

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
дневной формы обучения*



Могилев 2018

УДК 621.38
ББК 31.26
Т 33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «22» мая 2018 г.,
протокол № 10

Составители: канд. техн. наук, доц. А. Г. Старовойтов;
канд. физ.-мат. наук, доц. Ф. М. Трухачев

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации предназначены для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» дневной формы обучения к выполнению лабораторных работ по исследованию электрических цепей постоянного тока. Содержат схемы экспериментальных установок и методику проведения исследований.

Учебно-методическое издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Технический редактор	А. А. Подошевко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2018



Содержание

1 Инструктаж по технике безопасности при работе в лаборатории теоретических основ электротехники. Изучение лабораторного стенда и измерительной аппаратуры.....	4
2 Исследование соотношений в линейных электрических цепях постоянного тока.....	8
3 Исследование активного двухполюсника постоянного тока.....	11
4 Исследование пассивного двухполюсника в цепи переменного тока.....	14
5 Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях.....	16
6 Исследование электрических цепей с индуктивно связанными элементами.....	19
7 Исследование трёхфазной цепи, соединенной звездой.....	22
8 Исследование трёхфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником.....	25
9 Исследование линейных цепей несинусоидального периодического тока.....	27
10 Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с источниками постоянного напряжения.....	31
11 Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей.....	35
12 Исследование пассивных линейных четырехполюсников.....	37
13 Исследование электрических цепей с нелинейными резистивными сопротивлениями.....	40
14 Исследование катушки с магнитопроводом в цепи переменного тока.....	43
15 Исследование феррорезонансных цепей.....	45
Список литературы.....	48

1 Инструктаж по технике безопасности при работе в лаборатории теоретических основ электротехники. Изучение лабораторного стенда и измерительной аппаратуры

1.1 Порядок проведения лабораторных занятий

Каждое лабораторное занятие должно включать в себя следующие этапы.

1 Подготовка к работе (проводится студентом до начала лабораторного занятия).

1.1 Изучение теоретических сведений и примеров решения задач по теме занятия.

1.2 Подготовка необходимых материалов (заготовки отчета, таблиц, графиков и т. д.)

2 Допуск к лабораторной работе.

Проводится преподавателем после личной беседы с каждым студентом. Если в результате опроса выяснится неподготовленность студента по теме, он не допускается к работе и направляется на доработку материала. До окончания занятий студент должен находиться в лаборатории.

3 Выполнение лабораторной работы.

После допуска студенты приступают к выполнению лабораторной работы в соответствии с методическими рекомендациями. При выполнении работы следует обязательно соблюдать правила техники безопасности, с которыми должен ознакомиться каждый студент.

По окончании работы студент должен сообщить об этом преподавателю, после чего приступить к составлению отчета.

4 Оформление отчета и защита.

Отчет оформляется студентом индивидуально. Он должен содержать цель работы, задание, чертежи использованных и отработанных схем, расчетные формулы и результаты измерений, анализ результатов и полученных экспериментально зависимостей.

1.2 Техника безопасности при работе в лаборатории теоретических основ электротехники

Лабораторные занятия выполняются на лабораторных стендах. Перед сборкой схемы изучается оборудование, относящееся к работе, и составляется таблица применяемых приборов с указанием наименования, системы, класса точности прибора и цены деления шкалы.

При работе с электротехническим оборудованием соблюдают следующие меры безопасности.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по мерам безопасности с последующей проверкой знаний и зарегистрированные в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, за-



дание на которую выдал преподаватель.

3 Приступая к лабораторной работе, студент изучает методику ее выполнения.

4 Сборка электрической схемы для лабораторной работы, изменение в схеме производится при отключении питания лабораторного оборудования и переключения всех выключателей в положение «отключено».

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения лабораторной работы (осциллографы, измерительные комплекты, генераторы, электроизмерительные приборы), обязательно заземляется согласно требованиям завода-изготовителя, что проверяется преподавателем в обязательном порядке.

6 Включение питания оборудования для выполнения лабораторной работы производится только после разрешения преподавателя.

7 Включение лабораторного стенда и измерительных приборов в сеть производится только одной рукой, без прикосновений к металлическим частям и соседям.

8 При выполнении лабораторных работ в лаборатории запрещается:

- без разрешения преподавателя перемещать приборы и аппаратуру, выносить их из лаборатории;
- производить самостоятельно какие-либо работы по устранению неисправностей лабораторного оборудования;
- оставлять без присмотра лабораторные стенды и электроприборы, включенные в сеть;
- загромождать посторонними предметами рабочие места, находиться в лаборатории в верхней одежде.

9 При любой неисправности лабораторного оборудования студент немедленно отключает его от электросети и сообщает об этом преподавателю.

1.3 Изучение лабораторного стенда и измерительной аппаратуры

Комплект лабораторного оборудования представлен на рисунке 1.1. Он включает в себя функциональный генератор сигналов, осциллограф, макетную плату, устройство сбора данных, источник постоянного стабилизированного напряжения, ЭВМ со специализированным программным обеспечением.

Генератор сигналов функциональный Г6-46. Генератор Г6-46 является многофункциональным прибором, формирующим нормированные сигналы пяти форм в широком диапазоне частот, содержит цифровую индикацию частоты. Предназначен для исследования и испытания систем и приборов, используемых в промышленности, науке и образовании.

Основные технические характеристики генератора Г6-46.

Диапазон частот: от 0,1 Гц до 1 МГц.

Погрешность установки частоты: $\pm 1\%$.

Амплитуда сигнала:

- на нагрузке 600 Ом: не менее 5 В (размах 10 В);
- без нагрузки: не менее 10 В (размах 20 В).

Параметры сигнала синусоидальной формы:



– коэффициент гармоник в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц: не более 3 %.

Параметры сигнала прямоугольной формы:

– длительность фронта и среза: не более 100 нс;

– выбросы на вершине: не более 5 %;

– погрешность коэффициента заполнения: не более 5 %.

Параметры сигнала треугольной и пилообразной форм:

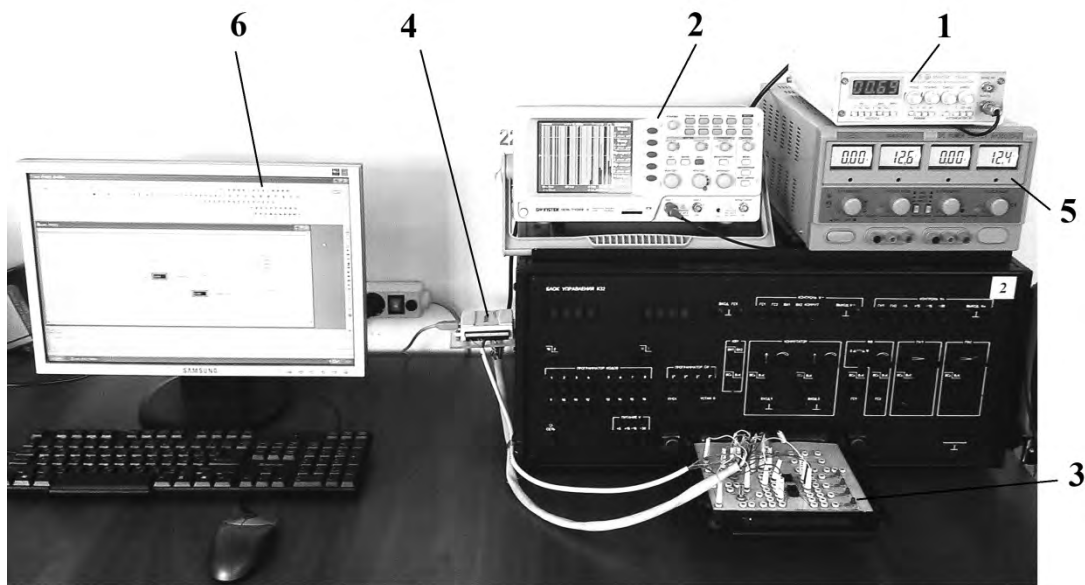
– нелинейность на уровне от 0,1 до 0,9 в диапазоне частот от 1 до 100 Гц: не более 1,5 %.

Параметры сигнала прямоугольной формы (уровень ТТЛ):

– время перехода из «1» в «0» и из «0» в «1»: не более 100 нс;

– напряжение «1»: не менее 2,4 В;

– напряжение «0»: не более 0,4 В.



1 – функциональный генератор сигналов Г6-46; 2 – осциллограф GDS-71022; 3 – макетная плата (МП); 4 – устройство сбора данных; 5 – источник постоянного стабилизированного напряжения НУ3002-D2; 6 – ЭВМ со специализированным программным обеспечением

Рисунок 1.1 – Внешний вид комплекта лабораторного оборудования

Осциллограф GDS-71022. Осциллограф предназначен для исследования формы и измерений амплитудных и временных параметров электрических сигналов. Область применения – контроль параметров, наладка и ремонт радиоэлектронной аппаратуры в лабораторных и производственных условиях.

Основные технические характеристики осциллографа GDS-71022.

Полоса пропускания: 20 МГц.

Количество каналов: 2.

Максимальная частота дискретизации: 250 МГц, эквив. 25 ГГц.

Объем памяти: 4 Кбайт на канал.

Автоматические и курсорные измерения.

Режимы растяжки, самописца и XY.

Синхронизация по длительности импульса и ТВ.

Режимы дискретизации: выборка, пиковый детектор (> 10 нс), усреднение (2/.../256).

Память: 15 осциллограмм, 15 профилей.

Интерфейсы: USB 2.0 для управления.

Слот SD (Secure Digital) для сохранения данных на карте памяти.

Цветной TFT-дисплей с регулируемой яркостью.

Источник постоянного стабилизированного напряжения NY3002-D2. NY3002-D2 имеет два канала регулируемого напряжения и тока. Прибор оснащён четырёхзначными ЖК-дисплеями. Выходное напряжение и ток отображаются одновременно. Обеспечивается ограничение тока и защита от короткого замыкания.

Основные технические характеристики NY3002-D2.

Выходное напряжение (регулируемое): (0...30 В)х2.

Выходной ток (регулируемый): (0...2 А) х2.

Точность индикатора напряжения: $\pm 1 \% \pm 2 D^*$.

Точность индикатора тока: $\pm 2 \% \pm 2 D^*$ (D – число значений единицы младшего разряда).

Влияние напряжения сети питания: постоянное напряжение $\leq 0,01 \% + 1$ мВ; постоянный ток $\leq 0,2 \% + 1$ мА.

Влияние нагрузки: постоянное напряжение $\leq 0,01 \% + 3$ мВ; постоянный ток $\leq 0,2 \% + 3$ мА.

Уровень пульсаций: постоянное напряжение $\leq 0,5$ мВ; постоянный ток ≤ 3 мА.

Устройство сбора данных (УСД) National Instruments USB-6009. УСД NI USB-6009 присоединяется к компьютеру посредством интерфейса full-speed USB и содержит восемь каналов ввода аналоговых сигналов (AI), два канала генерации аналоговых сигналов (AO), 12 каналов цифрового ввода/вывода (DIO) и 32-разрядный счетчик.

Устройство сбора данных USB 6009 содержит один аналого-цифровой преобразователь (АЦП – ADC), который выполняет дискретизацию аналогового сигнала, т. е. переводит его в цифровой код. Устройство USB-6009 может выполнять как однократное, так и многократное аналого-цифровое преобразование большого количества выборок. FIFO буфер служит для хранения получаемых данных во избежание их потери во время операции аналогового ввода.

Основные технические характеристики NI USB-6009.

Количество каналов ввода аналоговых сигналов: 8.

Количество каналов вывода аналоговых сигналов: 2.

Количество каналов цифрового ввода/вывода: 12.

Частота оцифровки сигналов: 48 кГц/канал.

Разрешение АЦП: 14 бит.

Диапазон входного напряжения: от ± 1 до ± 10 В.

Шина: USB.

ЭВМ. В лабораторном практикуме используется стандартный персональный компьютер с операционной системой Windows, установленным про-



граммным обеспечением для моделирования работы электронных устройств NI Multisim и сбора и обработки данных NI LabVIEW или выше.

Программное обеспечение для моделирования работы электронных устройств, сбора и обработки данных.

NI Multisim – это редактор схем и приложение для их симуляции, входящее в систему разработки электрических схем, в систему средств EDA (Electronics Design Automation), которые помогают в выполнении основных шагов в последовательной разработке схемы.

Multisim разработана для ввода схемы, симуляции и подготовки к следующему этапу – разводке платы.

NI LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) представляет собой среду графического программирования, предназначенную для создания прикладного программного обеспечения информационно-измерительных систем, а также различных компьютерных систем сбора и обработки экспериментальных данных.

Созданную в среде LabVIEW прикладную программу принято называть *виртуальным прибором* (ВП).

2 Исследование соотношений в линейных электрических цепях постоянного тока

Цель работы: изучение закономерностей в линейных цепях постоянного тока и экспериментальное подтверждение законов Кирхгофа, принципа наложения, свойства взаимности.

