

**Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»**

В.И. БОГДАНОВИЧ, В.Н. МЫШКОВЕЦ

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ:
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для студентов
учреждений, обеспечивающих получение высшего образования
по специальности
«Автоматизированные системы обработки информации»**

**Гомель
УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»
2009**

УДК 621.3 (075.8)
ББК 31.2 я 73
Б 735

Рецензенты:

А. П. Куравлев, профессор кафедры ТОЭ УЩ «Белорусский Государственный университет информатики и радиоэлектроники», канд.техн.наук.;

Ю. И. Лившиц, доцент кафедры «Робототехнические системы» УО «Белорусский национальный технологический университет», канд. техн. Наук;

кафедра радиофизики и электроники учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Рекомендовано научно-методическим советом учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Богданович, В. И.

Б 735 Теория электрических цепей: Лабораторный практикум: учебно-Методическое пособие для студентов вузов по специальности «Атоматизированные системы обработки информации» / В. И. Богданович; В. Н. Мышковец; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 82 с.
ISBN 978 – 985 – 439 – 383 – 4

В настоящем учебном пособии рассмотрены теоретические вопросы по основным разделам курса «Теория электрических цепей».

Исследуются электрические цепи постоянного тока, однофазного синусоидального тока, трехфазного тока, переходные процессы в линейных электрических цепях.

Содержится описание пяти лабораторных работ. Приведены исследуемые схемы, порядок выполнения работ, требования к содержанию отчетов, контрольные вопросы, методические указания по выполнению.

Адресовано студентам вузов по специальности «АСОИ», а так же студентам физических факультетов.

УДК 621.3 (075.8)
ББК 31.2 я 73

ISBN 978–985–439 – 383 – 4 © Богданович В. И., Мышковец В.Н., 2009
© УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», 2009

Содержание

Введение.....	4
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ.....	5
Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ.....	7
1 Исследование режимов работы и методов расчета электрических цепей постоянного тока	9
Лабораторная работа 1.....	11
2 Исследование электрической цепи постоянного тока с двумя источниками ЭДС.....	15
Лабораторная работа 2.....	20
3 Исследование электрических цепей однофазного синусоидального тока.....	26
Лабораторная работа 3.....	34
4 Исследование трехфазных цепей при соединении нагрузки треугольником и звездой.....	40
Лабораторная работа 4.....	54
5 Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях.....	59
Лабораторная работа 5.....	70
Приложение А Описание универсального лабораторного стенда....	74
Литература.....	83

Введение

Курс «Теория электрических цепей» является базовым курсом, на который опираются многие профилирующие дисциплины высших учебных заведений. Ориентация курса на первичность понимания особенностей электромагнитных процессов в рассматриваемом конкретном устройстве над формально-расчетными методами приобретает все более важное значение.

Курс «Теория электрических цепей» по своему существу требует полного сочетания теории и практики. Для его понимания необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи, решение которых может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методами. Аналитические методы решения задач изучаются на практических занятиях, а экспериментальным методам исследования учат студентов при проведении лабораторных занятий.

В настоящем учебном пособии рассмотрены теоретические вопросы по основным разделам курса «Теория электрических цепей»: электрические цепи постоянного тока, электрические цепи однофазного синусоидального тока, электрические цепи трехфазного тока, переходные процессы в линейных электрических цепях.

Лабораторные работы играют важную роль при изучении курса «Теория электрических цепей», так как он позволяет на практике проверить теоретические расчеты с результатами экспериментального исследования конкретных электротехнических устройств, аналогами которых являются исследуемые цепи.

Учебное пособие содержит 5 лабораторных работ. При разработке тематики лабораторных работ учитывалась их возможность практического применения. Применение универсальных лабораторных стендов, обеспечивает возможность проведения лабораторных занятий фронтальным методом.

При описании каждой лабораторной работы определяется ее цель, даются основные понятия по теме, детальный ход эксперимента, правила оформления отчета, вопросы для самоконтроля.

Учебное пособие может быть использовано при проведении лабораторных занятий по курсам «Теория электрических цепей» для всех специальностей физического факультета, а также в самостоятельной работе студентов при подготовке к практическим занятиям и экзаменам.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

При выполнении лабораторных работ студент должен выполнять следующие правила техники безопасности:

- после ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписаться в соответствующем журнале;

- при работе в лаборатории категорически запрещается приносить с собой вещи и предметы, загромождающие рабочие места. Способствующие созданию условий, могущих привести к нарушению правил техники безопасности;

- в лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому;

- студенческая группа делиться на подгруппы (не более 8 студентов), а подгруппы – на бригады, которые затем распределяются по лабораторным стендам. В бригаде должно быть не менее двух студентов. Работа одного студента на лабораторном стенде категорически запрещена;

- сборку электрической цепи производят соединительными проводами при выключенном напряжении питания в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме, обеспечивая при этом надежность электрических контактов всех разъемных соединений;

- приступая к сборке электрической цепи, необходимо убедиться в том, что к стенду не подано напряжение;

- при сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались;

- собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю;

- включение электрической цепи под напряжением производится только с разрешения и в присутствии преподавателя;

- при обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю;

- переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания;

- запрещается прикасаться пальцами, ручками и другими предметами оголенных токоведущих частей электрической цепи, находящихся под напряжением;

- при обнаружении повреждений электрического оборудования и приборов стенда, а также при появлении дыма, специфического запаха или

искрения необходимо немедленно выключить напряжение питания стенда и известить об этом преподавателя;

– после выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую цепь и привести в порядок рабочее место.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ

Подготовка к лабораторным работам. Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в университете и в течение определенного времени. Поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

- предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;
- внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задача этой работы;
- по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;
- до проведения лабораторной работы подготовить в рабочей тетради соответствующие схемы, таблицы и расчетные формулы;
- неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Выполнение лабораторных работ. Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка студента к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований:

- перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его номинальными данными (номинальными данными являются значения тока, напряжения и мощности, на которые рассчитаны соответствующие устройства), а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы;
- сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием;
- после окончания сборки электрическая цепь должна быть представлена преподавателю. Включать цепь под напряжением только с разрешения преподавателя;
- запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро;
- результаты измерений заносятся студентом в свою рабочую тетрадь;

– после выполнения лабораторной работы результаты эксперимента вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи;

– после окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок;

– в течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории можно только с разрешения преподавателя.

Оформление отчета по лабораторным работам. Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной лабораторной работе составляется отчет (листы формата А4). Схемы и графики выполняются с соблюдением принятых стандартных обозначений. Требования по содержанию отчета приводятся в каждой лабораторной работе.

1 Исследование режимов работы и методов расчета электрических цепей постоянного тока

1 Схемы соединений, схемы замещения электрических цепей и режимы их работы.

2 Анализ электрических цепей постоянного тока с одним источником ЭДС. Метод эквивалентных преобразований.

3 Анализ электрических цепей постоянного тока с одним источником ЭДС. Метод единичного тока.

Основные понятия по теме

Для анализа электрической цепи с одним источником электрической энергии воспользуемся методом эквивалентных преобразований («методом свертки») [1, 2].

Суть метода рассмотрим на примере электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 1.1. Пусть известны значения сопротивлений резисторов $R_1; R_2; R_3; R_4; R_5; R_6$, ЭДС E_1 и ее внутреннее сопротивление R_{01} . Требуется определить токи во всех участках цепи и напряжение, которое покажет вольтметр (сопротивление его бесконечно велико), включенный между точками a и d .

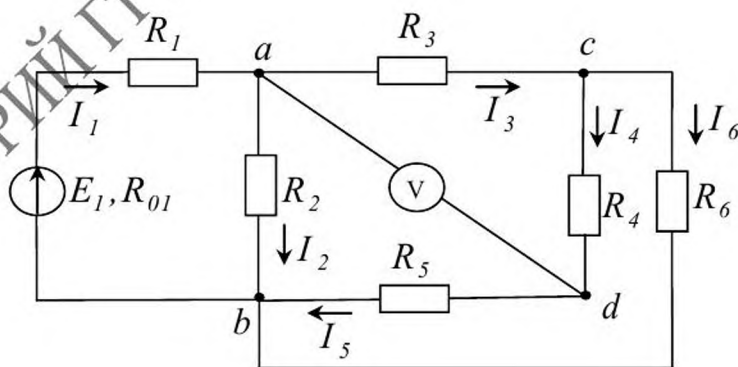


Рисунок 1.1 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с одним источником электрической энергии

Для решения такой задачи отдельные участки электрической цепи с последовательно или параллельно соединенными элементами заменяют одним эквивалентным элементом. Так, резисторы R_4 и R_5 соединены после-

довательно, а резистор R_6 к ним параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление запишется как

$$R_{456} = \frac{R_{45}R_6}{R_{45} + R_6}, \text{ где } R_{45} = R_4 + R_5.$$

Сопротивления R_3 и R_{456} соединены последовательно, поэтому их общее сопротивление будет равно $R_{3456} = R_3 + R_{456}$.

