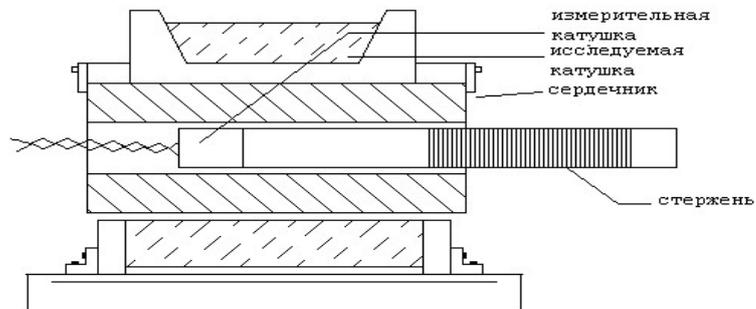


Рис.5.3. Лабораторная установка

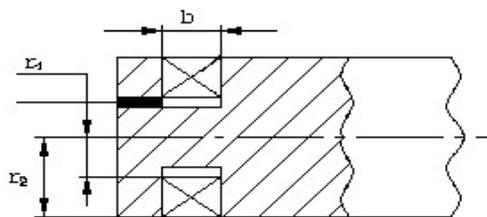


Рис. 5.4. Измерительная катушка

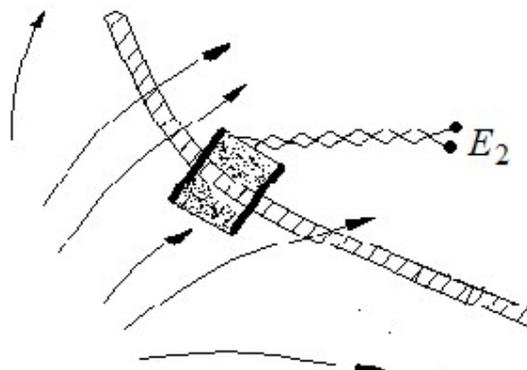


Рис. 5.5. Магнитный пояс

Магнитный пояс. Магнитный пояс используется для измерения падения магнитного напряжения. Магнитный пояс изготовлен из длинных цилиндрических резиновых шнуров, равномерно обмотанных в два слоя весьма тонкой изолированной проволокой (рис.5.5). Витки обмотки пояса

равномерно распределены по его длине и доходят до самых краев у конца шнура. На концах пояса обмотка хорошо проклеена лаком, вследствие чего крайние витки ее не могут сползть со шнура. В средней части пояса имеется колодка, к которой выведены концы обмотки пояса. Обмотка покрыта защитным слоем. Длина пояса вполне достаточна для охвата обмотки исследуемой катушки.

4. Описание методики измерения напряженности магнитного поля и падения магнитного напряжения

1. Измерение напряженности магнитного поля производят при помощи измерительной катушки. Измерительная катушка достаточно мала и можно считать, что магнитное поле в занимаемом ею пространстве всюду одинаково и равной напряженности в ее центре. На цилиндрическую катушку подается синусоидальный ток, поэтому её магнитный поток изменяется по синусоидальному закону, тогда напряженность магнитного поля H определяют по величине электродвижущей силы E_1 , индуктируемой в обмотке измерительной катушки. Действующее значение ЭДС равно:

$$E_1 = 4,44 \cdot \sqrt{2} f \psi$$

Здесь: $f = 50$ Гц – частота изменения потока; $\psi = W_1 \Phi$ действующее значение потокосцепления обмотки измерительной катушки.

Для удовлетворительного измерения ЭДС приходится применять катушку с большим числом витков и не очень малых размеров. Обмотка измерительной катушки имеет большое число слоев, а радиус r_1 внутреннего слоя заметно отличается от радиуса r_2 наружного слоя (рис. 5.4). Поэтому эффективное значение $S_1 = \frac{\pi}{3} (r_2^2 + r_1 r_2 + r_1^2)$ рассчитывается площади поверхности S_1 .