2.1 Задание для внеаудиторной подготовки

1 Ознакомиться со схемой, представленной на рисунке 2.1. Составить для нее уравнения по первому и второму законам Кирхгофа.

2 Записать для схемы (см. рисунок 2.1) зависимости для определения собственных и взаимных проводимостей расчетным путем.

2.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Исследуется разветвленная цепь, схема которой приведена на рисунке 2.1 и на лицевой панели стенда. Она содержит два источника питания (E_1 и E_2), набор резисторов типа МЛТ, три миллиамперметра, вольтметр магнитоэлектрической системы и штепсельные гнезда. Источники питания применяются в качестве источников постоянного напряжения, причем E_1 представляет собой выпрямительный мост, запитанный от сети 36 В переменного тока, а E_2 – мост, запитанный от сети через ЛАТР 0...220 В таким образом, что E_2 может изменяться плавно в пределах 0...80 В. При помощи тумблеров S_1 и S_2 источники напряжения E_1 и E_2 могут



либо включаться в цепь (тумблеры в положении 1), либо замыкаться на «коротко» (тумблеры в положении 2).

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Измерить величину ЭДС первого источника, установить значение E_2 равным E_1 .

2.3.2 Собрать схему (см. рисунок 2.1).

2.3.3 Измерить токи в ветвях схемы, потенциалы точек b, c, d, e, f относительно точки a и напряжения на каждом из участков цепи с учетом знаков, принимая во внимание, что разность потенциалов U_{xy} считается положительной, если $\varphi_x - \varphi_y > 0$. Используя результаты измерений, по закону Ома рассчитать сопротивления участков схемы и внутренние сопротивления источников напряжения. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.1.

2.3.4 По данным измерений п. 2.3.3 определить алгебраическую сумму падений напряжений на участках контура, содержащего E_1 и E_2 , и сравнить ее с алгебраической суммой ЭДС. Для этого же контура, используя таблицу 2.1, построить потенциальную диаграмму.

2.3.5 Определить на основании потенциальной диаграммы напряжение U_{ad} , а также токи I_1 и I_2 и сравнить их с измеренными.

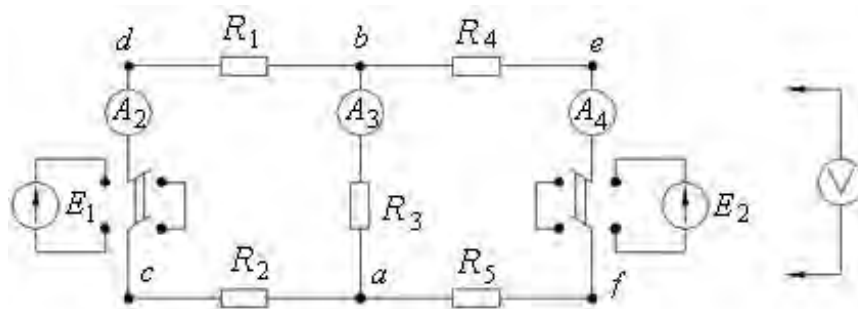


Рисунок 2.1 – Схема для исследования линейной цепи постоянного тока

2.3.6 Поочередно переключая S_1 либо S_2 в положение 2, т. е. исключая из схемы (см. рисунок 2.1) ЭДС E_1 или E_2 , измерить значения токов в ветвях. Результаты занести в таблицу 2.2 с учетом знаков, принимая за условно положительное направление токов. Суммировать частичные токи от E_1 и E_2 и убедиться в достоверности метода наложения сравнением с результатами измерений при действии двух источников (см. таблицу 2.1).

2.3.7 На основании экспериментальных данных п. 2.3.6 вычислить собственные g_{11} и g_{22} и взаимные $g_{21}, g_{32}, g_{31}, g_{12}$ проводимости. Используя значения проводимостей, рассчитать ток I_1 и сравнить его с измеренным (см. таблицу 2.1). Определить собственную g_{11} и взаимную g_{21} проводимости расчетным путем и сравнить их с полученными экспериментально величинами. Результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.1 – Результаты измерений, расчетов и моделирования

Измерено																
E_1 , В	E_2 , В	φ_b , В	φ_c , В	φ_d , В	φ_e , В	φ_f , В	U_{ab} , В	U_{ac} , В	U_{bd} , В	U_{be} , В	U_{ef} , В	U_{dc} , В	U_{fa} , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Продолжение таблицы 2.1

Рассчитано								
R_{ab} , Ом	R_{bc} , Ом	R_{bd} , Ом	R_{df} , Ом	R_{ce} , Ом	$R_{вн1}$, Ом	$R_{вн2}$, Ом	ΣE , В	ΣIR , В

Продолжение таблицы 2.1

Промоделировано		
I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Таблица 2.2 – Результаты измерений и расчетов

Измерено								Рассчитано		
E_1 , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	E_2 , В	I_1'' , А	I_2'' , А	I_3'' , А	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Таблица 2.3 – Результаты расчета проводимостей

g_{11} , Ом ⁻¹	g_{22} , Ом ⁻¹	g_{21} , Ом ⁻¹	g_{31} , Ом ⁻¹	g_{32} , Ом ⁻¹	g_{12} , Ом ⁻¹	I_1 , А

2.3.8 Убедиться в достоверности принципа взаимности, сравнивая значение тока I_2' при действии ЭДС E_1 и значение тока I_1'' при действии ЭДС E_2 , учитывая, что E_1 принято равным E_2 .

2.3.9 Составить баланс мощности для цепи, используя полученные результаты (см. таблицу 2.1).

2.3.10 Построить модель схемы (см. рисунок 2.1) в *Multisim* согласно п. 2.3.3, используя известные значения E_1 и E_2 и рассчитанные в таблице 2.1 значения сопротивлений участков цепи, включая внутренние сопротивления источников. Сравнить результаты моделирования токов I_1 , I_2 , I_3 с их измеренными значениями.

Содержание отчета

Отчет о выполненной работе должен содержать цель работы, схему для проведения экспериментов, таблицу экспериментальных и расчетных данных, расчетные формулы, потенциальную диаграмму, анализ результатов.



Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте определение узла, ветви и контура электрической цепи.
- 2 Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа и порядок расчета цепи с их применением.
- 3 На каком принципе основан метод наложения?
- 4 Поясните, что такое собственные и взаимные проводимости ветвей и каким образом они определяются экспериментально.
- 5 Расчет цепи методом наложения.
- 6 Сформулируйте принцип взаимности.

3 Исследование активного двухполюсника постоянного тока

Цель работы: исследование режимов работы электрической цепи, представленной активным двухполюсником, условий передачи энергии от активного двухполюсника нагрузке, определение параметров схемы замещения активного двухполюсника эквивалентным генератором.

3.1 Задание для внеаудиторной подготовки

3.1.1 Изучить разделы курса «Двухполюсники» и «Метод активного двухполюсника».

3.1.2 Изобразить схему для проведения экспериментов (рисунок 3.1), привести основные расчетные формулы для аналитического определения в ней тока I_2 методом эквивалентного генератора и методом эквивалентного источника тока и изобразить расчетные схемы для обоих случаев, считая выделенной ветвью ветвь $afeb$ экспериментальной схемы.

3.1.3 Составить самостоятельно схемы для экспериментального определения напряжения U_{xhav} холостого хода и тока короткого замыкания I_{kav} активного двухполюсника (см. рисунок 3.1).

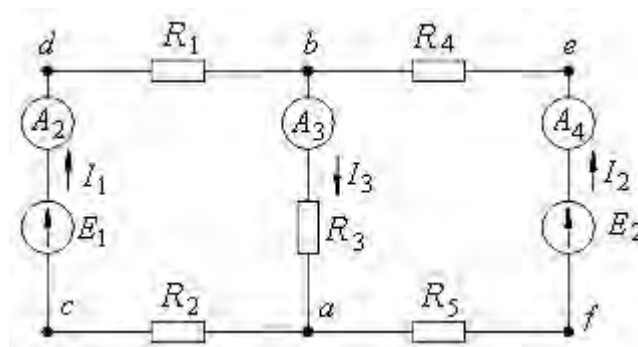


Рисунок 3.1 – Схема для экспериментального исследования метода активного двухполюсника

3.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде (УЛС). Для экспериментальной оценки метода активного двухполюсника используется та же схема УЛСа, что и в лабораторной работе № 2 (см. рисунок 3.1). Для исследования условий передачи энергии от активного двухполюсника нагрузке на УЛСе используется последовательная цепь, состоящая из источника питания E_3 , линии электропередач $R_{л} = R_6 + R_7$ и сопротивления нагрузки (рисунок 3.2). В состав активного двухполюсника здесь следует включить источник E_3 и линию $R_{л}$, т. е. 2–2 – это выходные зажимы активного двухполюсника, к которым подключен пассивный двухполюсник, являющийся нагрузкой. В качестве нагрузки используется набор сопротивлений R_{17} .

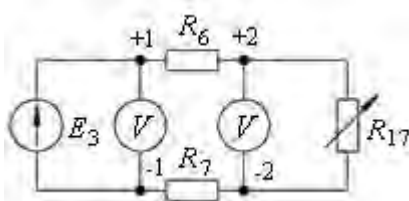


Рисунок 3.2 – Схема для исследования линии электропередач

3.3 Порядок выполнения работы

3.1.1 Экспериментально исследовать эффективность применения метода активного двухполюсника для анализа состояния электрической цепи на примере схемы (см. рисунок 3.1), считая выделенной ветвь $afeb$ с током I_2 или любую из ветвей схемы по указанию преподавателя.

3.1.1.1 Измерить токи и ЭДС в схеме (см. рисунок 3.1). Для измерения ЭДС предварительно разорвать цепь в точках c и f .

3.1.1.2 Изобразить пунктиром на схеме активный двухполюсник, к которому подключена выделенная ветвь.

3.1.1.3 Из опытов холостого хода и короткого замыкания рассматриваемого активного двухполюсника определить U_{xx} , I_k , и R_{ex} .

3.1.1.4 Используя результаты эксперимента, найти ток нагрузки I_n (ток в выделенной ветви). Результаты занести в таблицу 3.1.

3.1.2 Исследовать условия передачи энергии от активного двухполюсника нагрузке по схеме (см. рисунок 3.2). Для этого, изменяя сопротивление нагрузки R_{17} от бесконечности (х. х) до нуля (к. з), измерить ток I , напряжение U_1 на входе линии и напряжение U_2 на зажимах нагрузки (нужны 5...6 точек). Результаты занести в таблицу 3.2.

3.1.3 По данным измерений на одном рисунке построить кривые напряжения и мощности на входе линии, мощности потерь в линии, напряжения и мощности на нагрузке, КПД передачи энергии в функции тока линии, т. е. U_1 , P_1 , ΔP , U_2 , P_2 , $\eta(I)$. Соответствующие величины рассчитать и занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

Измерено						Рассчитано		
I_1, A	I_2, A	I_3, A	E_1, B	E_2, B	U_{xx}, B	I, A	$R_{ax}, Ом$	$I_2 = I_n, A$

Продолжение таблицы 3.2

Промоделировано						
I_1, A	I_2, A	I_3, A	E_1, B	E_2, B	U_{xx}, B	I, A

3.1.4 Определить параметры активного двухполюсника и занести в таблицу 3.2.

3.1.5 Используя графики, проанализировать режимы работы активного двухполюсника.

3.1.6 Построить модель схемы (см. рисунок 3.1) в *Multisim*. Сравнить результаты моделирования и измерения электротехнических величин.

Таблица 3.2 – Таблица результатов эксперимента и расчетов

Измерено			Рассчитано						
I, A	U_1, B	U_2, B	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$\Delta P, Вт$	η	$R_{1-2}, Ом$	$R_{ax}, Ом$	U_{xx}, B

Содержание отчета

Отчет о выполненной работе должен содержать цель работы, схемы активного двухполюсника и для исследования линии электропередач, таблицы результатов измерений и расчетов, основные расчетные формулы, построенные по результатам эксперимента зависимости от тока в линии электропередачи величин напряжения и мощности на ее входе, напряжения и мощности на нагрузке и КПД линии, а также анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение двухполюсника электрической цепи.
- 2 Назвать режимы работы активного двухполюсника.
- 3 Каким образом определяются обобщенные параметры активного двухполюсника?
- 4 Привести схемы замещения активного двухполюсника эквивалентным генератором и эквивалентным источником тока, а также формулы перехода от одной схемы к другой.
- 5 Изложить теоремы об эквивалентном генераторе и об эквивалентном источнике тока.

6 Привести методику расчета тока I_3 в схеме (см. рисунок 3.1) методом эквивалентного генератора.

4 Исследование пассивного двухполюсника в цепи переменного тока

Цель работы: экспериментальная проверка основных положений теории линейных электрических цепей синусоидального тока и анализ разветвлённых электрических цепей с помощью векторных диаграмм.

4.1 Задание для внеаудиторной подготовки

Изучить раздел ТОО «Пассивные двухполюсники в цепях переменного тока». Привести схемы проведения эксперимента и ответить на контрольные вопросы.