Сопротивления R_2 и R_{3456} соединены параллельно, следовательно

$$R_{23456} = \frac{R_2(R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}}.$$

Эквивалентное (входное) сопротивление всей цепи находят из уравнения

$$R_{\text{экв}} = R_{01} + R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}}.$$

Ток I_1 в неразветвленной части схемы определяют из закона Ома:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{\text{экв}}}.$$

Токи I_2 и I_3 определяют

$$I_2 = I_1 \frac{R_3 + R_{456}}{R_2 + R_3 + R_{456}}; I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_{456}}.$$

Токи $I_4; I_5; I_6$ определяют по следующим формулам:

$$I_4 = I_5 = I_3 \frac{R_6}{R_4 + R_5 + R_6}, I_6 = I_3 \frac{(R_4 + R_5)}{R_4 + R_5 + R_6}.$$

Зная ток I_1 , можно найти ток I_2 по-другому. На основании второго правила Кирхгофа, определяем напряжение на участке ab

$$U_{ab} = E_1 - I_1(R_{01} + R_1), \text{ тогда значение тока будет равно } I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}.$$

Показания вольтметра можно определить, составив уравнение по второму правилу Кирхгофа, например, для контура $abca$:

$$R_3 I_3 + R_4 I_4 = U_{ad}.$$

Правильность вычисленных значений можно проверить, воспользовавшись первым правилом Кирхгофа или уравнением баланса мощностей, которые для схемы, изображенной на рисунке 1.1, имеют вид:

$$I_1 = I_2 + I_3; I_3 = I_4 + I_6;$$

$$E_1 I_1 = (R_{01} + R_1) I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + (R_4 + R_5) I_4^2 + R_6 I_6^2.$$

Если заданы значения сопротивлений ветвей электрической цепи (рисунк 1.1) и ЭДС источника E_1 , то для нахождения токов в ветвях можно воспользоваться методом подобия (методом пропорциональных величин).

Этот метод применим только для расчета линейных цепей, т. е. цепей с постоянными значениями сопротивлений.

Воспользуемся свойствами линейных цепей для определения токов схемы, изображенной на рисунке 1.1 в такой последовательности: зададимся произвольным значением тока I'_6 в резисторе R_6 , наиболее удаленном от источника питания. Как правило, это значение тока берут равным единице. По заданному току I'_6 и сопротивлению R_6 определяем напряжение $U'_{cb} = R_6 I'_6$. Далее определяем параметры цепи от действия тока $I'_6 = 1 \text{ A}$.

$$I'_4 = I'_5 = \frac{U'_{cb}}{R_4 + R_5}; I'_3 = I'_4 + I'_6; I'_2 = \frac{I'_3 R_3 + I'_4 (R_4 + R_5)}{R_2}; I'_1 = I'_2 + I'_3.$$

После этого находим значение ЭДС E'_1 как $E' = (R_{01} + R_1) I'_1 + R_2 I'_2$.

Однако найденное значение ЭДС E'_1 в общем случае отличается от заданной величины ЭДС E_1 . Поэтому для определения действительных значений токов и напряжений вычисляем так называемый коэффициент подобию $K = \frac{E_1}{E'_1}$. Умножая на него полученные при расчете значения токов и напряжений, находим действительные значения токов и напряжений цепи. Метод пропорциональных величин особенно эффективен при расчете разветвленных линейных электрических цепей с одним источником.

Лабораторная работа 1

Цель работы: освоить методы расчета цепей постоянного тока с одним источником ЭДС – метод эквивалентных преобразований («метод свертки») и метод пропорциональных величин («метод подобия»); приобрести навыки в измерении основных параметров электрических цепей постоянного тока.

Материалы и оборудование: блок питания (БП), цифровой мультиметр DT-58, панель монтажная, набор резисторов, набор проводов со штекерами.

Порядок работы

1 Изучить методы расчета цепей постоянного тока с одним источником ЭДС – метод эквивалентных преобразований и метод пропорциональных величин.

2 Выполнить расчет токов в ветвях электрической цепи, схема замещения которой приведена на рисунке 1.2 методом эквивалентных преобразований и методом пропорциональных величин для параметров, приведенных в таблице 1.1. (Вариант задания получить у преподавателя).

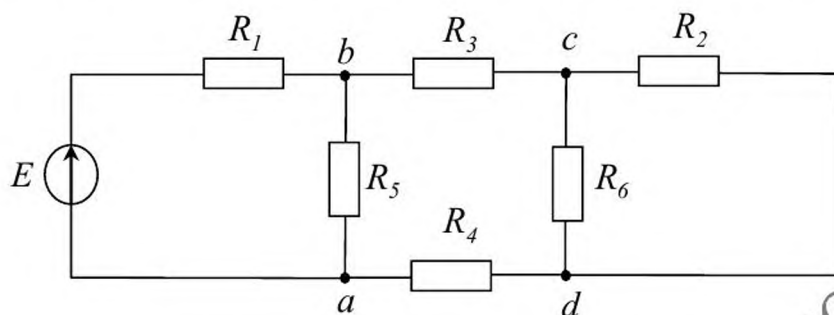


Рисунок 1.2– Схема для исследования разветвленной электрической цепи с одним источником электрической энергии

Таблица 1.1 – Параметры электрической цепи для схемы рисунка 1.2

№ подг.	№ бриг.	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$	$E, \text{В}$
1	1	100	200	270	330	680	470	5
	2	200	270	330	680	470	100	10
	3	270	680	330	470	100	200	5
	4	680	330	470	100	200	270	10
2	1	330	680	100	200	270	470	5
	2	680	100	470	200	330	270	10
	3	100	680	200	330	270	470	5
	4	680	200	330	270	470	100	10
3	1	200	330	270	680	100	470	5
	2	330	270	680	100	470	200	10
	3	680	270	200	470	330	100	5
	4	270	200	680	330	100	470	10
4	1	200	680	330	100	470	270	5
	2	680	330	100	470	270	200	10
	3	330	100	680	270	200	470	5
	4	200	100	330	680	270	470	10

3 Вычислить значения напряжений U_{ab} и U_{cd} .

4 Проверить правильность рассчитанных токов и напряжений в ветвях схемы:

- сравнением результатов расчета токов в ветвях двумя методами;
- выполнением первого правила Кирхгофа для узлов схемы;

– соблюдением баланса мощностей.

5 Измерить сопротивления резисторов с помощью тестера. Сравнить их значения со значениями резисторов, используемых при теоретическом расчете.

6 Собрать на лицевой панели лабораторного стенда схему рисунка 1.2. Параметры резисторов должны соответствовать значениям заданного варианта.

7 На источнике питания, с помощью вольтметра выставить значение заданного напряжения. Проверить правильность выставленного значения напряжения с помощью тестера. Подсоединить источник питания к входу собранной схемы.

8 Подключая поочередно тестер с помощью проводников, в ветвях схемы, содержащих резисторы $R_1; R_2; R_3; R_4$, измерить и записать в таблицу 1.2 значение токов в этих ветвях. Значение токов на резисторах $R_5; R_6$ вычислить по первому правилу Кирхгофа. Если после включения прибора в схему, стрелка отклоняется в обратную сторону, т. е. влево, то следует поменять местами зажимы на схеме либо на тестере (т. е. поменять полярность включения прибора) и записать значение тока со знаком «-».

9 Подключая поочередно тестер с помощью проводников, в ветвях схемы, измерить и записать в таблицу 1.3 значения напряжений на резисторах $R_1; R_2; R_3; R_4; R_5; R_6$.

10 С помощью тестера измерить напряжение между точками a и b U_{ab} и точками c и d U_{cd} . Вычислить токи I_5 и I_6 и сравнить их с токами, вычисленными по первому правилу Кирхгофа.

Таблица 1.2 – Значения токов в ветвях схемы рисунка 1.2

$E, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$	$I_6, мА$

Таблица 1.3 – Значения напряжений на резисторах схемы рисунка 1.2

$E, В$	$U_{R_1}, В$	$U_{R_2}, В$	$U_{R_3}, В$	$U_{R_4}, В$	$U_{R_5}, В$	$U_{R_6}, В$

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

1 Титульный лист.

2 Название и цель работы.

- 3 Порядок расчета электрической цепи двумя методами.
- 4 Таблицы значений токов в ветвях и значений напряжений на резисторах электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 1.2, т.е. таблицы 1.2, 1.3.
- 5 Таблицу сравнения результатов численных расчетов и результатов эксперимента, т. е. таблицу 1.4.
- 6 Выводы по лабораторной работе.

Таблица 1.4 – Таблица сравнения значений численного расчета и экспериментальных данных

Способ определения токов	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$	$I_4, \text{мА}$	$I_5, \text{мА}$	$I_6, \text{мА}$
Расчет токов по методу пропорциональных величин						
Расчет токов по методу эквивалентных преобразований						
Измеренные токи						
Погрешность						

Вопросы для самоконтроля

- 1 Дайте определение электрической цепи.
- 2 Что такое источник ЭДС и источник тока? Чем отличаются реальные источники ЭДС и тока от идеальных источников?
- 3 Дайте определение следующих понятий: узел, ветвь, контур?
- 4 Дайте определение основных законов электрических цепей?
- 5 Приведите основные методы эквивалентного преобразования электрических цепей?
- 6 Как можно преобразовать треугольник сопротивлений в эквивалентную звезду?
- 7 Как можно преобразовать звезду в эквивалентный треугольник?
- 8 Что такое энергетический баланс в электрических цепях?
- 9 Изложите методику расчета электрических цепей по методу пропорциональных величин.
- 10 Изложите методику расчета электрических цепей по методу эквивалентных преобразований.