Итак,

$$E_1 = 4,44 \sqrt{2} f W_1 S_1 \mu_0 H$$

и

$$H_1 = E_1 K_1, \quad (5.14)$$

где

$$K_1 = (4,44\sqrt{2}fW_1S_1\mu_0)^{-1} \quad (5.15)$$

В опыте измеряется вольтметром ЭДС индукции E_1 и, вычислив коэффициент K_1 , по формуле (5.14) находятся *величины напряжённости магнитного поля* во внутренней области катушки W .

2. Для измерения падения магнитного напряжения используют магнитный пояс (рис. 5.5). Падение магнитного напряжения вдоль оси пояса пропорционально потокосцеплению $\psi_2(t)$ магнитного потока с обмоткой пояса. При переменном магнитном поле, когда потокосцепление $\psi_2(t)$ является синусоидальной функцией времени, для определения действующего значения потокосцепления ψ_2 *можно воспользоваться измерением ЭДС*, индуктируемой в обмотке пояса. Действующее значение ЭДС равно:

$$E_2 = 4,44 \cdot \sqrt{2} f \psi$$

Тогда формулу для определения действующего значения падения магнитного напряжения имеет вид

$$U_M = K_2 E_2. \quad (5.16)$$

Постоянная K_2 *определяется опытным путем*. Зафиксировав действующее значение синусоидального тока в катушке – равное I . Потом охватив поясом всю обмотку катушки по замкнутому контуру, измеряют действующее значение ЭДС E_2 в обмотке пояса. Постоянная K_2 находится по формуле

$$K_2 = IW / E_2. \quad (5.17)$$

5. Методические указания по проведению эксперимента

1. Рассчитать по формуле (5.15) коэффициент K_1 , по формуле (5.17) – коэффициент K_2 .

2. Собрать электрическую цепь (рис.5.6), частота тока $f = 50$ Гц.

Все экспериментальные исследования проводить *при токе* через катушку в 1А, при этом фиксируя *по одному разу* напряжение U на катушке и мощность P в цепи питания катушки.

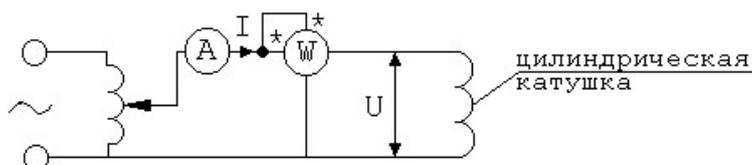


Рис. 5.6. Схема измерительного стенда

3. Произвести измерение ЭДС индукции при помощи магнитного пояса.

Измеряют следующие величины:

E_2 – действующее значение ЭДС индукции по замкнутому контуру;

E_{21} – действующее значение ЭДС индукции вдоль пути, проходящего внутри сердечника, между точками, лежащими на концах сердечника;

E_{22} – действующее значение ЭДС индукции вдоль пути, проходящего вне катушки, между точками, лежащими на концах сердечника.

В первом случае пояс продевают через канал сердечника и замыкают так, чтобы он охватывал всю обмотку катушки. Во втором случае пояс весь располагают вне катушки и оставляют незамкнутым, причем концы его должны примыкать к торцам сердечника. В третьем случае пояс вкладывают в канал сердечника так, чтобы один его конец оказался вровень с одним торцом сердечника, второй, выступающий конец пояса, изгибают и прикладывают к другому торцу сердечника.

Все перечисленные измерения производят один раз с немагнитным сердечником, другой – со стальным сердечником. Результаты занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

<i>Материал сердечника</i>	$E_{21},$ В	$U_{M1},$ А	$E_{22},$ В	$U_{M2},$ А	$E_2,$ В	$U_M,$ А	$U_M = (F_1 + F_2),$ А
<i>Немагнитный:</i> экспериментальные данные теоретические							
<i>Стальной:</i> экспериментальные данные теоретические							

4. Снять значения ЭДС индукции $E_1(x=0)$ посередине полости цилиндрической катушки только для случая с магнитным сердечником.