4.2 Описание лабораторной установки

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде (УЛС). Для исследования используются элементы: резистивный, катушка индуктивности, конденсатор.

Схема исследования цепи создаётся путём подключения к выходным зажимам автотрансформатора, установленного на стенде, либо каждого из указанных элементов в отдельности, либо многоэлементной электрической цепи.

Для измерения токов, напряжений и мощностей используются приборы электромагнитной и электродинамической систем.

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Определить параметры одноэлементных пассивных двухполюсников, для чего измерить токи, напряжения и мощности при подключении к зажимам $a-b$ схемы (см. рисунок 4.1, a) поочередно двухполюсников (см. рисунок 4.1, b – $г$), и выполнить их расчёт. Результаты занести в таблицу 4.1.

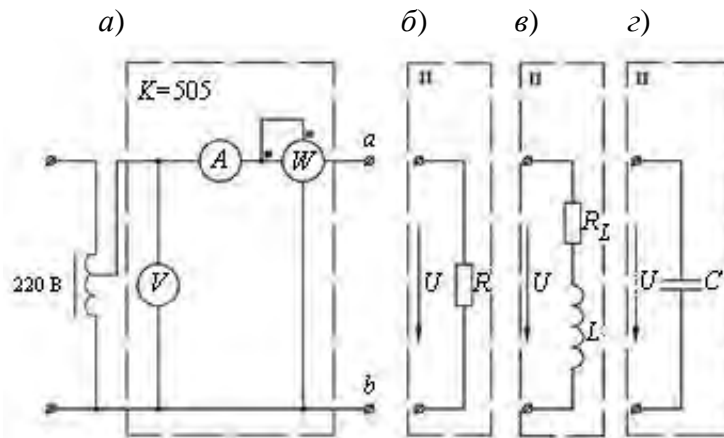


Рисунок 4.1 – Схема для исследования пассивных двухполюсников

Таблица 4.1 – Таблица экспериментальных и расчётных данных

Вид двухполюсника	Измерено			Расчитано					
	I, A	U, B	$P, Bт$	$R, Ом$	$Z, Ом$	$X, Ом$	$\varphi, град$	$L, Гн$	$C, мкФ$
R									
L									
C									

Проанализировать, возможно ли пренебречь в двухполюсниках L и C активной составляющей полного сопротивления.

Для каждого из двухполюсников построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений.

4.3.2 По экспериментальным данным (см. таблицу 4.1) построить векторную диаграмму токов и напряжений исследуемой цепи и проверить соответствие векторной диаграммы законам Кирхгофа.

4.3.3 Определить по результатам измерений входные полное, активное и реактивное сопротивление или полную, активную и реактивную проводимости исследуемой цепи, а также угол сдвига фаз между напряжением и током на входе. Те же параметры рассчитать аналитически, используя сопротивления элементов, полученные в п. 4.3.1 (см. таблицу 4.1). Результаты расчётов занести в таблицы 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Таблица измерений и расчётных данных

Расчитано по показаниям приборов				Расчитано по известным сопротивлениям ветвей		
$R, Ом$	$Z, Ом$	$X, Ом$	$\varphi, град$	$R, Ом$	$X, Ом$	$\varphi, град$

Таблица 4.3 – Таблица измерений и расчётных данных

Расчитано по показаниям приборов				Расчитано по известным сопротивлениям ветвей		
$g, См$	$y, См$	$b, См$	$\varphi, град$	$g, См$	$b, См$	$\varphi, град$

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель работы, схемы исследуемых цепей, перечень измерительных приборов с указанием типа прибора, его системы, пределов измерения, таблицы с результатами измерений и вычислений, векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей с указанием принятых масштабов токов и напряжений, анализ результатов, полученных расчётным и опытными методами, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение пассивного и активного двухполюсников в цепи переменного тока.
- 2 Как экспериментально определить параметры пассивного двухполюсника в цепи переменного тока?
- 3 Что понимают под активной, реактивной и полной мощностью? Назовите единицы их измерения.
- 4 Приведите формулы для расчёта активных и реактивных проводимостей и сопротивления цепи синусоидального тока.
- 5 В каких пределах может изменяться угол сдвига фаз между напряжением на входе и током для цепи R, L и для цепи R, C ?
- 6 Приведите векторные диаграммы простейших двухполюсников в цепи переменного тока.

5 Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях

Цель работы: экспериментальное исследование и проверка основных теоретических положений, характеризующих резонансные явления в цепях переменного тока.

5.1 Задание для внеаудиторной подготовки

Изучить разделы курса ТОЭ, рассматривающие расчёты цепей синусоидального тока и резонансный режим в них. Записать соотношения параметров цепи в режиме резонанса при последовательном и параллельном соединениях элементов R, L, C . Качественно изобразить векторные диаграммы и частотные характеристики $U(\omega), I(\omega), Z(\omega), \varphi_3(\omega)$ и выполнить их анализ.

5.2 Описание лабораторной установки

В работе используются резистивный R , индуктивный L элементы и набор конденсаторов C , расположенных на передней панели УЛС. Питание цепи осуществляется от автотрансформатора ($U = 0 \dots 250$ В, $f = 50$ Гц), установленного на стенде. Измерение электрических величин производится приборами электромагнитной и электродинамической систем.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Экспериментально определить параметры катушки индуктивности и конденсатора на основании показаний приборов по схеме (рисунок 5.1). Результаты занести в таблицу 5.1.



Таблица 5.1 – Таблица измерений и расчётных данных

Вид элемента	Измерено					Расчитано						
	I , А	U , В	U_1 , В	U_2 , В	P , Вт	Z , Ом	R_1 , Ом	X , Ом	φ , град	R_k , Ом	L_k , Гн	C , мкФ
Индуктивность L												
Ёмкость C												

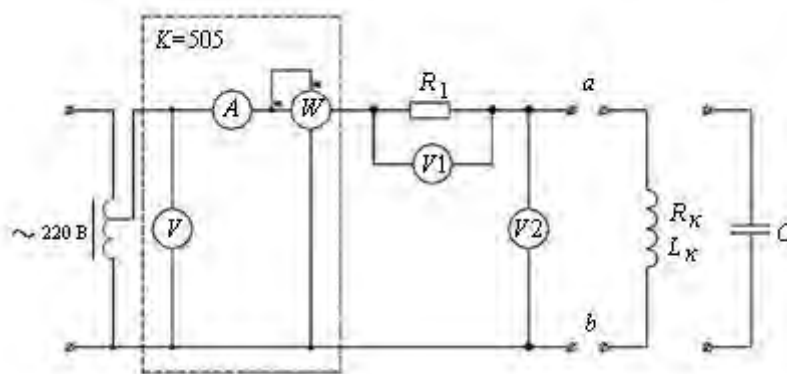


Рисунок 5.1 – Схема исследуемой цепи

Расчитать резонансную ёмкость $C_0 = \frac{1}{\omega_0^2 L}$.

5.3.2 Исследовать резонанс при последовательном соединении R , L , C (резонанс напряжений) (рисунок 5.2).

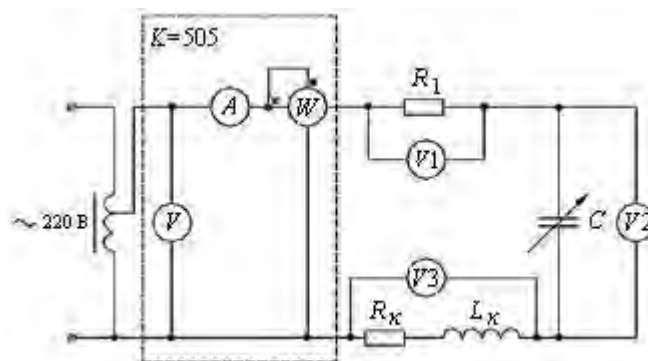


Рисунок 5.2 – Схема для исследования резонанса напряжения

Поддерживая напряжение на входе $U = \text{const}$, изменять величину ёмкости. Начиная от $C = 0$ до $C = C_{\text{max}}$, экспериментально найти ёмкость, при которой ток достигает максимума, а угол сдвига фаз $\varphi \approx 0$. Рассчитать $\cos \varphi$ для резонанса. Если $\cos \varphi$ окажется меньше, чем 0,92...0,97, то опыт следует повторить и точнее настроить схему в резонансе. Полученные данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Таблица измерений и расчётных данных

Номер опыта	C , мкФ	Измерено						Расчитано				
		U , В	I , А	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	P , Вт	Z , Ом	φ , град	Q_C , вар	Q_L , вар	S , В·А
1												
2												
...												
n												

5.3.3 Исследовать резонанс при параллельном соединении R , L , C (резонанс токов), изменяя ёмкость конденсаторов в цепи (рисунок 5.3).

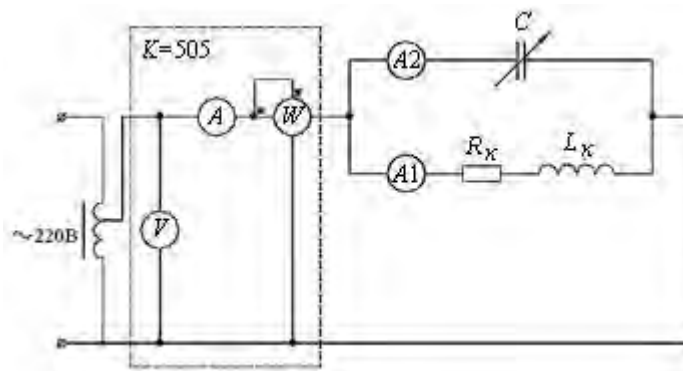


Рисунок 5.3 – Схема для исследования резонанса токов

5.3.4 По данным экспериментов (см. таблицы 5.1 и 5.2) построить графики: $U(C)$, $I(C)$, $U_L(C)$, $U_C(C)$, $I_k(C)$, $I_C(C)$, $P(C)$.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель работы, схемы экспериментов, таблицы опытных и расчетных данных, векторные диаграммы для трёх режимов цепи: резонансного, до и после резонанса, частотные характеристики, анализ результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Каково общее условие возникновения резонанса в электрической цепи?
- 2 В каких цепях возникает резонанс напряжений и резонанс токов?
- 3 Что такое волновое сопротивление контура и как можно его определить на основании эксперимента?
- 4 Что такое добротность цепи и как она определяется, если известны параметры цепи R , L , C ?
- 5 Какой вид имеют частотные характеристики последовательного и параллельного резонансных контуров?

6 Почему при резонансе напряжений ток в цепи достигает наибольшего значения?

7 Как меняется характер полного сопротивления цепи при изменении частоты от нуля до бесконечности?

6 Исследование электрических цепей с индуктивно связанными элементами

Цель работы: изучение явлений в индуктивно связанных электрических цепях. Экспериментальное определение параметров индуктивно связанных элементов цепи.

6.1 Задание для внеаудиторной подготовки

6.1.1 Изучить разделы курса ТОЭ, в которых рассматриваются электрические цепи с взаимной индукцией.

6.1.2 Написать формулы для определения токов в цепи при последовательном и параллельном включениях индуктивно связанных катушек.

6.1.3 Вывести формулы для определения собственной индуктивности L и взаимной индуктивности M .

6.1.4 Для схем (рисунки 6.1 и 6.3) составить уравнения по второму закону Кирхгофа при согласном и встречном включениях обмоток.

6.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. При исследовании используются амперметры и вольтметры электромагнитной системы, ваттметр электродинамической системы, автотрансформатор, измерительный комплекс К505, индуктивные катушки.

6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Для определения параметров индуктивных катушек собрать схему согласно рисунку 6.1.

Измерить ток, напряжение и мощность для каждой из катушек, установив заданное напряжение на входе.

6.3.2 По данным измерений п. 6.3.1 вычислить параметры катушек, используя следующие зависимости:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad L = \frac{X}{\omega}; \quad \varphi = \arccos \frac{P}{UI}.$$

Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 6.1.



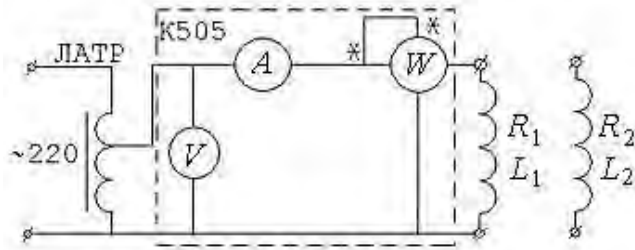


Рисунок 6.1 – Определение параметров катушек

Таблица 6.1 – Таблица опытных расчетных данных

Номер катушки	Измерено			Вычислено				
	U , В	I , А	P , Вт	R , Ом	X , Ом	L , Гн	φ , град	Z , Ом
1								
2								

6.3.3 Собрать схему (рисунок 6.2) для исследования последовательного соединения индуктивно связанных катушек.