2 Исследование электрической цепи постоянного тока с двумя источниками ЭДС

1 Метод расчета электрических цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа.

2 Метод контурных токов.

3 Метод наложения.

Основные понятия по теме

Для расчета электрических цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа рекомендуется следующий порядок составления уравнений:

- произвольно выбирают направление токов во всех ветвях. Если принятое направление тока не совпадает с действительным, то при расчете такие токи получаются со знаком минус;

- составляют $(N - 1)$ уравнения по первому правилу Кирхгофа, где N – число узлов;

- недостающие уравнения в количестве $M - (N - 1)$, где M – число ветвей, составляют по второму правилу Кирхгофа, при этом обход контура можно производить как по часовой стрелке, так и против нее. Все значения ЭДС, направления которых совпадают с направлением обхода контура, записываются со знаком плюс, а те ЭДС, направления которых не совпадают – со знаком минус. Направление действия ЭДС внутри источника всегда принимают от минуса к плюсу;

- число составленных уравнений по первому и второму правилам Кирхгофа должно быть равно числу неизвестных токов;

- полученную систему уравнений решают относительно неизвестных токов. [1-4]

На примере электрической цепи, схема, которой изображена на рисунке 2.1, составим систему уравнений по правилам Кирхгофа.

Эта схема имеет шесть ветвей и четыре узла, поэтому по первому правилу Кирхгофа для нее нужно составить три уравнения, например для узла a : $I_1 + I_3 - I_4 = 0$; для узла b : $I_2 + I_5 + I_1 = 0$; для узла c : $I_5 - I_6 + I_4 = 0$.

Выбрав направления обхода контура, составляем три уравнения по второму правилу Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров:

- для контура abc : $E_1 = I_1 R_1 - I_5 R_5 + I_4 R_4$;

- для контура bcd : $E_2 = I_2 R_2 - I_6 R_6 - I_5 R_5$;

- для контура acd : $0 = I_3 R_3 + I_4 R_4 + I_6 R_6$.

Решая совместно записанные уравнения, вычисляют все шесть неизвестных токов. Если в результате решения этих уравнений получаются токи со знаком минус, то это означает, что истинные направления токов в ветвях цепи противоположны тем направлениям, для которых составлены уравнения.

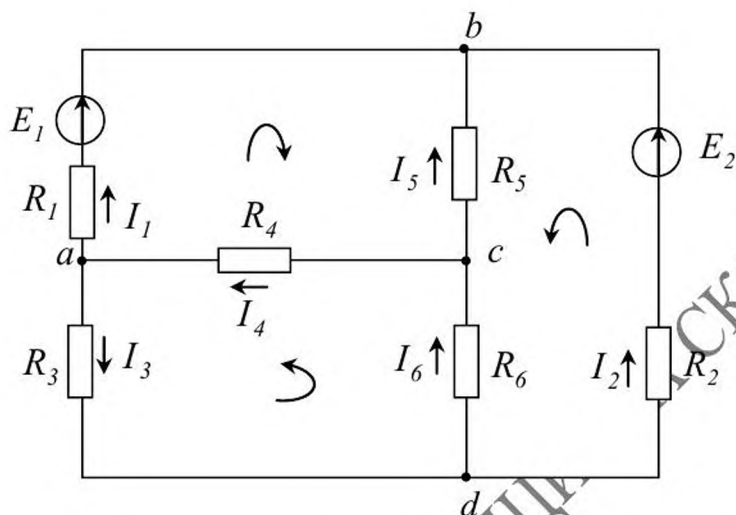


Рисунок 2.1 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии для расчета с применением правил Кирхгофа

Правильность вычисленных значений можно проверить, воспользовавшись первым правилом Кирхгофа или уравнением баланса мощностей.

Рассмотрим метод контурных токов. Этот метод заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях на основании второго правила Кирхгофа определяются так называемые контурные токи. Контурным называется такой расчетный ток, который замыкается только по своему контуру, оставаясь вдоль него неизменным. Тогда действительный ток в любой ветви, принадлежащий только одному контуру, численно равен контурному току, а в ветви, принадлежащей нескольким контурам, равен алгебраической сумме контурных токов, проходящих через эту ветвь.

Число уравнений, составленных по второму правилу Кирхгофа, в этом случае равно числу независимых контуров. Контур считается независимым, если в нем имеется хотя бы одна ветвь, не принадлежащая другим контурам. Число независимых контуров можно определить $M - (N - 1)$, где M – число ветвей, N – число узлов. Направление обхода контура выбирают произвольно, обычно это направление совпадает с направлением контурного тока. Значение ЭДС берется со знаком плюс, если направление обхода контура совпадает с положительным направлением ЭДС, и со знаком минус, если не совпадает.

Рассмотрим электрическую цепь на рисунке 2.2.

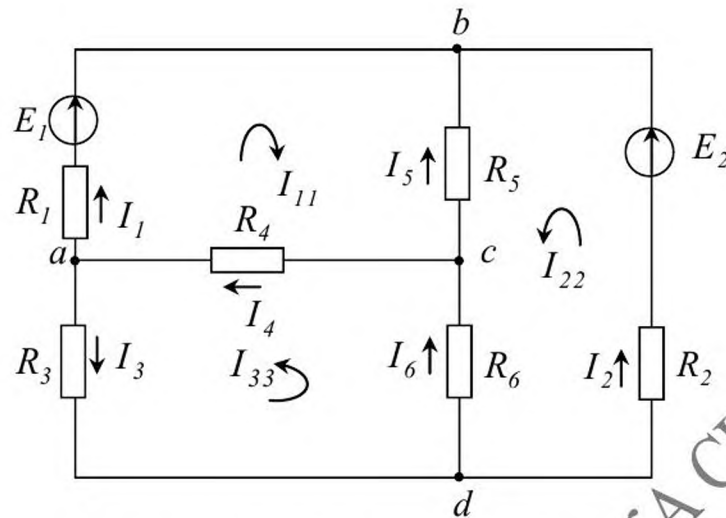


Рисунок 2.2 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии для расчета методом контурных токов

Составим уравнения для трех независимых контуров по методу контурных токов:

- для контура abc : $E_1 = I_{11}(R_1 + R_3 + R_4) + I_{22}R_5 + I_{33}R_4$;
- для контура bcd : $E_2 = I_{11}R_5 + I_{22}(R_2 + R_6 + R_5) - I_{33}R_6$;
- для контура acd : $0 = I_{11}R_4 - I_{22}R_6 + I_{33}(R_4 + R_3 + R_6)$.

Решая совместно уравнения, определяем контурные токи. В том случае, когда контурный ток получается со знаком минус, это означает, что его направление противоположно выбранному на схеме. Зная контурные токи, определяем действительные токи в ветвях схемы следующим образом

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{22}; I_3 = I_{33}; I_5 = -I_{11} - I_{22}; I_4 = I_{11} + I_{33}; I_6 = I_{33} - I_{22}.$$

Рассмотрим метод наложения. Этот метод применим только в линейных электрических цепях, т. е. в цепях, в которых сопротивления элементов не изменяются при прохождении через них тока или приложенного к ним напряжения. Расчет основывается на том, что в ветвях цепи определяют токи от действия каждого источника в отдельности (частичные токи), а затем действительные токи определяются как алгебраическая сумма частичных токов. Рассмотрим схему на рисунке 2.3, а). Исключим в ней источник E_2 , т. е. $E_2 = 0$. Тогда схема примет вид рисунка 2.3, б).

Ток в неразветвленной части цепи будет равен общему току от действия первой ЭДС, т. е.

$$I'_{\text{общ}} = I'_1 = \frac{E_1}{R'_{\text{экв}}}, \text{ где } R'_{\text{экв}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Ток I'_3 определим как $I'_3 = \frac{E_1 - I'_1 R_1}{R_3}$, а $I'_2 = I'_1 - I'_3$.