6. Методические указания по обработке опытных результатов

1. По формуле (5.16) заполнить табл.1.1.

2. По формуле (5.14) рассчитать напряженность магнитного поля $H(x=0)$ в полости цилиндрической катушки.

3. Рассчитать относительную магнитную проницаемость μ_c стального сердечника, пользуясь показаниями амперметра – I , вольтметра – U , ваттметра – P и данными эксперимента, выполненными в п.2 по рис. 5.6. Использовать методику, предложенную в п.8 (формула 5.22).

4. Провести расчет магнитных цепей по магнитным схемам замещения (рис.5.2) на основе первого и второго уравнения Кирхгофа. Вычислить магнитные потоки, падений магнитных напряжений U_M, U_{M1}, U_{M2} и занести их значения в таблицу 5.1.

Сопоставить экспериментальные и теоретические данные.

7. Содержание индивидуального отчета

1. Отчет по лабораторной работе содержит:

- титульный лист;
- цель работы и задачи исследования;
- рисунок цилиндрической катушки;
- таблицу конструктивных параметров используемых катушек;
- электрическую схему измерительного стенда;
- процедуру вычислений коэффициентов K_1 , K_2 и μ_c ;
- заполненную таблицу 5.1;
- процедуру расчета магнитных цепей по рис. 5.2 на основе уравнений Кирхгофа;
- выводы;
- приложить протокол эксперимента или его копию.

2. Выводы.

Выводы должны раскрывать содержание следующих вопросов.

1. Определения закона полного тока, первого и второго законов Кирхгофа для магнитных цепей;
2. Аналитическое обоснование механизма перераспределения ПМН U_{M1} и U_{M2} при замене сердечников в цилиндрической катушке.
3. Ответить на контрольные вопросы.

Приложение

8. Методика определения относительной магнитной проницаемости стального сердечника

Из рис. 5.2 следует, что осевой магнитный поток катушки распределяется между потоком, проходящим через сердечник Φ_c и через воздушную полость Φ_{01} , т.е.

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_{01} = \Phi_{01}(1 + R_{01}/R_c). \quad (5.17)$$

Подставляя в (5.17) формулы (5.12), получаем

$$\Phi = \Phi_{01}(1 + \mu_c S_c / S_{01}). \quad (5.18)$$

Действующее значение ЭДС индукции на катушке для гармонического воздействия связано с током следующей формулой [1]:

$$E = 2\pi f W \Phi = 2\pi f W (1 + \mu_c S_c / S_{01}) \Phi_{01}. \quad (5.19)$$

Ввиду того, что реальная катушка с сердечником обладает

эквивалентным активным сопротивлением r_{Π} , тогда приложенное в катушке напряжение U и ЭДС индукции E_K связаны соотношением:

$$E_K = \sqrt{U^2 - (Ir_{\Pi})^2}. \quad (5.20)$$

Сопротивление потерь r_{Π} вычисляется из измеренной активной мощности потерь P катушки по формуле:

$$r_{\Pi} = P/I^2. \quad (5.21)$$

Подставляя $\Phi_{01} = \mu_0 H_{01} S_{01}$ в (5.19), с учетом (5.20) и (5.21) получаем окончательную формулу для определения μ_c :

$$\mu_c = \frac{\sqrt{U^2 - (P/I)^2}}{2\pi^2 \mu_0 f W (r_c^2 - r_{01}^2) H(0)}. \quad (5.22)$$

где $H(0)$ – экспериментальное значение напряженности магнитного поля в точке $x = 0$ и при наличии магнитного сердечника.