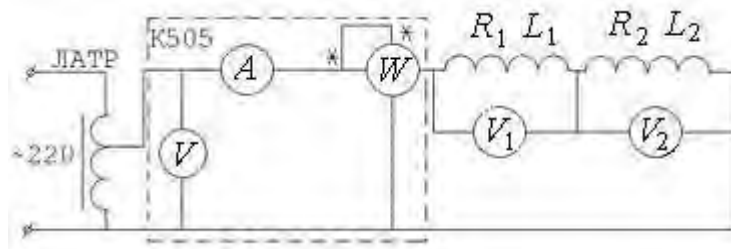


Рисунок 6.2 – Последовательное включение катушек

Произвести измерения тока, мощности и напряжения для согласного и встречного включений катушек при заданном значении входного напряжения.

По результатам измерений определить модуль Z и аргумент φ полного сопротивления \underline{Z} цепи, активное R и реактивное X сопротивления, взаимное сопротивление X_M и взаимную индуктивность M , а также коэффициент магнитной связи K .

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Таблица опытных и расчетных данных

Соединение	Измерено					Вычислено					
	U , В	I , А	U_1 , В	U_2 , В	P , Вт	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	M , Гн	K	φ , град
Согласное											
Встречное											

Способ включения катушек индуктивности и их одноименные зажимы определяются по значению тока при $U_{BX} = \text{const}$.

6.3.4 Используя данные таблиц 6.1 и 6.2, построить векторные диаграммы токов и напряжений для согласного и встречного включений катушек. Сопоставить результаты расчета X_{Σ} из опыта и по формуле

$$X_{\Sigma} = X_1 + X_2 \pm 2X_M.$$

6.3.5 Исследовать цепь при параллельном соединении индуктивно связанных катушек по схеме (см. рисунок 6.3).

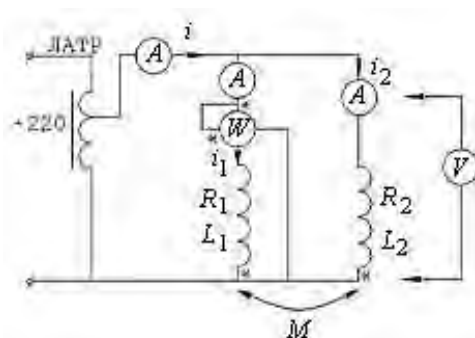


Рисунок 6.3 – Параллельное включение

Поддерживая постоянной величину тока в ветви с ваттметром, произвести необходимые измерения для случаев согласного и встречного включений катушек. По данным измерений рассчитать эквивалентные полное Z_{Σ} , активное R_{Σ} и реактивное X_{Σ} сопротивление цепи, эквивалентные полные сопротивления $Z_{\Sigma 1}, Z_{\Sigma 2}$ каждой из катушек, активную мощность P_M , передаваемую катушками друг другу за счет потока взаимной индукции, по формуле

$$P_M = \frac{P_{1\text{СОГЛ}} - P_{2\text{СОГЛ}}}{2},$$

угол сдвига между токами \dot{I}_1 и \dot{I}_2 для согласного и встречного включений и углы φ_1 и φ_2 сдвига между \dot{U} и токами \dot{I}_1 и \dot{I}_2 соответственно. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.3.

6.3.6 По данным таблицы 6.3 построить векторные диаграммы в комплексной плоскости для обоих рассматриваемых случаев.

6.3.6 По данным таблицы 6.3 построить векторные диаграммы в комплексной плоскости для обоих рассматриваемых случаев.

Таблица 6.3 – Таблица опытных и расчетных данных

Соединение	Измерено					Вычислено								
	U , В	I , А	I_1 , А	I_2 , А	P_1 , Вт	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	P_M , Вт	$Z_{\Sigma 1}$, Ом	$Z_{\Sigma 2}$, Ом	φ_1 , град	φ_2 , град	$(\varphi_1 - \varphi_2)$, град
Согласное														
Встречное														

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы экспериментов, перечень измерительных приборов с указанием типа прибора, его системы, пределов измерения, таблицы опытных и расчетных данных, векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи с указанием принятых масштабов токов и напряжений, анализ результатов, полученных расчетным и опытным методами, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие элементы электрической цепи называются индуктивно связанными?
- 2 От каких факторов зависит взаимная индуктивность двух катушек? Как определяется знак взаимной индуктивности?
- 3 Что такое коэффициент связи двух катушек? В каких пределах изменяется его величина?
- 4 Что такое согласное и встречное включения индуктивно связанных катушек?
- 5 Как влияет индуктивная связь на эквивалентные реактивные сопротивления катушек при последовательном и встречном включениях?

7 Исследование трёхфазной цепи, соединенной звездой

Цель работы: исследование трехфазной цепи при соединении звездой с нулевым проводом и без него при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.

7.1 Задание для внеаудиторной подготовки

7.1.1 Изучить раздел ТОО «Трехфазные цепи» и теоретические сведения к данной работе.

7.1.2 Записать соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении звездой симметричной нагрузки и в общем случае.

7.1.3 Определить с помощью векторной диаграммы значение тока в нулевом проводе при симметричной нагрузке.

7.1.4 Изобразить векторную диаграмму напряжений и токов при соединении несимметричной нагрузки звездой без нулевого провода.

7.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. При исследовании активно-реактивной нагрузки в одну из фаз последовательно с сопротивлением включается индуктивность L или емкость C . Для измерения токов, напряжений и мощности используются приборы электромагнитной и электродинамической систем.



7.3 Порядок выполнения работы

7.3.1 Собрать схему (рисунок 7.1) при соединении нагрузки звездой с нулевым проводом.

7.3.2 Установить симметричную (активную) нагрузку во всех трех фазах. Измерить линейные и фазные напряжения в цепи, напряжение между нулевыми точками, линейные токи и ток в нулевом проводе, мощности фаз.

Так как нагрузка активная, то мощности в фазах также несут активный характер и могут быть также легко вычислены ($P_\phi = U_\phi I_\phi$). Результаты измерений записать в таблицу 7.1.

Проверить получившиеся соотношения линейных и фазных напряжений.

7.3.3 Исследовать цепь при несимметричной нагрузке. Для этого оставить нагрузку в двух фазах *B* и *C* неизменной, а в третьей фазе *A* изменять нагрузку следующим образом:

- увеличить активную нагрузку (несимметричная нагрузка);
- отключить полностью нагрузку ($R_a = \infty$, обрыв фазы *a*);
- отключить линейный провод (обрыв линии *A*).

Для всех указанных случаев измерить те же величины, что и в п. 7.3.2.

7.3.4 Отключить нулевой провод.

Произвести те же измерения для симметричной и несимметричной нагрузок, что и в пп. 7.3.2 и 7.3.3, дополнив их опытом короткого замыкания фазы *a*.

7.3.5 Подключить в одну из фаз нагрузки последовательно с сопротивлением *R* реактивный элемент *L* или *C*, не изменяя нагрузку в двух других фазах. Измерить те же величины, что и в п. 7.3.2.

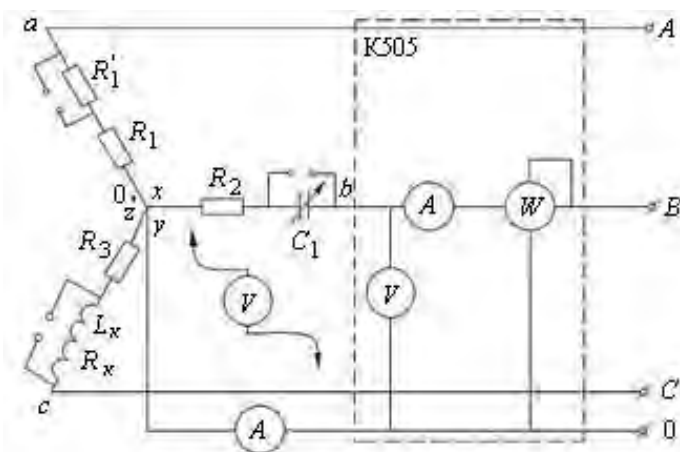


Рисунок 7.1 – Схема для исследования трёхфазной цепи при соединении нагрузки звездой

Результаты измерений пп. 7.3.3–7.3.5 занести в таблицу 7.1.

7.3.6 Согласно результатам п. 7.3.5 вычислить комплексные фазные сопротивления потребителя. Записать уравнения и вычислить аналитически в символической форме токи в цепи. Результаты вычислений занести в таблицу 7.2. Сравнить расчетные и экспериментальные значения токов.

Таблица 7.1 – Таблица опытных и расчетных данных

Измерено												Вычислено			Характер нагрузки	
U_L , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_N , А	$U_{o'o}$, В	P_A , Вт	P_B , Вт	P_C , Вт	P_Σ , Вт	$\frac{U_{\hat{e}}}{U_{\hat{A}}}$	$\frac{U_{\hat{e}}}{U_{\hat{A}}}$		$\frac{U_{\hat{e}}}{U_{\hat{N}}}$

Таблица 7.2 – Таблица результатов расчета

Z_A , Ом	Z_B , Ом	Z_C , Ом	I_A , А	I_B , А	I_C , А	$U_{o'o}$, В

7.3.7 По данным таблицы 7.1 построить топографические диаграммы напряжений и диаграммы токов в различных режимах.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы экспериментов, перечень измерительных приборов с указанием типа прибора, его системы, пределов измерения, таблицы опытных и расчетных данных, векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи с указанием принятых масштабов токов и напряжений, анализ результатов, полученных расчетным и опытным методами, выводы.

Контрольные вопросы

1 Что называется многофазной системой электрической цепи? Какие Вы знаете способы соединения фаз источника ЭДС и нагрузки в трехфазной цепи?

2 Какая симметричная система напряжений (токов) является системой прямой последовательности, а какая – обратной последовательности?

3 Каковы соотношения между фазными, линейными токами и напряжениями при соединении звездой в общем случае и при симметричной нагрузке?

4 Какова роль нулевого провода?

5 Как определить аналитически напряжение между нулями генератора и приемника? Как определить фазные напряжения приемника?

8 Исследование трёхфазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником

Цель работы: исследование электрической цепи при соединении фаз нагрузки треугольником в симметричном и несимметричном режимах работы.

8.1 Задание для внеаудиторной подготовки

8.1.1 Изучить разделы курса ТОЭ по исследованию симметричного и несимметричного режимов работы трехфазной цепи при соединении фаз потребителя треугольником для случая симметричной системы ЭДС.

8.1.2 Построить векторные диаграммы напряжений и токов для следующих режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником:

- активная нагрузка, симметричная во всех фазах;
- то же, что и в предыдущем случае, но один из линейных проводов оборван;
- равномерная активная нагрузка в двух фазах, третья фаза отключена;
- несимметричная нагрузка (активная и активно-реактивная) во всех фазах.

8.2 Описание лабораторной установки

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде. Получение схемы трехфазной цепи выполняется коммутацией элементов, изображенных на панели стенда. Для измерения электрических величин U , I , P используются приборы электромагнитной и электродинамической систем.

8.3 Порядок выполнения работы

8.3.1 Собрать электрическую цепь по схеме (рисунок 8.1). Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы и записать их основные технические данные.

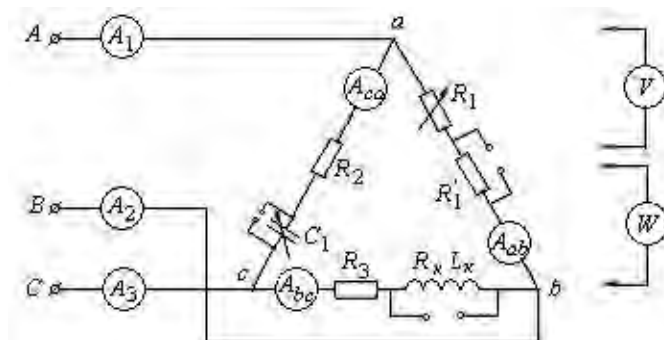


Рисунок 8.1 – Схема для исследования трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником



8.3.2 Установить симметричную активную нагрузку во всех фазах приемника, записать показания приборов и убедиться в том, что фазные токи равны друг другу и линейные токи равны друг другу. По показаниям приборов определить мощность, потребляемую всей цепью.

8.3.3 При одинаковых сопротивлениях двух фаз изменить сопротивление третьей фазы. Убедиться в том, что изменение сопротивления третьей фазы не оказывает влияния на фазные напряжения. Для данного режима работы построить векторные диаграммы токов и напряжений.

8.3.4 При равномерной активной нагрузке в фазах произвести следующие опыты:

- отсоединить нагрузку в одной из фаз (обрыв фазы);
- отсоединить линейный провод (обрыв линии).

Результаты измерений занести в таблицу 8.1. Исследовать изменение фазных и линейных токов и напряжений по сравнению с исходной схемой (п. 8.3.2). По результатам измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений.