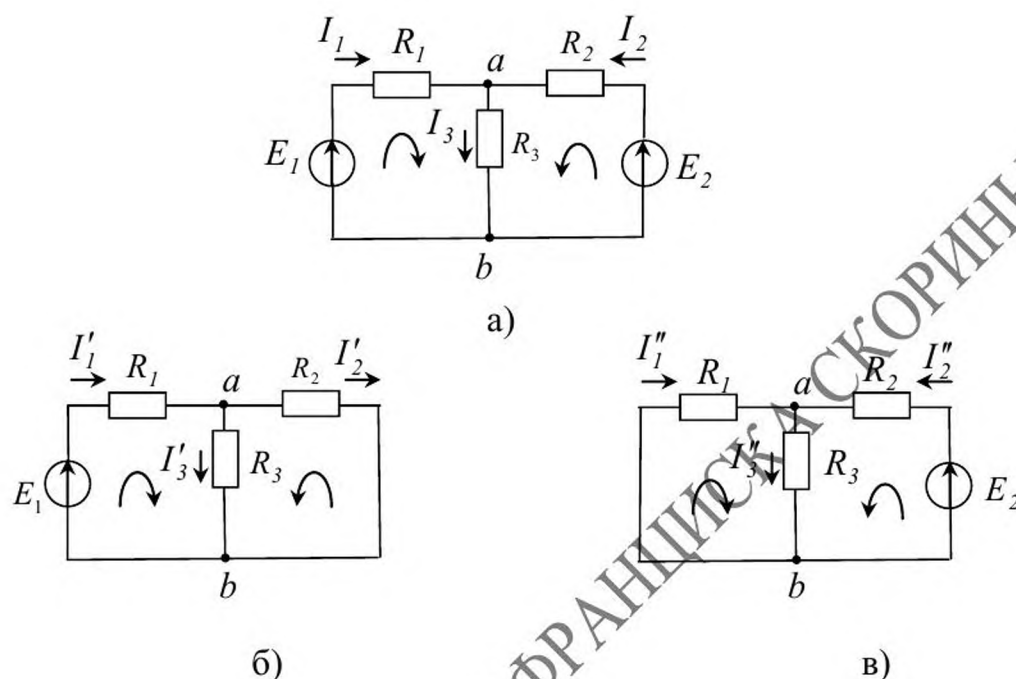


Рисунок 2.3 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии (а) и схемы замещения электрической цепи для определения частных токов от действия ЭДС E_1 (б) и ЭДС E_2 (в)

Токи I'_2 , I'_3 можно определить и так $I'_2 = I'_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3}$, $I'_3 = I'_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3}$.

Исключим источник E_1 , т. е. $E_1 = 0$. Тогда схема примет вид, указанный на рисунке 2.3, в). Ток в неразветвленной части цепи определим как

$$I''_{общ} = I''_2 = \frac{E_2}{R''_{эКВ}}, \text{ где } R''_{эКВ} = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

Ток I''_3 определим как $I''_3 = \frac{E_2 - I''_2 R_2}{R_3}$, а $I''_1 = I''_3 - I''_2$

Токи I'_1 , I'_3 можно определить и так $I''_1 = I''_2 \frac{R_3}{R_1 + R_3}$, $I''_3 = I''_2 \frac{R_1}{R_1 + R_3}$.

Действительные токи определим как алгебраическую сумму частных токов (рисунок 2.3):

$$I_1 = I'_1 + I''_1; I_2 = I''_2 - I'_2; I_3 = I'_3 + I''_3.$$

Для анализа работы электрических цепей и улучшения режимов их ра-

боты, особенно в схемах электроники, важно знать распределение потенциала в цепи. Графическое изображение распределения потенциала в электрической цепи называется потенциальной диаграммой.

Потенциальная диаграмма строится следующим образом. Потенциал одной точки считают равным нулю, т. е. эту точку заземляют, а потенциалы других точек вычисляются по формулам, например, $\varphi_a - \varphi_b = U = IR$. Затем по оси абсцисс откладывают в масштабе сопротивления в том порядке, в котором они следуют друг за другом при обходе контура цепи, а по оси ординат откладывают в масштабе значения потенциалов точек цепи.

Поясним построение потенциальной диаграммы на примере. Построим потенциальную диаграмму для электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.4, если известны следующие значения:

$$E_1 = 12 \text{ В}; E_2 = 34 \text{ В}; E_3 = 22 \text{ В};$$

$$R_1 = 5 \text{ Ом}; R_2 = 4 \text{ Ом}; R_3 = 3 \text{ Ом}; R_4 = 8 \text{ Ом}; R_5 = 2 \text{ Ом}.$$

Внутренним сопротивлением источника ЭДС пренебрежем. Если направление обхода контура совпадает с направлением ЭДС (от минуса к плюсу источника), то ЭДС берется со знаком плюс, и со знаком минус – если не совпадает.

Определяем величину тока в цепи:

$$I = \frac{-E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{-12 + 34 + 22}{5 + 4 + 3 + 8 + 2} = 2 \text{ А}.$$

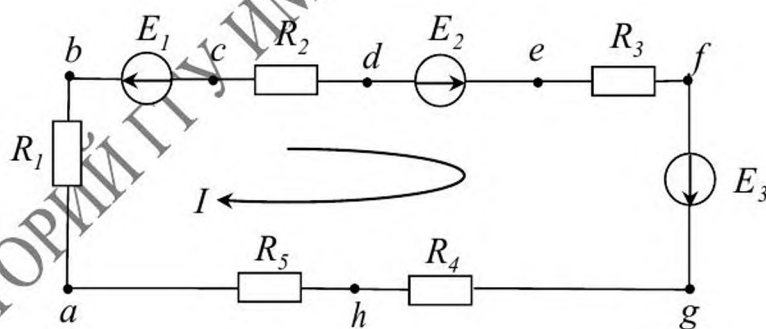


Рисунок 2.4 – Схема замещения электрической цепи для построения потенциальной диаграммы

Начнем обход электрической цепи с точки a , потенциал которой примем равным нулю, т. к. соединен с землей. При переходе от точки a в точку b проходим сопротивление R_1 , в котором имеет место падение напряжения IR_1 , т. е. $\varphi_a - \varphi_b = IR_1$. Тогда потенциал в точке b будет равен $\varphi_b = \varphi_a - IR_1 = 0 - 2 \cdot 5 = -10 \text{ В}$. Между точками b и c в цепи включен источник ЭДС, разность потенциалов на его зажимах будет $\varphi_b - \varphi_c = E_1$, от-

куда $\varphi_c = \varphi_b - E_1 = -10 - 12 = -22 \text{ В}$. Потенциал точки d ниже потенциала точки c на величину падения напряжения IR_2 , т. е. $\varphi_c - \varphi_d = IR_2$, откуда $\varphi_d = \varphi_c - IR_2 = -22 - 2 \cdot 4 = -30 \text{ В}$. Если положительный заряд источника ЭДС присоединен к точке e , а отрицательный – к точке d , то $\varphi_d - \varphi_e = E_2$, откуда $\varphi_e = \varphi_d + E_2 = -30 + 34 = 4 \text{ В}$. Потенциал точки f ниже потенциала точки e на величину падения напряжения IR_3 , т. е. $\varphi_e - \varphi_f = IR_3$, откуда $\varphi_f = \varphi_e - IR_3 = 4 - 2 \cdot 3 = -2 \text{ В}$. Потенциал точки g выше потенциала точки f на величину ЭДС E_3 , т. е. $\varphi_g - \varphi_f = E_3$, откуда $\varphi_g = \varphi_f + E_3 = -2 + 20 = 18 \text{ В}$. Находим потенциал точки h как $\varphi_g - \varphi_h = IR_4$, откуда $\varphi_h = \varphi_g - IR_4 = 18 - 16 = 2 \text{ В}$ и конечная точка a $\varphi_h - \varphi_a = IR_5$, откуда $\varphi_a = \varphi_h - IR_5 = 2 - 2 \cdot 2 = -2 \text{ В}$. По результатам полученных вычислений строим потенциальную диаграмму (рисунок 2.5).

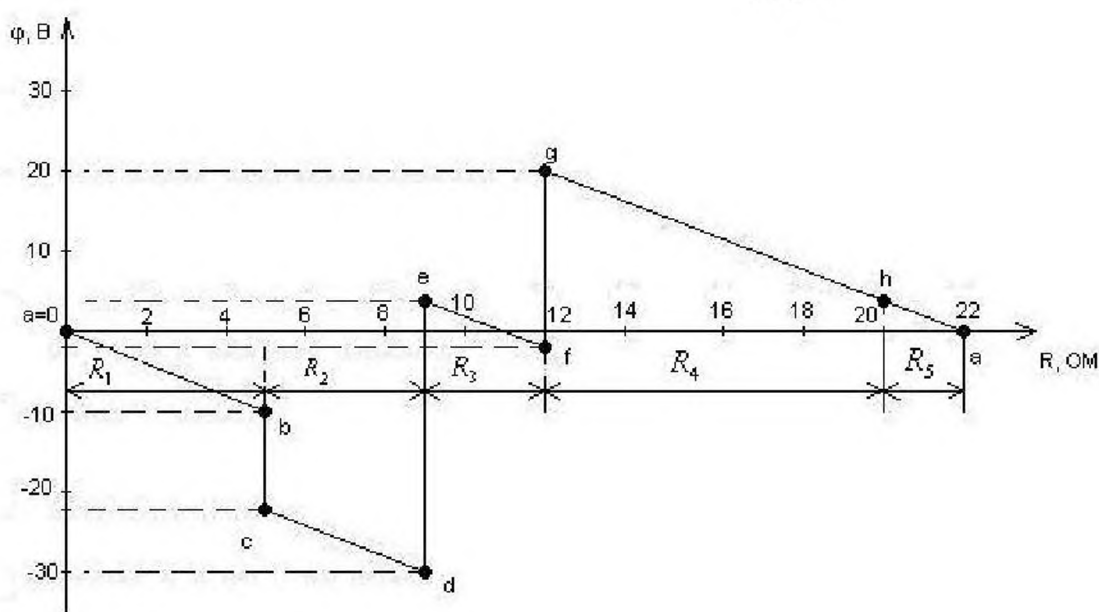


Рисунок 2.5 – Потенциальная диаграмма для электрической цепи рисунка 2.4

Лабораторная работа 2

Цель работы: изучить метод расчета электрических цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа, метод контурных токов, метод наложения, метод расчета узловых потенциалов и освоить правила построения потенциальных диаграмм, приобрести навыки в измерении основных

параметров электрических цепей постоянного тока с двумя источниками ЭДС.