9. Контрольные вопросы

1. Определить намагничивающую силу по контуру. Число витков катушек, токи в них и положительное направление обхода контура показаны на рис. 5.7,а.

2. Изменится ли падение магнитного напряжения по пути внутри катушки U_{abc} при введении внутрь катушки стального сердечника и почему? Остальные параметры катушки и ток в ней остались теми же, что и до введения сердечника, на рис. 5.7,б.

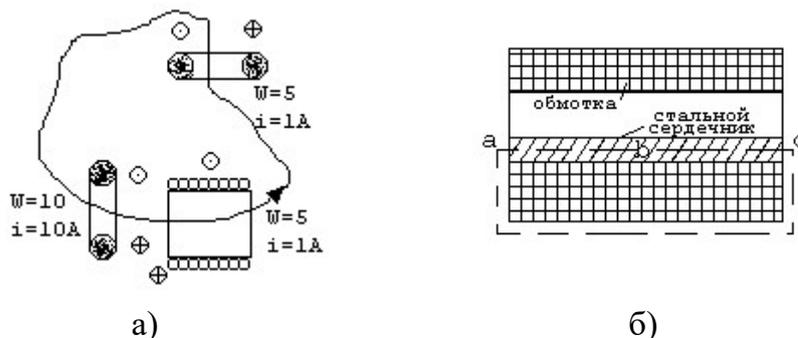


Рис. 5.7

3. Что такое магнитная индукция и напряженность поля ?

4. Что такое магнитная постоянная, абсолютная магнитная проницаемость и относительная магнитная проницаемость вещества?

5. Что такое магнитный поток?
6. Сформулировать закон полного тока?
7. Что такое МДС и её положительное направление?
8. Что такое падение магнитного напряжения?
9. Что такое магнитное сопротивление?
10. Сформулировать закон Ома и законы Кирхгофа для магнитных цепей?
11. Какова роль ферромагнитного материала для магнитных цепей?
12. Что такое магнитная цепь?

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет выполняется чернильной пастой черного или синего цвета на двойном тетрадном листе каждым студентом. Все схемы должны быть выполнены согласно стандартным обозначениям, вычерчены с применением необходимых чертежных принадлежностей.

Графики должны выполняться на миллиметровой бумаге того же формата, что и пояснительная записка. Для построения графика все расчетные и экспериментальные точки отчетливо отмечаются кружочками, точками и т.д. Векторные диаграммы, строящиеся по опытным данным, выполняются в масштабе, который указывается рядом с диаграммой.

Выбор масштаба графиков заключается в следующем:

- выбор поля графика, при этом экспериментальные точки не должны выходить за поле;
- масштаб должен быть простым, желательно десятичным, так как другие затрудняют подсчеты и построение.

Надписи на схемах и заполнение таблиц производится чернильной пастой.

Отчет заканчивается краткими выводами, в которых излагают основные результаты работы, проводят сравнение опытных и расчетных данных, анализируют полученные характерные зависимости и причины их обуславливающие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники /К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В.Л. Чечурин. т. 1,2. СПб.: Питер, 2006.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник.–11-е изд.– М.: Юрайт, 2013.
3. Методические указания к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники.Ч.2/сост. В.М. Петров, М.К. Казаков, С.А. Курганов, Е.Н.Меньшов, Я.Г. Бернштейн.– Ульяновск: УлГТУ, 2006.
4. Сборник задач по теоретическим основам электротехники /под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982.
5. Сборник задач по теоретическим основам электротехники /под ред. Л. А. Бессонова. – М.: Энергоиздат, 1988.
6. Исследование магнитного поля, Ч. 3 [Электронный ресурс] : метод. указания к лаб. работам по курсу ТОЭ и ОЭ / Меньшов Е. Н. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 384 Кб ; pdf.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ	4
Лабораторная работа №1. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....	5
Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....	10
Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ	16
Лабораторная работа №4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ.....	21
Лабораторная работа №5. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ.....	26
ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	40