8.3.5 Установить несимметричный режим нагрузки (несимметричная активно-емкостная или активно-индуктивная нагрузка). Подключить ваттметр в фазу с комплексной нагрузкой. В фазах с активной нагрузкой $P = UI$. Записать показания всех приборов. По результатам измерений определить мощность, потребляемую всей цепью, коэффициент мощности нагрузки и угол сдвига фаз Φ между фазными напряжениями и токами. Построить векторные диаграммы токов и напряжений. На диаграммах выделить напряжения, токи и углы, определяющие показания каждого из ваттметров.

Таблица 8.1 – Таблица опытных и расчетных данных

Характер нагрузки	Измерено										Вычислено					
	Фазные токи			Линейные токи			Фазные напряжения			Показание ваттметра		$\sum P$, Вт	$\cos\varphi$	φ_{ab} , град	φ_{bc} , град	φ_{ca} , град
	I_{ab} , А	I_{bc} , А	I_{ca} , А	I_A , А	I_B , А	I_C , А	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	P_1 , Вт	P_2 , Вт					
Активная симметричная																
Активная несимметричная																
Обрыв фазы																
Обрыв линии																
Комплексная нагрузка одной фазы																



Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы экспериментов, перечень измерительных приборов с указанием типа прибора, его системы, пределов измерения, таблицы опытных и расчетных данных, векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи с указанием принятых масштабов токов и напряжений, анализ результатов, полученных расчетным и опытным методами, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Как получить соединение треугольником нагрузки трехфазной цепи?
- 2 Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении нагрузки треугольником в общем случае и в симметричном режиме?
- 3 Чем опасно короткое замыкание фазы при соединении нагрузки треугольником?
- 4 Какое влияние оказывает перевертывание фазы источника на режим работы цепи?
- 5 Как распределяются токи в фазах и линиях при обрыве фазного или линейного привода?
- 6 Изложите порядок расчета несимметричной цепи при соединении треугольником без учета сопротивлений линейных проводов.
- 7 Каков порядок расчета несимметричной цепи при соединении нагрузки треугольником с учетом сопротивлений линейных проводов?

9 Исследование линейных цепей несинусоидального периодического тока

Цель работы: ознакомление с методами исследования линейных электрических цепей при несинусоидальных периодических воздействиях; изучение влияния параметров индуктивной катушки и конденсатора на форму кривой несинусоидального тока.

9.1 Задание для внеаудиторной подготовки

9.1.1 Изучить по учебникам и конспекту лекций раздел несинусоидальных периодических токов.

9.1.2 Перечислить и дать краткую характеристику различных методов определения коэффициентов разложения несинусоидальной функции в ряд Фурье.

9.1.3 Записать порядок расчёта линейных электрических цепей при несинусоидальных ЭДС.



9.1.4 Записать формулы для вычисления мощностей при несинусоидальных токах и напряжениях.

9.1.5 Начертить схемы исследуемых цепей.

9.1.6 Подготовить таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

9.1.7 Определить значения ёмкости $C_{1рез}$ и $C_{2рез}$, необходимой для возникновения резонансного режима в схеме (рисунок 9.1) на первой и второй гармонике соответственно. При этом использовать значения параметров, приведенные в таблице 9.1, и условия возникновения резонанса напряжений на первой и второй гармониках соответственно: $\omega L_{K2} = \frac{1}{\omega C_{1рез}}$ и $2\omega L_{K2} = \frac{1}{2\omega C_{2рез}}$.

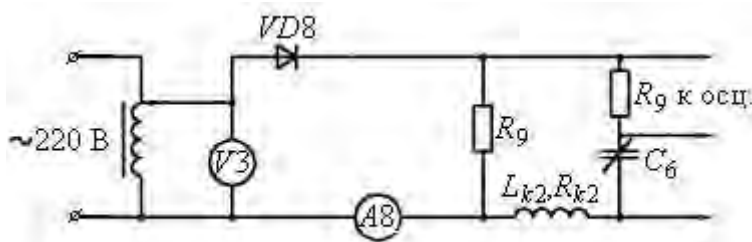


Рисунок 9.1 – Схема для исследования влияния параметров на форму кривой тока

9.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В ней используются элементы, параметры которых приведены в таблице 9.1, а также вольтметры и амперметры магнитоэлектрической и электромагнитной систем, электронный осциллограф (ЭО).

Таблица 9.1 – Параметры элементов лабораторного стенда

Номер стенда	R_9 , Ом	R_{17} , Ом	L_{k2} , Гн	R_{k2} , Ом	Батарейка конденсаторная $C_б$, мкФ	Диод
1	250	Переменное сопротивление	1,17	75	0,1...45	КД-205
2	160		1,11	80,4	0,1...45	КД-205
3	160		1,17	75	0,1...45	КД-205
4	250		1,4	71,4	0,1...45	КД-205
5	160		1,17	75	0,1...45	КД-205

Для создания несинусоидального напряжения в работе используется диод VD8. При подключении его к синусоидальному напряжению по схеме (рисунок 9.2) ток через сопротивление R_1 будет несинусоидальным. Следовательно, несинусоидальным будет и падение напряжения U_{12} на R_9 . Его можно использовать в качестве источника несинусоидального периодического напряжения.

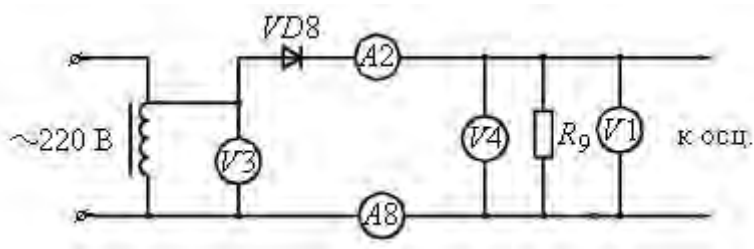


Рисунок 9.2 – Схема исследования источника несинусоидального напряжения

9.3 Порядок выполнения работы

9.3.1 По схеме (см. рисунок 9.2) исследовать форму кривых тока и напряжения источника несинусоидального напряжения. Определить их действующие, средние и амплитудные значения.

Кривая напряжения U_{12} исследуемого источника должна быть зарисована с экрана ЭО на кальку или сфотографирована. Она служит для определения амплитуды напряжения U_{12m} .

После проведения опыта осциллограф должен быть проградуирован. Для этой цели, не изменяя коэффициента вертикального усиления, осциллограф нужно подключить к известному синусоидальному напряжению ($U_{аб} = U_c$ (рисунок 9.3)), амплитуда которого A_m измеряется по осциллограмме в миллиметрах.

Записать значение $U_{аб}$ и I , масштаб напряжения $m_U = \frac{U_{об} \cdot \sqrt{2}}{A_m}$, масштаб

тока $m_I = \frac{I\sqrt{2}}{A_m}$.

Масштаб тока можно ещё определить как $m_I = m_U / R$ (где R – сопротивление, к которому подключен осциллограф).

Если в последующих экспериментах коэффициент усиления осциллографа по оси Y не изменится, то повторная регулировка по оси Y не нужна.

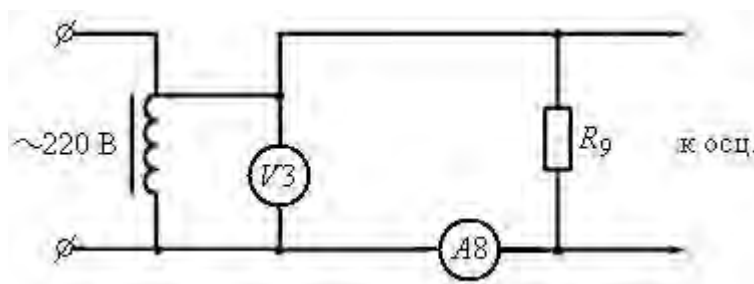


Рисунок 9.3 – Схема для градуировки осциллографа

9.3.2 Рассчитать действующее и среднее значения тока и напряжения несинусоидального источника, а также K_a и K_ϕ по формулам и сравнить их с измеренными. Результаты занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Результаты расчётов и измерений

Прибор	Измеряемый параметр	Обозначение	Размерность	Расчет	Опыт
A8	Действующее значение тока	I	A		
A2	Постоянная составляющая	I_0	A		
V3	Действующее значение напряжения сети	U_c	B		
V1	Постоянная составляющая напряжения источника	U_0	B		
V4	Действующее значение	U	B		
ЭО	Амплитуда напряжения источника	U_{m12}	B		

9.3.3 По схеме (см. рисунок 9.2) исследовать влияние параметров цепи на форму кривой тока. Для этого, не изменяя у осциллографа масштаб по оси Y , зарисовать с экрана кривые тока для следующих четырех случаев:

- с последовательным соединением резистора и индуктивной катушки (при этом емкость закорачивается);
- с последовательным соединением резистора и конденсатора емкостью $C = 1 \dots 2$ мкФ (индуктивность закорачивается);
- с последовательным соединением $R, L, C_{1рез}$ (резонанс напряжений на первой гармонике);
- с последовательным соединением $R, L, C_{2рез}$ (резонанс напряжений на второй гармонике).

$C_{1рез}$ и $C_{2рез}$ рассчитаны в п. 9.1.7.

9.3.4 Сравнить полученные кривые выяснить влияние ёмкости и индуктивности, а также простейших фильтров, выделяющих первую либо вторую гармоники, на форму кривых тока.

9.3.5 Разложить графически в гармонический ряд одну из несинусоидальных кривых (по указанию преподавателя). Убедиться, что суммирование полученных гармоник даёт исходную кривую. Здесь нужно определить такое количество гармоник, чтобы амплитуда последней была примерно в 10 раз меньше первой, но в качестве последней нельзя рассматривать гармонику, которая теоретически не должна появляться в разложении.

Содержание отчета

Отчёт должен содержать: цель работы, основные расчётные формулы, таблицу экспериментальных и расчётных данных, осциллограммы кривых тока и напряжения, результаты разложения несинусоидальной функции в гармонический ряд (исходная кривая и отдельные гармоники на одном рисунке), анализ результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Как провести градуировку осциллографа?
- 2 Как определить амплитуду напряжения, если имеется его изображение на экране осциллографа и масштаб m_U ? Как определить амплитуду тока этой же цепи?
- 3 Запишите общие формулы разложения в ряд Фурье в тригонометрической форме.
- 4 Каким образом влияют параметры R , L , C цепи на форму кривой несинусоидального тока?
- 5 Изложите сущность графоаналитического и графического методов разложения несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье.
- 6 Изобразите кривые, симметричные относительно начала координат; оси абсцисс; оси ординат. Каковы их особенности при разложения в ряд Фурье?
- 7 При каком условии схема с последовательным соединением R , L , C работает как фильтр, выделяющий первую гармонику?

10 Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с источниками постоянного напряжения

Цель работы: экспериментальное исследование переходных процессов при включении неразветвленных линейных электрических цепей под действием постоянного напряжения и при их коротком замыкании; исследование влияния параметров электрической цепи на характер переходных процессов.

10.1 Задание для внеаудиторной подготовки

10.1.1 Изучить по конспекту лекций и рекомендуемой литературе классический метод расчета переходных процессов в электрических цепях.

10.1.2 Рассчитать классическим методом переходные процессы в цепях R_1 , L_1 и R_1 , C_1 , определить постоянные времени контуров, построить графики $U_C(t)$ и $i_L(t)$ (параметры по таблице 10.1).

10.1.3 Ознакомиться с описанием лабораторной установки и порядком выполнения работы.

10.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальных лабораторных стендах. В ней используются элементы, параметры которых приведены в таблице 10.1, а также установленный на стенде генератор прямоугольных импульсов напряжения (ГПН). График выходного напряжения ГПН приведен на рисунке 10.1, амплитуда выходного напряжения ГПН устанавливается либо 10 В, либо 1 В, частота $f = 50$ Гц, период $T = 1 / f = 0,02$ с.



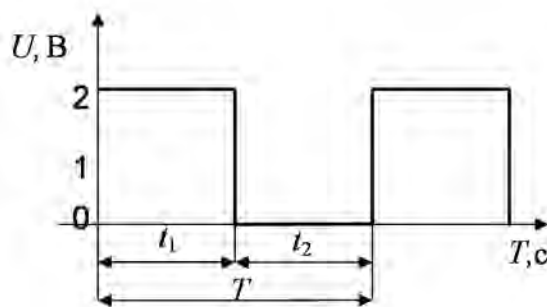


Рисунок 10.1 – Выходной сигнал ГПН

Таблица 10.1 – Параметры элементов лабораторного стенда

Номер стенда	Активное сопротивление R_{17} , Ом	Катушка индуктивности		Емкость C_1 , мкФ
		$L_{кз}$, Гн	$R_{кз}$, Ом	
1	Переменное 10...2000	1,213	91,9	0,1...45
2	Переменное 10...2000	1,095	85,0	0,1...45
3	Переменное 10...2000	1,213	83,3	0,1...45
4	Переменное 10...2000	1,116	92,0	0,1...45
5	Переменное 10...2000	1,195	82,6	0,1...45

Чтобы наблюдение стало возможным на экране осциллографа, переходной процесс в цепи должен периодически повторяться, т. е. исследуемая цепь должна периодически подключаться к источнику энергии, а затем отключаться от него. Поэтому в качестве источника ЭДС в исследуемых цепях используется ГПН. Действие прямоугольного напряжения с амплитудой 10 В на нагрузку при длительности импульса, превышающей постоянную времени цепи τ , эквивалентно подключению к источнику с постоянной ЭДС $E = 10$ В. В момент времени t_1 напряжение на зажимах нагрузки становится равным нулю, что эквивалентно короткому замыканию цепи. Процесс повторяется с периодом T . Наблюдение кривых токов и напряжений переходных процессов $i(t, U)$, $L(t, U)$, $C(t)$ осуществляется с помощью электронного осциллографа, на вход которого может подаваться напряжение с резистора R , с катушки L или конденсатора C .