Материалы и оборудование: блок питания (БП), цифровой мультиметр DT-58, панель монтажная, набор резисторов, набор проводов со штекерами.

Порядок работы

1 Изучить следующие методы расчета сложных цепей постоянного тока:

- первое и второе правила Кирхгофа;
- метод контурных токов;
- метод наложения.

2 Выполнить расчет токов в ветвях электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.6 по первому и второму правилам Кирхгофа, по методу контурных токов и по методу наложения для параметров схемы, приведенных в таблице 2.1. (Вариант задания получить у преподавателя).

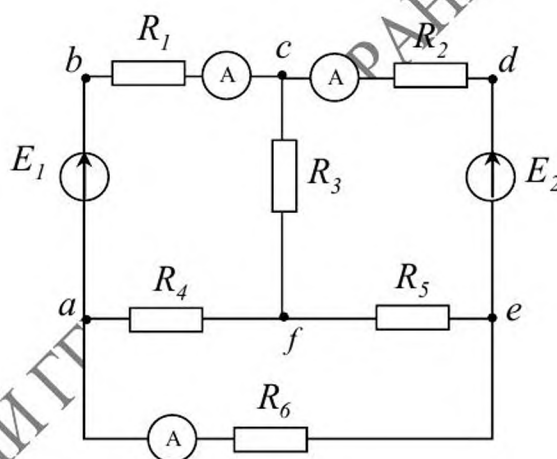


Рисунок 2.6 – Схема для исследования электрической цепи с двумя источниками электрической энергии

3 Рассчитать потенциалы узлов контура $a; b; c; d; e; a$, приняв потенциал точки a за нулевой, т. е. ($\varphi_a = 0$). Результаты расчета занести в таблицу 2.3.

4 Проверить правильность расчета токов в ветвях схемы:

- сравнением результатов расчета токов тремя методами;
- выполнением первого правила Кирхгофа для узлов схемы;
- соблюдением энергетического баланса мощностей.

Таблица 2.1– Параметры электрической цепи для схемы рисунка 2.6

№ подг.	№ бриг.	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$
1	1	100	200	270	330	680	470	5	10
	2	200	270	330	680	470	100	10	5
	3	270	680	330	470	100	200	5	5
	4	680	330	470	100	200	270	10	5
2	1	330	680	100	200	270	470	5	10
	2	680	100	470	200	330	270	10	5
	3	100	680	200	330	270	470	5	10
	4	680	200	330	270	470	100	10	5
3	1	200	330	270	680	100	470	5	10
	2	330	270	680	100	470	200	10	5
	3	680	270	200	470	330	100	5	10
	4	270	200	680	330	100	470	10	5
4	1	200	680	330	100	470	270	5	10
	2	680	330	100	470	270	200	10	5
	3	330	100	680	270	200	470	5	10
	4	200	100	330	680	270	470	10	5

5 Собрать на монтажной панели стенда схему рисунка 2.6 с параметрами, соответствующими номеру вашего варианта, из таблицы 2.1. Выставить значения ЭДС E_1 и E_2 .

6 Подсоединить источник питания E_1 к точкам схемы a и b . Записать значение E_1 в таблицу 2.2.

7 Подключая попеременно тестер с помощью проводников, измерить и записать в таблицу 2.2 значения токов в ветвях с резисторами $R_1; R_2; R_6$. Значение токов в ветвях с резисторами $R_3; R_4; R_5$ вычисляются по первому правилу Кирхгофа. Если после включения прибора в схему стрелка отклоняется влево, то следует поменять местами зажимы на схеме, либо на тестере (т. е. поменять полярность подключения прибора). В ходе измерений клеммы d и e должны быть соединены перемычкой.

8 Отсоединить источник E_1 от схемы, соединив точки a и b перемычкой, подключить источник E_2 соблюдая полярность (взяв его значение из таблицы 2.2) между точками d и e . Измерить токи в ветвях с резисторами $R_1; R_2; R_6$, записав полученные результаты в таблицу 2.2. Значения токов в ветвях схемы с резисторами $R_3; R_4; R_5$ вычисляются по первому правилу Кирхгофа.

9 Подключив источник E_1 к точкам a и b , а источник E_2 к точкам d и e , измерить токи в ветвях с резисторами $R_1; R_2; R_6$, данные занести в таблицу 2.2. Значение токов в ветвях с резисторами $R_3; R_4; R_5$ вычисляются по первому правилу Кирхгофа.

10 Измерить с помощью тестера (в режиме вольтметра) потенциалы точек $a; b; c; d; e$; а в электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.6. Результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.2 – Значения напряжений и токов в схеме рисунка 2.6

Задания	Выставить		Измерить			Вычислить		
Включен источник E_1 , а $E_2 = 0$	E_1, B	E_2, B	I_1, mA	I_2, mA	I_6, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA
		0						
Включен источник E_2 , а $E_1 = 0$	E_1, B	E_2, B	I_1, mA	I_2, mA	I_6, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA
	0							
Включены два источника E_1 и E_2	E_1, B	E_2, B	I_1, mA	I_2, mA	I_6, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA

Таблица 2.3 – Значения потенциалов в схеме рисунка 2.6

Обозначение точек						
Способ определения потенциалов	φ_a, B	φ_b, B	φ_c, B	φ_d, B	φ_e, B	φ_a, B
Рассчитанные потенциалы						
Измеренные потенциалы						

Таблица 2.4 – Таблица сравнения значений численного расчета и экспериментальных данных

Метод наложения						
	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA
Рассчитанные значения токов						
Измеренные значения токов						
Погрешность						
Метод контурных токов						
	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA
Рассчитанные значения токов						
Измеренные значения токов						
Погрешность						
1 и 2 правила Кирхгофа						
	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA
Рассчитанные значения токов						
Измеренные значения токов						
Погрешность						

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1 Титульный лист.
- 2 Название и цель работы.
- 3 Алгоритм и результаты расчета токов в электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.6 тремя методами.
- 4 Результаты расчета потенциалов в узлах электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.6.
- 5 Таблицы 2.2, 2.3, 2.4.
- 6 Графики теоретически рассчитанной и экспериментально полученной потенциальных диаграмм.
- 7 Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Дайте определение электрической цепи, ветви, контура?
- 2 Что такое узел электрической цепи?
- 3 Что понимается под источником ЭДС (реальным, идеальным)? Как отличаются вольтамперные характеристики реального и идеального источников ЭДС?
- 4 Что понимается под источником тока (реального, идеального)? Как отличается вольтамперная характеристика реального и идеального источников ЭДС?
- 5 Дайте формулировку первого и второго правил Кирхгофа?
- 6 Как составляется система уравнений для разветвленной цепи постоянного тока по правилам Кирхгофа?
- 7 Какой контур называется независимым?
- 8 Какое сопротивление называется собственным сопротивлением контура, а какое общим?
- 9 Как составляется система уравнений по методу контурных токов?
- 10 Изложите методику расчета разветвленной цепи постоянного тока по методу наложения.
- 11 Как определить потенциал двух точек в электрической цепи, между которыми включен источник ЭДС, сопротивление?
- 12 Что понимается под энергетическим балансом электрической схемы?
- 13 Объясните принцип построения потенциальной диаграммы?

3 Исследование электрических цепей однофазного синусоидального тока

1 Особенности электромагнитных процессов в электрических цепях однофазного синусоидального тока.

2 Законы Ома и Кирхгофа в электрической цепи однофазного синусоидального тока.

3 Резонансы в электрических цепях.

Основные понятия по теме

Электрические цепи, в которых ЭДС, напряжения и токи изменяются во времени по синусоидальному закону, называются цепями переменного синусоидального тока. Значение переменного тока в любой заданный момент времени называют мгновенным током и обозначают как i [1-3].

Электромагнитный процесс в электрической цепи, при котором мгновенные значения напряжения и токов повторяются через равные промежутки времени, называется периодическим. Наименьшее время, по истечении которого мгновенные значения периодической величины повторяются, называется периодом T . Величина, обратная периоду, т. е. число периодов в единицу времени, называется частотой $f = \frac{1}{T}$. Частота f измеряется в герцах (Гц).

Преобладающим видом периодического процесса в электрических цепях является синусоидальный режим, при котором все напряжения и токи являются синусоидальными функциями одинаковой частоты. Это возможно только при заданных синусоидальных ЭДС и токах источника. Тем самым обеспечивается наиболее выгодный эксплуатационный режим работы электрических установок.

Рассмотрим последовательное соединение резистивного R , индуктивного L и емкостного C элементов в электрической цепи (рисунок 3.1).