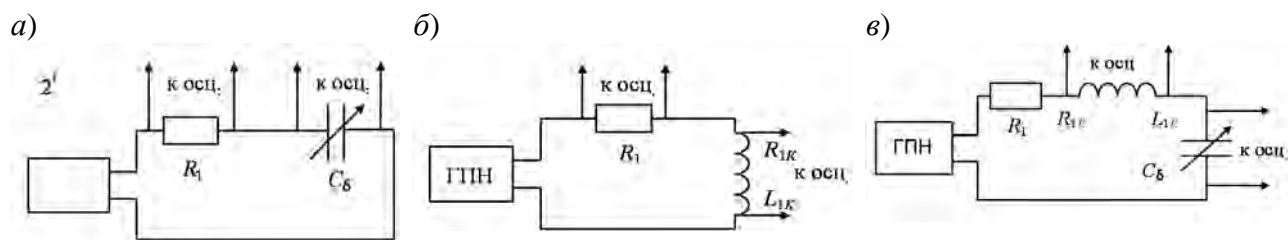
10.3 Порядок выполнения работы

10.3.1 Снять осциллограмму выходного сигнала ГПН. Учитывая, что при частоте $f = 50$ Гц $T = t_1 + t_2 = 0,02$ с, определить по осциллограмме t_1 и t_2 .

10.3.2 Исследовать переходный процесс в цепи R, C по схеме (рисунок 10.2, а). Проследить изменение кривой $U_C(t)$ и постоянной времени контура τ при увеличении R , при увеличении C . Зарисовать осциллограммы, указанные в таблице 10.2.

10.3.3 Исследовать переходной процесс в цепи R, L , используя схему (рисунок 10.2, б). Зарисовать кривые $U_L(t)$ и $i_L(t)$ при $R = R_1$ и кривую $i_L(t)$ при

изменении активного сопротивления контура ($R > R_1; R < R_1$).



a – цепи R, C ; *б* – цепи R, L ; *в* – цепи R, L, C

Рисунок 10.2 – Схема эксперимента

Таблица 10.2 – Постоянные времени электрических цепей

Номер осциллограммы	Наименование электрической цепи	Наименование осциллограммы	Параметры контура				
			R , Ом	L , Гн	C , мкФ	τ , с	τ , с
						из осциллографа	по параметрам
1	R, C	U_C, i_C					
2	R, C	U_C					
3	R, C	U_C					
4	R, L	U_L, i_L					
5	R, L	i_L					
6	R, L	i_L					
7	R, L, C	i, U_C, U_L					

10.3.4 Определить постоянные времени τ для контуров, исследуемых в пп. 10.3.1 и 10.3.2, по экспериментальным кривым и расчетным путем по параметрам R, L, C . Результаты занести в таблицу 10.2.

10.3.5 Сравнить экспериментальные зависимости по пп. 10.3.2 и 10.3.3 с рассчитанными классическим методом $U_C(t)$ и $i_L(t)$ для цепей R_1, C_1 и R_1, L_1 .

10.3.6 Исследовать переходной процесс в цепи R, L, C при апериодическом заряде и разряде конденсатора по схеме (рисунок 10.2, в). Зарисовать в отчете кривые i, U_C, U_L .

10.3.7 Уменьшая емкость батареи конденсаторов в схеме (см. рисунок 10.2, в) ступенчато до 0,1 мкФ, проследить по осциллограмме $U_C(t)$ переход от апериодического процесса к колебательному. Зарисовать те же кривые i, U_C, U_L при колебательном разряде и заряде конденсатора.

10.3.8 Определить по экспериментальным кривым и расчетным путем по параметрам R, L, C угловую частоту затухающих колебаний ω' :

$$\omega'_{\text{эксн}} = \frac{2\pi}{T'_{\text{эксн}}}; \omega'_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Рассчитать логарифмический декремент колебаний ($\nu = a_p T'_{\text{расч}} = R/2L \cdot 2\pi/\omega'_{\text{расч}}$; $\nu_{\text{эксн}} = a_{\text{э}} T'_{\text{эксн}}$), учитывая, что $a = 1/\tau$. Сравнить опытные и расчетные данные, проанализировать влияние изменения параметров R и C на характер переходного процесса в цепи R, L, C . Результаты занести в таблицу 10.3.

Таблица 10.3 – Логарифмический декремент и угловая частота затухающих колебаний

Номер осциллограммы	Наименование электрической цепи	Наименование осциллограммы	Параметры контура						
			R , Ом	L , Гн	C , мкФ	ω'	ω'	ν	ν
						из осциллограммы	по параметрам	из осциллограммы	по параметрам
1	R, L, C	i, U_C, U_L							
2	R, L, C	i, U_C, U_L							

Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы опытов, обработанные осциллограммы переходных процессов, расчетные формулы, таблицы опытных и расчетных данных.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте законы коммутации.
- 2 Изложите сущность классического метода расчета переходных процессов.
- 3 Как составить уравнения для свободных составляющих токов и напряжений?
- 4 Как составить характеристическое уравнение?
- 5 Что понимают под начальными условиями? Как определяются независимые и зависимые начальные условия?
- 6 Что называют постоянной времени контура τ , как влияют параметры контура на время переходного процесса?
- 7 Как определить постоянную времени контура R, L, C графически и аналитически?
- 8 Как влияет активное сопротивление в контурах R, L ; R, C и R, L, C на характер кривых переходного процесса?
- 9 Какой вид имеют кривые переходного процесса при включении цепей R, L и R, C под постоянное напряжение?



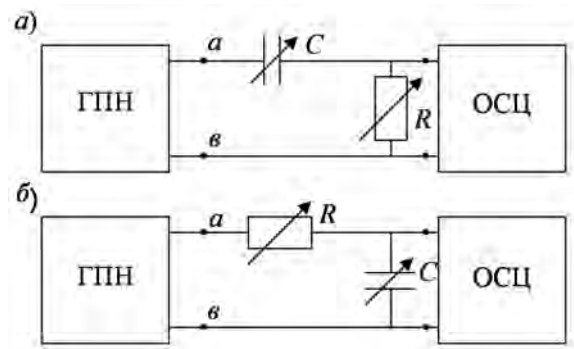
11 Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей

Цель работы: экспериментальное исследование и выбор параметров дифференцирующих и интегрирующих цепей.

11.1 Задание для внеаудиторной подготовки

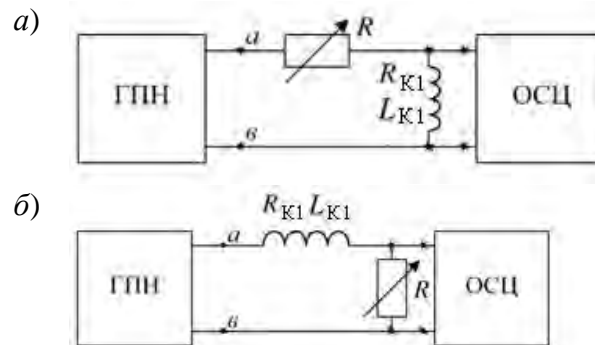
11.1.1 Ознакомиться с теоретическими пояснениями к работе и рекомендуемой литературой.

11.1.2 Ознакомиться со схемами проведения опытов (рисунки 11.1 и 11.2).



a – дифференцирующая цепь R, C ; b – интегрирующая цепь R, C

Рисунок 11.1 – Схемы эксперимента для RC -цепи



a – дифференцирующая цепь R, C ; b – интегрирующая цепь R, C

Рисунок 11.2 – Схемы эксперимента для RL -цепи

11.1.3 Рассчитать сопротивление R (см. рисунок 11.1, a) и постоянную времени τ дифференцирующей RC -цепи для случая подачи на вход прямоугольного импульса амплитудой 10 В, длительностью 0,01 с при частоте $f = 50$ Гц, если емкость равна 0,2 мкФ.

11.1.4 При том же входном импульсе необходимо рассчитать емкость C и постоянную времени τ интегрирующей цепи при максимальном активном со-

противлении, имеющемся на стенде. Для проведения эксперимента принимается C , ближайшее к расчетному из имеющихся на стенде.

11.1.5 Построить временные диаграммы напряжений на входе и выходе $U_1(t)$, $U_2(t)$ цепей. Значения $U_2(t)$ рассчитать операторным методом.

11.1.6 Рассчитать сопротивления R дифференцирующей (см. рисунок 11.2, *а*) и интегрирующей (см. рисунок 11.2, *б*) RL -цепей при том же входном сигнале, принимая $\omega_0 = 11 \text{ } \omega$.

11.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на том же блоке универсального лабораторного стенда, что и лабораторная работа № 10. В работе используются генератор прямоугольного напряжения (ГПН), дающий прямоугольные импульсы длительностью $t = 1/2 f$ с амплитудой 10 В (либо 1 В) при частоте повторений $f = 50 \text{ Гц}$, $t = 0,01 \text{ с}$, а также элементы, параметры которых приведены на стенде.

11.3 Порядок выполнения работы

11.3.1 Включить осциллограф и подготовить его к работе.

11.3.2 Включить ГПН и зарисовать форму кривой напряжения на его зажимах. Определить амплитуду и длительность.

11.3.3 Исследовать дифференцирующую RC -цепь (см. рисунок 11.1, *а*) с параметрами, полученными в домашнем задании. Срисовать с экрана осциллографа $U_2(t)$, определить его амплитуду и длительность. Графически определить τ .

11.3.4 Изменяя C , проанализировать влияние параметров дифференцирующей цепи на форму $U_2(t)$. Зарисовать $U_2(t)$ при увеличении C в 10 раз.

11.3.5 Исследовать интегрирующую RC -цепь (см. рисунок 11.1, *б*) с параметрами, полученными в домашнем задании. Зарисовать $U_2(t)$.

11.3.6 Проанализировать влияние параметров интегрирующей цепи на форму $U_2(t)$, изменяя C . Зарисовать одну из кривых $U_2(t)$.

11.3.7 Исследовать дифференцирующую RL -цепь (см. рисунок 11.2, *а*) с параметрами, полученными в домашнем задании, зарисовать $U_2(t)$, изменить R до величины $R = R_{\min}$, зарисовать $U_2(t)$.

11.3.8 Исследовать интегрирующую RL -цепь (см. рисунок 11.2, *б*) с параметрами, полученными в домашнем задании, и при изменении R . Зарисовать кривую $U_2(t)$. Увеличить R , зарисовать $U_2(t)$.

11.3.9 Определить по осциллограммам амплитуду и длительность выходных импульсов $U_2(t)$ по пп. 11.3.3–11.3.8 и постоянные времени τ каждой из цепей. Результаты занести в таблицу 11.1.

11.3.10 Сравнивая осциллограммы опытов, оценить качество дифференцирования и интегрирования цепей RC и RL .



Таблица 11.1 – Амплитуда и длительность выходных импульсов

Характер цепи	Вид схемы	Параметры схемы			Постоянная времени τ	Амплитуда выходного импульса U_{2m}	Длительность выходного импульса $t_{и.вых}$
		R	L	C			
Дифференцирующая	R, C						
Интегрирующая	R, C						
Дифференцирующая	R, L						
Интегрирующая	R, L						

Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы экспериментов, обработанные осциллограммы дифференцирующих и интегрирующих сигналов, расчетные формулы, таблицу параметров выходных импульсов.

Контрольные вопросы

1 Что такое дифференцирующая цепь? Физический смысл процессов, происходящих в дифференцирующей цепи.

2 Назовите условия, при которых цепь RC является дифференцирующей.

3 Какова форма кривой напряжения на выходе дифференцирующей RC -цепи при подаче на вход прямоугольных импульсов? Какова ее зависимость от длительности входного импульса и постоянной времени цепи?

4 Условие дифференцирования в цепи RC при несинусоидальном входном сигнале.

5 Форма кривой напряжения на выходе дифференцирующей RL -цепи при подаче на вход прямоугольных импульсов, ее зависимость от входного импульса и постоянной времени цепи.

6 Что такое интегрирующая цепь? Какие процессы в ней происходят?

7 Каково условие, при котором цепь RC является интегрирующей? Выбор R и C интегрирующей цепи.

12 Исследование пассивных линейных четырехполюсников

Цель работы: исследование режимов работы пассивного четырехполюсника и определение экспериментальным путем коэффициентов A , B , C , D и параметров П- и Т-образной схем замещения.

12.1 Задание для внеаудиторной подготовки

12.1.1 Повторить по [1–4] раздел курса ТОЭ «Четырехполюсники» и ознакомиться с теоретическими сведениями к работе.

12.1.2 Записать уравнения четырехполюсника в А-форме.

12.1.3 Записать формулы для определения А-параметров и характеристических сопротивлений через сопротивления холостого хода и короткого замыкания.

12.1.4 Записать формулы для определения параметров Т- и П-образной схем замещения через коэффициенты A, B, C, D .

12.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на лабораторном универсальном стенде. В работе используется комплект приборов К-500, состоящий из амперметра, вольтметра и ваттметра, амперметр и вольтметр электромагнитной системы, установленные на лицевой панели стенда, и автотрансформатор, вмонтированный в стенд. Величина емкости C_1 , применяемой для определения знака угла φ , не должна превышать 1 мкФ.

12.3 Методика выполнения работы

12.3.1 Используя схему (рисунок 12.1), исследовать работу четырехполюсника в режимах прямого и обратного холостого хода, прямого и обратного короткого замыкания. Для исследования можно принять один из вариантов четырехполюсника, приведенных на рисунке 12.2, $C_\sigma \approx 6 \dots 8$ мкФ, либо собственный вариант по согласованию с преподавателем. Опыты короткого замыкания следует проводить при пониженном напряжении. В каждом опыте, помимо измерения токов, напряжений и мощности со стороны питания, необходимо выяснить знак угла φ между напряжением и током, для чего служит емкость C_1 . После проведения всех измерений к питающим зажимам четырехполюсника подключают (небольшую) емкость C , если при этом ток через амперметр A_1 возрастает, то Z_{BX} имеет емкостной характер (угол φ отрицательный), если ток уменьшается, то Z_{BX} имеет индуктивный характер (угол φ положительный). Результаты внести в таблицу 12.1.

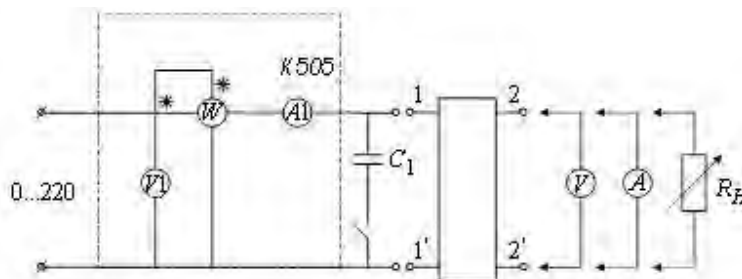


Рисунок 12.1 – Схема эксперимента

12.3.2 По результатам эксперимента рассчитать комплексные входные сопротивления $Z_{10}, Z_{1k}, Z_{20}, Z_{2k}$, характеристические сопротивления четырехполюсника и коэффициенты A, B, C, D .

12.3.3 По известным коэффициентам четырехполюсника рассчитать пара-

метры его Т-образной либо П-образной схемы замещения и сопоставить с параметрами элементов, включенных в схему. Результаты вычислений внести в таблицу 12.1.

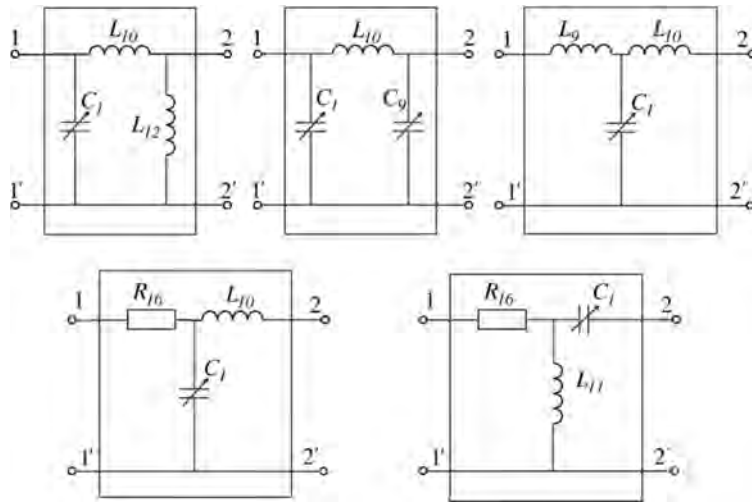


Рисунок 12.2 – Варианты схем четырехполюсника

Таблица 12.1 – Результаты опытов в режимах холостого хода и короткого замыкания

Режим цепи	Измерено						Вычислено				
	Прямой холостой ход	U_{10} , В	I_{10} , А	P_{10} , Вт	U_2 , В	I_2 , А	Знак φ_{10}	$U_{10}I_{10}$, В·А	$\cos \varphi_{10}$	Z_{10} , Ом	φ_{10} , град
Прямое короткое замыкание	U_{1k} , В	I_{1k} , А	P_{1k} , Вт	U_2 , В	I_2 , А	Знак φ_{1k}	$U_{1k}I_{1k}$, В·А	$\cos \varphi_{1k}$	Z_{1k} , Ом	φ_{1k} , град	
Обратный холостой ход	U_{20} , В	I_{20} , А	P_{20} , Вт	U_1 , В	I_1 , А	Знак φ_{20}	$U_{20}I_{20}$, В·А	$\cos \varphi_{20}$	Z_{20} , Ом	φ_{20} , град	
Обратное короткое замыкание	U_{2k} , В	I_{2k} , А	P_{2k} , Вт	U_1 , В	I_1 , А	Знак φ_{2k}	$U_{2k}I_{2k}$, В·А	$\cos \varphi_{2k}$	Z_{2k} , Ом	φ_{2k} , град	

12.3.4 Исследовать работу четырехполюсника при различных величинах активной нагрузки $Z_H = R = \text{var}$ (0 до ∞).

12.3.5 Рассчитать соответствующие одному значению тока и напряжения нагрузки ток и напряжение на входе, применив полученные по экспериментальным данным A, B, C, D , и сравнить их с измеренными U_1 и I_1 .

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схему эксперимента, схемы замещения четырехполюсника, основные расчетные формулы, таблицы опытных и расчетных данных, анализ результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Какую схему называют пассивным четырехполюсником?
- 2 Записать уравнения четырехполюсника в А-параметрах. Какова размерность коэффициентов A , B , C , D ?
- 3 Что называется эквивалентной схемой замещения? Схемы замещения четырехполюсника.
- 4 Как определить коэффициенты четырехполюсника методом холостого хода и короткого замыкания?
- 5 Как определить параметры П- и Т-образной схем замещения четырехполюсника?
- 6 Что такое постоянная передачи четырехполюсника?

13 Исследование электрических цепей с нелинейными резистивными сопротивлениями

Цель работы: экспериментальное определение вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов, изучение практического применения полупроводниковых элементов (диодов, стабилитронов, динисторов) в электротехнических устройствах.

13.1 Порядок выполнения работы

13.1.1 Экспериментально определить прямую и обратную ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового стабилитрона (рисунок 13.1).

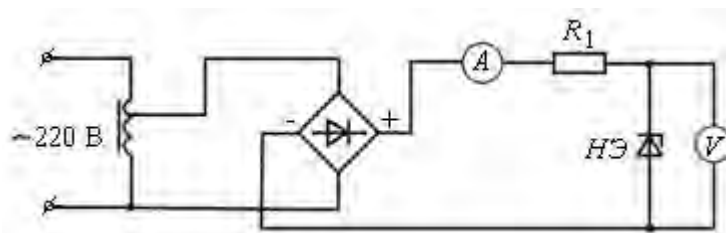


Рисунок 13.1 – Схема для экспериментального определения вольт-амперной характеристики стабилитрона

При снятии характеристики удобнее задавать величину тока через стабилитрон и отмечать получающееся при этом напряжение.

Результаты измерений занести в таблицу 13.1 и построить ВАХ.



Таблица 13.1 – Таблица опытных данных

$I_{обр}, \text{мА}$										
$U_{обр}, \text{В}$										

13.1.2 Рассчитать по полученной ВАХ статическую и дифференциальную проводимость и сопротивление нелинейного элемента.

13.1.3 Изучить работу однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей (рисунки 13.2 и 13.3) переменного тока. Зарисовать осциллограммы напряжений на сопротивлении нагрузки.

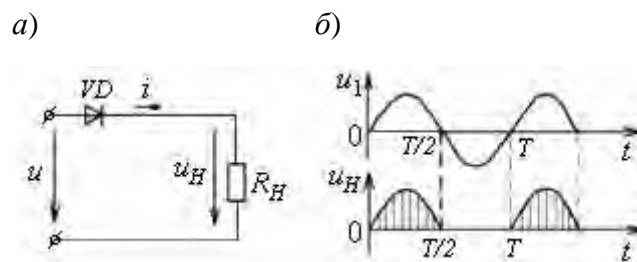


Рисунок 13.2 – Однофазная однополупериодная схема выпрямления (а) и временные диаграммы (б)

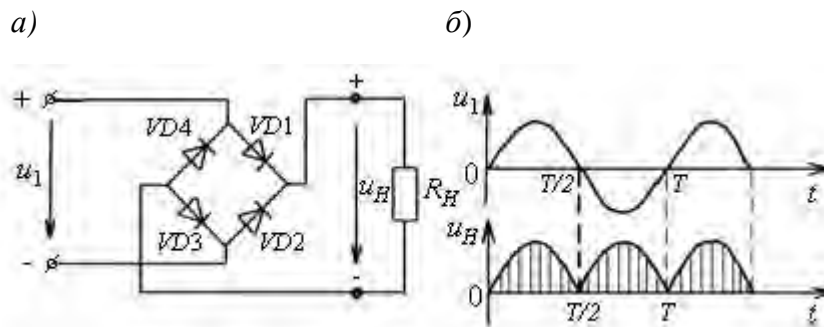


Рисунок 13.3 – Однофазная двухполупериодная схема выпрямления (а) и временные диаграммы (б)

13.1.4 Изучить работу схемы ограничения амплитуды (рисунок 13.4).

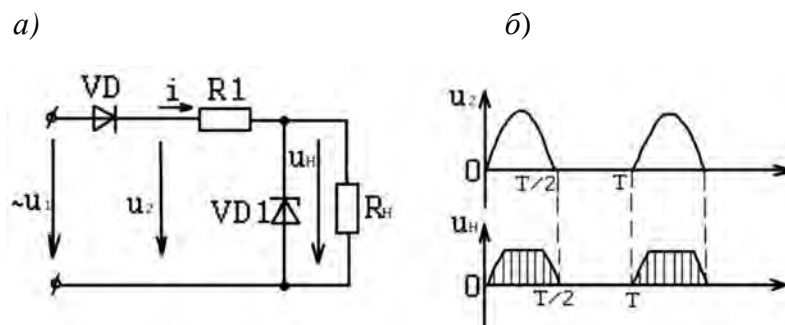


Рисунок 13.4 – Схема ограничения амплитуды (а) и временные диаграммы (б)

Работа схемы ограничения амплитуды основана на использовании физических свойств полупроводникового стабилитрона.

При возрастании напряжения нагрузки $U_H = U_2 - R_1 i$ до значения U_{cm} , равного напряжению стабилизации, сопротивление стабилитрона начинает резко уменьшаться. Дальнейшее возрастание напряжения U_2 приводит к возрастанию тока i и, соответственно, к увеличению падения напряжения на ограничительном сопротивлении R_1 . При этом напряжение нагрузки U_H остается постоянным.

13.1.5 Определить экспериментально ток i_{cm} при заданных параметрах элементов схемы ограничения амплитуды (см. рисунок 13.4).

13.1.6 Рассчитать графоаналитическим методом ток i_{cm} через нелинейный элемент (стабилитрон) и сравнить со значением, полученным экспериментально.

13.1.7 Изучить работу преобразователя синусоидального напряжения (формирователя импульсов) (рисунок 13.5).