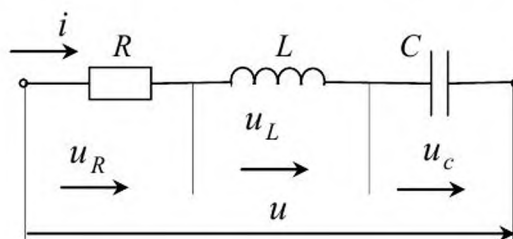


Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи с последовательным соединением элементов

Пусть по цепи протекает ток $i = \sin \omega t$. Определим приложенное к цепи напряжение по второму правилу Кирхгофа $u = u_R + u_L + u_C$. В рассматриваемой цепи напряжение u_R совпадает по фазе с током i на сопротивлении R , напряжение u_L опережает ток i на индуктивности L , а напряжение u_C отстает от тока i на емкости C на угол $\frac{\pi}{2}$.

Напряжение на выводах всей цепи равно:

$$\begin{aligned} U_m \sin(\omega t + \varphi) &= RI_m \sin(\omega t) + \omega LI_m \cos(\omega t) - \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t) = \\ &= RI_m \sin(\omega t) + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \cos(\omega t) = I_m [R \sin \omega t + X \cos(\omega t)], \end{aligned}$$

где X – полное реактивное сопротивление цепи, которое вычисляется по формуле

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

Уравнение представляет собой тригонометрическую форму записи второго правила Кирхгофа для мгновенных значений напряжений и токов.

Если полное реактивное сопротивление цепи $X > 0$, цепь имеет индуктивный характер, если же $X < 0$, цепь имеет емкостной характер. Активное сопротивление R всегда положительно.

Амплитудное значение напряжения запишется как

$$U_m = I_m \sqrt{(R^2 + X^2)},$$

откуда $U_m = ZI_m$, где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – модуль полного сопротивления цепи, а угол можно определить из треугольника сопротивлений как $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$, $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$.

Второе правило Кирхгофа в комплексной форме имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Выразим его через амплитудные значения тока и напряжения

$$\dot{U} = R \dot{I}_m + j\omega L \dot{I}_m + \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_m.$$

Если комплексное сопротивление рассматриваемой цепи равно

$$\underline{Z} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + jX,$$

то закон Ома для амплитудных значений примет вид $\dot{U}_m = \underline{Z} \dot{I}_m$.

С учетом $\frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$ закон Ома для действующих значений примет вид

$$\dot{U} = \underline{Z} \dot{I}.$$

Выразим полное сопротивление цепи в тригонометрической и показательной формах

$$\underline{Z} = Z \cos \varphi + j Z \sin \varphi = Z e^{j \varphi},$$

где Z – модуль комплексного числа, равный $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, а угол сдвига фаз $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$.

Геометрическая сумма векторов $\dot{U}_R; \dot{U}_L; \dot{U}_C$ даёт вектор приложенного к цепи напряжения

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Рассмотрим параллельное соединение резистивного R , индуктивного L и ёмкостного C элементов в цепи однофазного синусоидального тока (рисунок 3.2).

Пусть к выводам цепи приложено синусоидальное напряжение вида $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$.

Мгновенное значение тока определим по первому правилу Кирхгофа $i = i_R + i_L + i_C$.

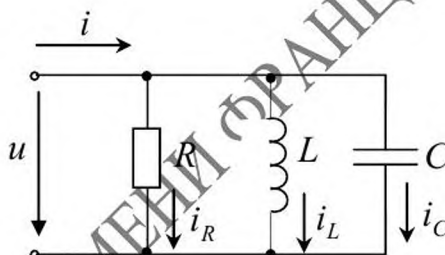


Рисунок 3.2 – Схема электрической цепи с параллельным соединением элементов

Ток i_R в сопротивлении R совпадает по фазе с напряжением u , ток i_L в индуктивности L отстаёт, а ток i_C в ёмкости C опережает напряжение на угол $\frac{\pi}{2}$. Суммарный ток в цепи равен

$$\begin{aligned} I_m \sin(\omega t + \Psi) &= \frac{1}{R} U_m \sin \omega t - \frac{1}{\omega L} U_m \cos \omega t + \omega C U_m \cos \omega t = \\ &= U_m \left[\frac{1}{R} \sin \omega t - \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \cos \omega t \right] = U_m (g \sin \omega t - b \cos \omega t), \end{aligned}$$

где b – полная реактивная проводимость цепи, которая вычисляется по формуле $b = b_L - b_C = \frac{1}{\omega L} - \omega C$. Уравнение представляет тригонометрическую форму записи первого правила Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений.

Если полная реактивная проводимость цепи $b > 0$, то цепь носит индуктивный характер, если $b < 0$ – емкостной характер. Активная проводимость $g = \frac{I}{R}$ всегда положительна.

Амплитудное значение тока запишется как $I_m = \sqrt{g^2 + b^2} U_m$; $I_m = Y U_m$, где $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – модуль полной проводимости рассматриваемой цепи. Действующее значение тока равно $I = \sqrt{g^2 + b^2} U$; $I = Y U$.

Для рассматриваемой цепи ток I отстает от напряжения U на угол

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g} = \arctg \frac{(\frac{1}{\omega L} - \omega C)}{\frac{I}{R}}.$$

Запишем первое правило Кирхгофа в комплексном виде

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = g \dot{U} + \frac{1}{j \omega L} \dot{U} + j \omega C \dot{U},$$

где $\dot{I} = g \dot{U}$ – ток в сопротивлении R ;

$$\dot{I}_L = -j \frac{1}{\omega L} \dot{U} \text{ – ток в индуктивности } L;$$

$$\dot{I}_C = j \omega C \dot{U} \text{ – ток в ёмкости } C.$$

Если комплекс полной проводимости цепи записать как

$$\underline{Y} = g - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = g - j b,$$

где g – активная, b – реактивная проводимости.

Закон Ома в комплексной форме примет вид $\dot{I} = \underline{Y} \dot{U}$, где $\underline{Y} = Y \cos \varphi - j Y \sin \varphi$ или $\underline{Y} = Y e^{-j \varphi}$, $Y = |\underline{Y}|$ – модуль комплексного числа, $\underline{Y}$ – полная проводимость цепи, $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$ – угол сдвига фаз в цепи.

Последовательным колебательным контуром называют такую цепь, в которой катушка индуктивности и конденсатор соединены последовательно относительно входных зажимов (рисунок 3.3). В такой цепи можно наблюдать резонанс напряжений. При резонансе напряжений индуктивное и емкостное сопротивления взаимно компенсируются и в результате этого реактивные сопротивления и реактивная мощность цепи равны нулю.

При резонансе напряжений ток и напряжение совпадают по фазе. В этом случае угол сдвига фаз между током и напряжением равен нулю ($\varphi = 0$) и полное сопротивление цепи равно ее активному сопротивлению.

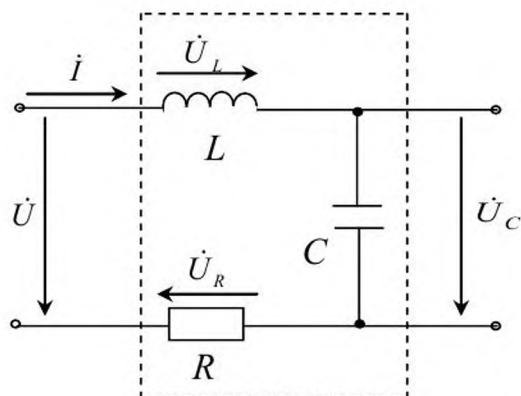


Рисунок 3.3 – Схема последовательного колебательного контура

Если $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$, то угол $\varphi = 0$ при $X = 0$. Следовательно, при резонансе модуль полного сопротивления электрической цепи $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$, так как $X_L - X_C = 0$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, откуда частота при резонансе равна $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ или $f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})}$.

Таким образом, условием возникновения резонанса напряжения в цепи является равенство реактивных сопротивлений $X_L = X_C$, так как в этом случае частота колебательного контура ω_0 равна частоте сети, питающей данную цепь.

Мгновенные значения энергии магнитного и электрического поля соответственно запишутся:

$$W_L = \frac{L i^2}{2}; \quad W_C = \frac{C u^2}{2}.$$

Т. е. в электрической цепи происходит непрерывное перераспределение энергии магнитного и электрического полей, суммарное значение которой постоянно. Вся энергия, поступающая от источника, в момент резонанса расходуется в сопротивлении R .

Отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению, приложенному к цепи при резонансе, называют добротностью контура или коэффициентом резонанса

$$Q_L = \frac{U_L}{U} = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R}; \quad Q_C = \frac{U_C}{U} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R};$$

$$Q_L = Q_C = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R},$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое (волновое) сопротивление контура.

Относительной расстройкой частоты по отношению к резонансной частоте контура называют величину $\delta = \omega - \frac{\omega_0}{\omega_0} = \frac{\omega}{\omega_0} - 1$.

Величину обратную добротности называют коэффициентом затухания контура $d = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\rho}$.

Полное сопротивление цепи минимально при резонансе напряжений, так как ток в цепи достигает своего максимального значения.