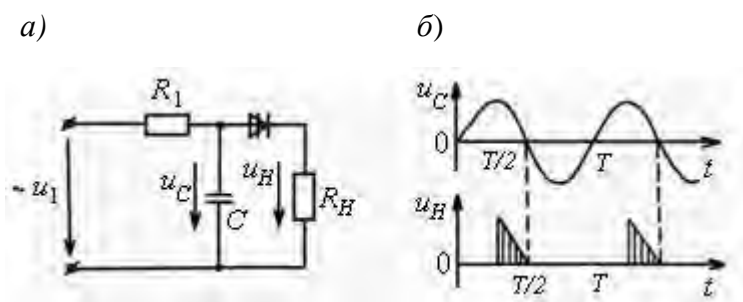


Рисунок 13.5 – Схема преобразователя синусоидального напряжения (а) и временные диаграммы (б)

При положительной полуволне приложенного синусоидального напряжения на конденсаторе C напряжение U_C возрастает по синусоиде до напряжения пробоя диода U_{n1} . Диод открывается, и конденсатор разряжается на сопротивление нагрузки. При разрядке конденсатора до напряжения $U_C = U_{n2}$, где $U_{n2} \approx U_{n1}$, диод вновь закрывается. С дальнейшим уменьшением напряжения на конденсаторе, при $U_C \approx U_{n2}$, напряжение на нагрузке $U_H = 0$, т. к. диод закрыт.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы экспериментов, перечень измерительных приборов и полупроводниковых элементов с указанием их типа и паспортных данных, таблицы опытных данных, экспериментальную вольт-амперную характеристику стабилитрона, результаты расчета статического и дифференциального сопротивления и проводимости нелинейного элемента, результаты расчёта тока i_{cm} , осциллограммы, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какой элемент называется нелинейным?
- 2 Назовите типы нелинейных элементов и укажите их вольт-амперные характеристики.
- 3 Назовите нелинейный элемент, позволяющий осуществить ограничение амплитуды выпрямленного напряжения.
- 4 Как определяются статические и дифференциальные сопротивления и проводимость нелинейного элемента?
- 5 Какие существуют методы анализа нелинейных электрических цепей постоянного тока?
- 6 В каких электротехнических устройствах применяются полупроводниковые приборы – диоды, стабилитроны, динисторы?
- 7 На какие группы подразделяются нелинейные элементы по виду их вольт-амперных характеристик?

14 Исследование катушки с магнитопроводом в цепи переменного тока

Цель работы: исследование зависимости формы кривой тока в цепи с нелинейной индуктивностью и параметров катушки от величины напряжения источника и формы магнитопровода; получение навыков расчета параметров схемы замещения катушки с магнитопроводом по экспериментальным данным.

14.1 Задание для внеаудиторной подготовки

14.1.1 Изучить по рекомендуемой литературе и конспекту лекций разделы по анализу нелинейных индуктивностей.

14.1.2 Записать уравнение, изобразить векторную диаграмму и эквивалентную схему замещения катушки с магнитопроводом и привести формулы для расчета её параметров.

14.2 Порядок выполнения работы

14.2.1 Собрать цепь (рисунок 14.1) и измерить показания приборов в следующих режимах: без сердечника, с медным сердечником, со стальным сплошным и стальным шихтованным разомкнутым и замкнутым магнитопроводами. Зарисовать кривую тока в цепи с катушкой без магнитопровода. Проследить, как влияет на форму кривой тока тип сердечника.

В качестве R использовать минимальное активное сопротивление, имеющееся на стенде.

Данные изменения занести в таблицу 14.1.

14.2.2 Рассчитать потери мощности в меди $P_{ЭЛ}$, в стали $P_{СТ}$ и параметры



схемы замещения катушки (рисунок 14.2) с различными типами магнитопроводов, а также параметры схемы замещения без магнитопровода.

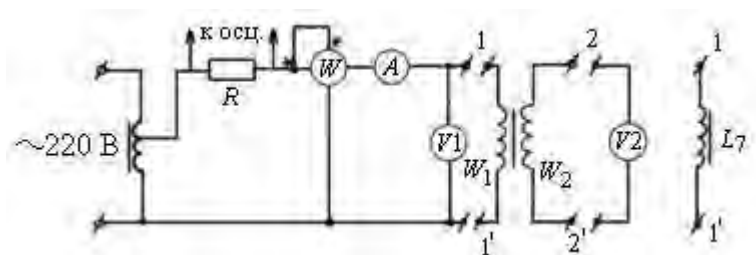


Рисунок 14.1 – Схема экспериментальной установки

Таблица 14.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Тип сердечника	Измерено				Вычислено								
	U , В	P , Вт	I , А	U_2 , В	z_s , Ом	R_s , Ом	X_s , Ом	φ_s , град	g_0 , См	b_0 , См	P_M , Вт	P_{CT} , Вт	U_0 , В
Без сердечника													
Стальной сплошной													

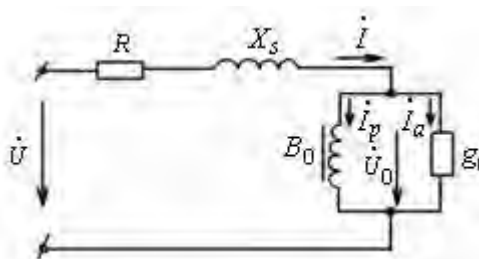


Рисунок 14.2 – Схема замещения катушки с магнитопроводом

Определить параметры схемы следующим образом:

$$g_0 = \frac{P_{CT}}{U_0^2}; \quad I_a = \frac{P_{CT}}{U_0}; \quad I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}; \quad b_0 = \frac{I_p}{U_0}; \quad Q_{CT} = U_0 I_p;$$

$$Q = \sqrt{(UI)^2 - P^2}; \quad X_s = \frac{Q_s}{I^2}.$$

14.2.3 Изменить напряжение на входе катушки с одним из типов магнитопровода. Проследить, как изменились параметры катушки.

Результаты по пп. 14.2.1–14.2.3 записать в таблицу 14.1. Выполнить сравнительный анализ исследуемых величин.

14.2.4 Исследовать влияние напряжения источника на форму кривой тока в обмотке нелинейной индуктивности по схеме (см. рисунок 14.1), подключив к зажимам 1 и 1' индуктивность L_7 . Зарисовать осциллограммы тока для двух различных значений напряжения, например, для $U = 25$ В и $U = 150$ В.

14.2.5 Построить векторные диаграммы для эквивалентных синусоид токов и напряжений катушки: без сердечника, магнитопровод шихтованный замкнутый, магнитопровод шихтованный разомкнутый.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы, схему эксперимента, схемы замещения катушки с магнитопроводом и без магнитопровода, векторные диаграммы для трех случаев, расчетные формулы, осциллограммы, таблицу опытных и расчетных данных, анализ результатов.

Контрольные вопросы

1 Как влияет нелинейность вебер-амперной характеристики катушки с магнитопроводом на формы кривых тока и напряжения? Как зависит форма кривой тока от ширины цикла магнитного гистерезиса материала магнитопровода?

2 Как определить коэффициенты амплитуды, формы и искажения несинусоидальной кривой? Как разложить её в гармонический ряд?

3 С какой целью вводится метод эквивалентных синусоид для нелинейных цепей?

4 Запишите уравнение электрического равновесия цепи катушки с магнитопроводом для мгновенных значений величин и в комплексной форме.

5 Изложите порядок расчета параметров схемы замещения катушки с магнитопроводом. Какие процессы в реальной катушке характеризуют каждый элемент схемы?

15 Исследование феррорезонансных цепей

Цель работы: изучение и экспериментальное исследование феррорезонансных явлений в электрической цепи, содержащей нелинейную индуктивность, конденсатор и резистор.

15.1 Задание для внеаудиторной подготовки

15.1.1 Изучить раздел курса «Феррорезонансные цепи».

15.1.2 Привести основные расчетные формулы, вольт-амперные характеристики исследуемых элементов, схемы проведения эксперимента и ответить на контрольные вопросы.

15.2 Описание лабораторной установки

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде.

Используется катушка с магнитопроводом $L7$, резистор $R4$, батарея конденсаторов, ЛАТР, вольтметры с пределом измерения $0...250$ В и ампер-



метр 0...1,0 А электромагнитной системы, установленные на лицевой панели стенда. Дополнительно используется ваттметр (или комплект К-50) и осциллограф.

15.3 Порядок выполнения работы

15.3.1 Собрать цепь по схеме, показанной на рисунке 15.1. Определить ВАХ нелинейной индуктивности $L7$ по действующим значениям напряжения и тока. При этом ток в катушке дросселя не должен превышать значения $J = 0,5$ А. Полученные данные занести в таблицу 15.1.

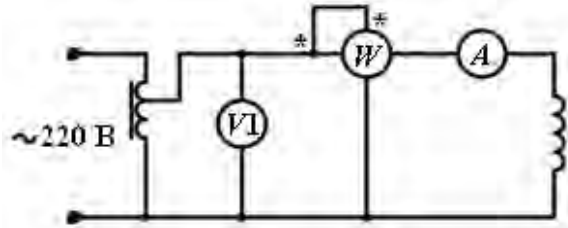


Рисунок 15.1 – Схема для определения вольт-амперной характеристики нелинейной индуктивности

Таблица 15.1 – Таблица опытных данных

Измеряемая величина	Номер измерения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, \text{В}$										
$I, \text{А}$										

15.3.2 На основании опытных данных построить ВАХ $U_L = f(x)$ нелинейного дросселя. Выбрать точку за коленом кривой $U_L(I)$ и подсчитать резонансную емкость из условия

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_K^2} = X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

В этой же системе координат построить ВАХ емкости, а также результирующую ВАХ цепи.

15.3.3 Определить экспериментальную зависимость $U_1 = f(x)$ при последовательном соединении нелинейной индуктивности $L7$ и конденсатора. Для этого необходимо собрать цепь по схеме (рисунок 15.2, а). Увеличивая напряжение U_1 на входе от нулевого значения, отметить значение напряжения U_B , при котором наступает скачкообразное увеличение тока от I_B до I_D . Затем, постепенно уменьшая напряжение U от максимального значения, определить U_1 , при котором наступает скачкообразное уменьшение тока.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 15.2.

15.3.4 Собрать цепь по схеме (рисунок 15.2, б) из элементов предыдущей

схемы. При той же самой расчетной емкости, изменяя от нуля подводимое напряжение U_1 , произвести измерения U_1, I, I_L, I_C, P . Данные измерений занести в таблицу 15.3.

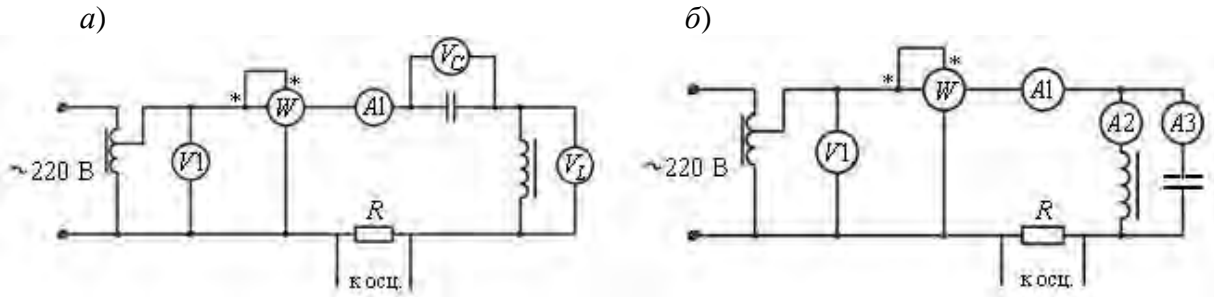


Рисунок 15.2 – Схемы для исследования феррорезонанса напряжения (а) и феррорезонанса тока (б)

Таблица 15.2 – Таблица опытных данных

Номер опыта	$U_1, В$	$I, А$	$P, Вт$	Номер осциллограммы
1				
...				
10				

На основании опытных данных построить результирующую ВАХ цепи.

Таблица 15.3 – Таблица опытных данных

Измеряемый параметр	Номер измерения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_1, А$										
$I_1, А$										
$I_L, А$										
$I_C, А$										
$P, Вт$										

15.3.5 Зарисовать осциллограмму тока $i(t)$ для режимов: до феррорезонанса; феррорезонанс; после феррорезонанса.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы, таблицы экспериментальных и расчетных данных, графики зависимостей $U_L(I), U_C(I), U_R(I), U_1(I)$, осциллограммы тока $i(t)$, анализ результатов.

Контрольные вопросы

- 1 В каких цепях возникают феррорезонансные явления? Дайте определение феррорезонанса напряжений, феррорезонанса токов.
- 2 Чем отличается феррорезонанс напряжений от резонанса напряжений в линейной цепи?
- 3 Почему в феррорезонансной цепи возникают скачки тока (напряжения)?
- 4 Почему сопротивление феррорезонансной последовательной цепи до скачка тока к большему значению имеет индуктивный характер, а после скачка – емкостный характер?
- 5 Какие участки реальной ВАХ феррорезонансной цепи являются устойчивыми, а какие – неустойчивыми?
- 6 Как влияет частота входного напряжения на характеристики феррорезонансной цепи?

Список литературы

- 1 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., испр. и доп. – Москва : Гардарики, 2007. – 701 с.
- 2 **Иванов, И. И.** Электротехника : учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. А. Фролов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 736 с.
- 3 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.
- 4 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника : учебник в 2 т. Т. 1 : Электротехника / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опачий. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 574 с.
- 5 **Миленина, С. А.** Электротехника, электроника и схемотехника : учебник и практикум для академ. бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. – Москва : Юрайт, 2015. – 399 с.
- 6 **Рыбков, И. С.** Электротехника : учебное пособие / И. С. Рыбков. – Москва : РИОР ; ИНФРА-М, 2013. – 160 с.
- 7 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: курсовые работы с методическими указаниями и примерами / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опачий. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 126 с.
- 8 Сборник задач по электротехнике и электронике / Под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 478 с.