Полосу частот вблизи резонанса (рисунок 3.4), на границах которой ток снижается в $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ раз от максимального значения I_0 , принято называть полосой пропускания резонансного контура $2\Delta f = |f_1 - f_2|$, где $f_1; f_2$ – нижняя и верхняя граничная частота.

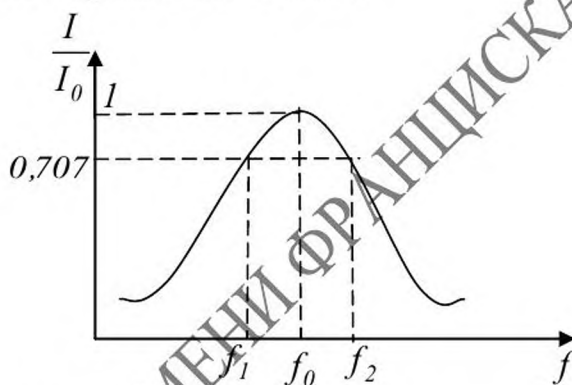


Рисунок 3.4 – Полоса пропускания резонансного контура

Величина добротности Q характеризует остроту резонансной кривой (рисунок 3.5).

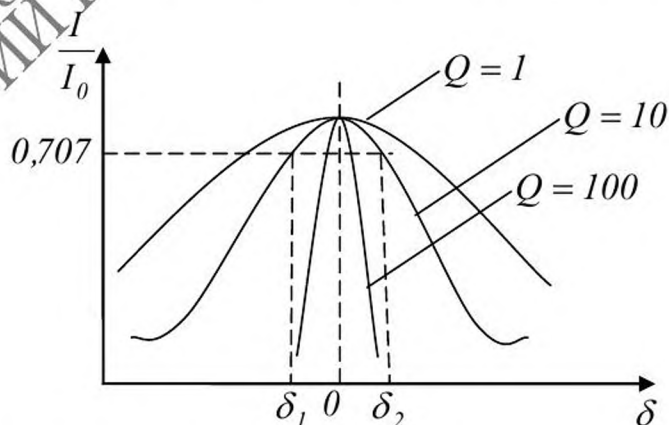


Рисунок 3.5 – Резонансные кривые тока в относительных единицах

Внутреннее сопротивление источника ЭДС R_i влияет на добротность и полосу пропускания колебательного контура. Чем больше R_i , тем ниже добротность и шире полоса пропускания.

В условиях близких к резонансу, напряжения U_L и U_C могут быть велики.

Векторная диаграмма тока и напряжения при резонансе напряжений представлена на рисунке 3.6.

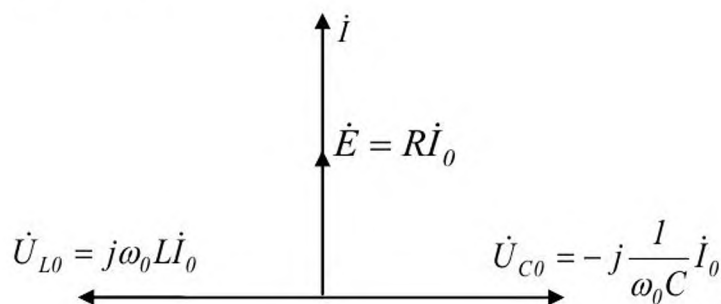


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Зависимость напряжений на емкости и индуктивности от частоты при резонансе напряжений показана на рисунке 3.7, где U_o – напряжение при резонансе.

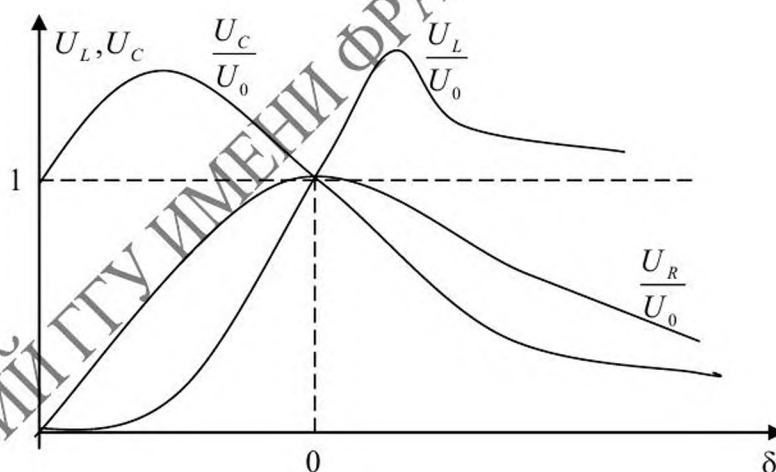


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости напряжений на индуктивности и емкости в относительных единицах

Рассмотрим параллельный колебательный контур, простейшим видом которого является параллельное соединение индуктивной катушки и конденсатора (рисунок 3.8).

Резонансом токов называют такой режим параллельного колебательного контура, при котором ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением ($\varphi = 0$), а мощность, потребляемая из сети, равна активной мощности контура. Реактивная мощность при резонансе из сети не потребляется.

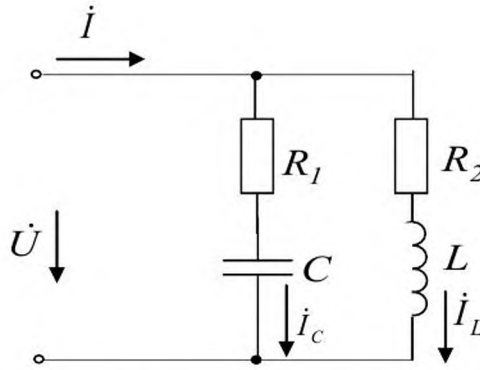


Рисунок 3.8 – Параллельный колебательный контур

При резонансе токов полная реактивная проводимость цепи $b = b_L - b_C = 0$.

Определим резонансную частоту контура:

$$b = b_1 - b_2 = -\frac{1/(C\omega_\rho)}{R_1^2 + (1/\omega_\rho C)^2} + \frac{\omega_\rho L}{R_2^2 + (\omega_\rho L)^2} = 0.$$

После преобразования получаем, что

$$\frac{R_1^2 + (\omega_\rho L)^2}{L} = \frac{1 + R_2^2 (\omega_\rho C)^2}{C},$$

откуда $\omega_\rho = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_2^2}{L/C - R_1^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_2^2}{\rho^2 - R_1^2}}$, где $\omega_\rho = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; $\rho = \sqrt{L/C}$.

Как видно из выражения для резонансной частоты ω_ρ , резонанс токов возможен при одновременном выполнении условий $\rho > R_1$; $\rho > R_2$ или $\rho < R_1$; $\rho < R_2$. Если эти условия не выполняются, то ω_ρ – линейное число. В случае, когда $R_1 = R_2$; $\omega_\rho = \omega_0$, а при $R_1 = R_2 = \rho$; $\omega_\rho = 0/0$, т. е. резонанс токов наступает при любой частоте источника. При этом эквивалентное сопротивление контура не зависит от частоты:

$$\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{(\rho + j\omega L)(\rho - j\frac{1}{\omega C})}{[2\rho + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})]} = \frac{\rho^2 [2 + j\frac{\omega L}{\rho} - \frac{1}{\rho\omega C}]}{\rho [2 + j(\frac{\omega L}{\rho} - \frac{1}{\rho\omega C})]} = \rho.$$

Следовательно, и ток в неразветвленной части цепи не зависит от частоты. Если R_1 и R_2 – сопротивления, учитывающие потери реальных конденсаторов и индуктивной катушки ($R_1 = R_C$; $R_2 = R_L$), то, как правило, $\rho \gg R_1$; $\rho \gg R_2$ при этом, $\omega_\rho \approx \omega_0$.

В контуре без потерь ($R_1 = R_2 = 0$), $I = bU = 0$, токи I_L и I_C равны по величине и противоположны по фазе.

Эквивалентные сопротивления контура с потерями

$$\underline{Z}' = \frac{\underline{Z}_1 \times \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}{R_1 + R_2 + j(X_1 + X_2)} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}{R + jX},$$

где $X_1 = -\frac{1}{\omega C}$; $X_2 = \omega L$; $R = R_1 + R_2$; $X = X_1 + X_2$.

В идеальном случае, например в радиотехнических устройствах, где применяют контуры с малыми потерями, когда практически сопротивления $R_1 = R_2 = 0$ (или они очень малы по сравнению с сопротивлением R), резонансную частоту можно определить, как и при резонансе в последовательном колебательном контуре, по формуле $\omega = 1/\sqrt{LC}$.

Частотные характеристики, т. е. зависимость тока, реактивных проводимостей от частоты при резонансе тока изображены на рисунке 3.9.

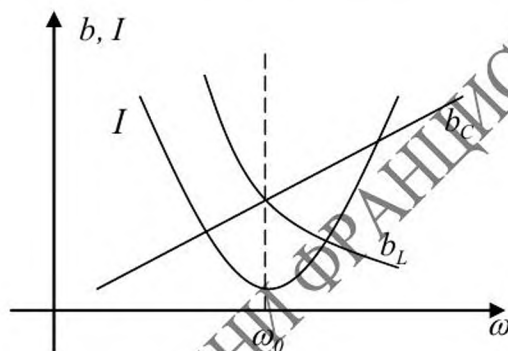


Рисунок 3.9 – Частотная зависимость тока, реактивных проводимостей при резонансе токов

Комплекс полной мощности однофазной цепи синусоидального тока можно определить как

$$\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}^* = UI \cos \varphi + j UI \sin \varphi = P + jQ,$$

где $\dot{I} = I e^{j\psi_1}$, $\dot{U} = U e^{j\psi_2}$, $\varphi = \psi_2 - \psi_1$ – фазовый сдвиг, $P = UI \cos \varphi$ – активная мощность электрической цепи, $Q = UI \sin \varphi$ – реактивная мощность электрической цепи.

Лабораторная работа 3

Цель работы: экспериментальное исследование пассивных элементов (резисторов, катушек индуктивностей, конденсаторов) в электрических цепях однофазного синусоидального тока; изучение основных свойств резонансных контуров при возбуждении в них колебаний источником синусоидального напряжения.

Материалы и оборудование: генератор трехфазного напряжения (ГТН), цифровой мультиметр DT-58, осциллограф С1-101, панель монтажная, набор резисторов, конденсаторов, индуктивностей, набор проводов со штекерами.

Порядок работы

1 Собрать на монтажной панели стенда схему рисунка 3.10, подключив ее к клеммам А и О генератора трехфазного напряжения ГТН.

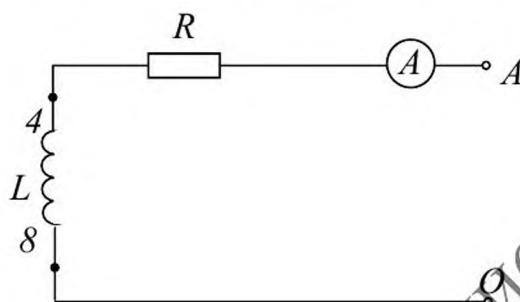


Рисунок 3.10 – Схема для исследования RL -цепи, где A – тестер;
 L – катушка индуктивности трансформатора $TV-I$;
 R – резистор 100 Ом

2 Включить питание стенда и осциллографа, подать сигнал от ГТН (клеммы А и О) на вход осциллографа, установив переключатель режима работы осциллографа в положение « $\sim$ ».

3 Пользуясь органами управления осциллографа (см. лабораторную работу 1 или техническое описание), получить на экране устойчивое изображение нескольких (одного, двух) периодов синусоиды. Вращая ручку «ЧАСТОТА кГц» ГТН, установить частоту f_i по таблице 3.1 (используя связь частоты с периодом колебания и определяя период по положению переключателя «ВРЕМЯ/ДЕЛ»). Значение частоты для своего варианта взять у преподавателя.

Таблица 3.1 – Значения частоты

№ подгруппы	1			2			3		
№ бригады	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$f_i, \text{кГц}$	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9

4 Измерить силу тока в цепи I , напряжение на входе схемы U , напряжение на активном U_R и индуктивном сопротивлениях U_L . Измерить (в обесточенной схеме) активное сопротивление R_k катушки индуктивности.

5 Собрать на монтажной панели стенда схему рисунка 3.11.

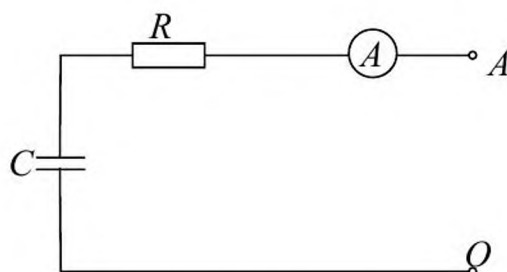


Рисунок 3.11 – Схема для исследования RC – цепи, где A – тестер;
 R – резистор 470 Ом ; C – конденсатор $0,1 \text{ мкФ}$

6 Подключив вход схемы к клеммам A и O генератора трехфазного напряжения ГТН, измерить на заданной частоте f_i силу тока I в цепи, напряжение U на входе схемы, напряжение U_C на конденсаторе, напряжение U_R на сопротивлении.

7 Собрать схему рисунка 3.12, выбрав резистор по таблице 3.2, согласно значению своего варианта.

Таблица 3.2 – Значения сопротивлений резисторов

№ подгруппы	1			2			3		
№ бригады	1	2	3	1	2	3	1	2	3
R_i , Ом	0	25	50	75	100	125	150	175	200

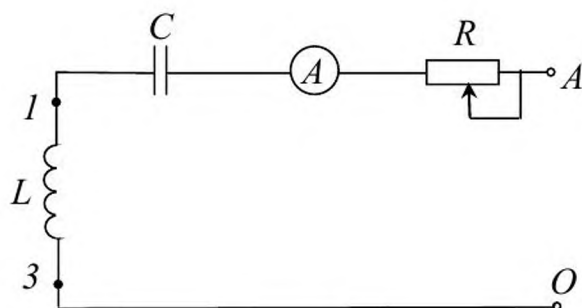


Рисунок 3.12 – Схема для исследования резонанса напряжений, где
 A – тестер; L – катушка индуктивности трансформатора $TV-I$;
 R – резистор (номинал по таблице 3.2); C – конденсатор 560 нФ

8 Измерить активное сопротивление R_k катушки и выставив величину сопротивления R_i по таблице 3.2, применив переменный резистор в режиме реостата на 470 Ом.

9 Подключив схему к клеммам A и O генератора трехфазного напряжения ГТН, вращая ручку частоты ГТН, добиться резонанса напряжений (по максимуму тока I в цепи). Измерить и записать ток I в цепи, напряжение на входе U цепи, напряжение на конденсаторе U_C , напряжение на катушке U_L , и напряжение на сопротивлении U_R . Измерить с помощью осциллографа резонансную частоту f_0 .

10 Вращая ручку частоты ГТН (сначала против часовой стрелки, затем – по часовой стрелке), снять зависимость тока I в цепи от частоты. Результаты измерений записать в таблицу 3.3.

11 Собрать схему рисунка 3.13, используя переменное сопротивление в режиме реостата на 470 Ом, установить его значение из таблицы 3.2.

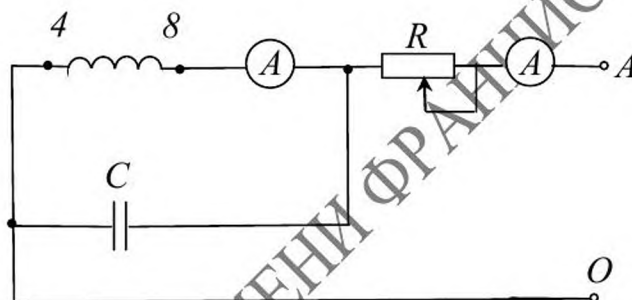


Рисунок 3.13 – Схема для исследования резонанса токов, где A – тестер; L – катушка индуктивности трансформатора $TV-1$; R – резистор (номинал по таблице 3.2); C – конденсатор $0,1 \text{ мкФ}$

12 Изменяя частоту ГТН, настроить схему в резонанс токов (по минимуму тока в неразветвленной части схемы). Измерить и записать напряжение U на входе схемы, ток I_L катушки, ток I_C конденсатора, ток I в неразветвленной части схемы, резонансную частоту f_0 (с помощью осциллографа). Измерить активное сопротивление катушки R_k , в обесточенной схеме.

13 Вращая ручку частоты ГТН, снять зависимость тока I от частоты. Полученные значения записать в таблицу 3.4.

Таблица 3.3 – Таблица измеренных параметров схемы рисунка 3.12

T , мс									
f , кГц									
I , мА									

Таблица 3.4 – Таблица измеренных параметров схемы рисунка 3.13

T , мс									
f , кГц									
I , мА									

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчёт должен содержать:

1 Титульный лист.

2 Название и цель работы.

3 Для электрической схемы рисунка 3.10 результаты измерения тока I , напряжений U ; U_K ; U_R , активного сопротивления R_K катушки индуктивности, результаты расчёта параметров цепи Z ; $Z = \frac{U_K}{I}$; X_L ; $L = \frac{X_L}{2\pi f}$, активного сопротивления цепи $R = R_K + R_i$ и сопротивления резистора $R_i = \frac{U_R}{I}$, активной P , реактивной Q , и полной S мощности цепи и угла сдвига фаз φ на входе цепи. Построенную векторную диаграмму электрической цепи.

4 Для электрической схемы рисунка 3.11 результаты измерений тока I , напряжений U ; U_C ; U_R , результаты расчёта параметров цепи Z ; X_C ; R ; P ; Q ; S ; φ на частоте f_i , а также величину емкости $C = \frac{I}{\omega_i X_C}$. Построенную векторную диаграмму электрической цепи.

5 Для электрической схемы рисунка 3.12 результаты измерения тока I , напряжений U ; U_C ; U_K ; U_R , на резонансной частоте, зависимости тока I от частоты (таблица 3.3), результаты расчёта $Z_K = U_K / I$; $R = U_R / I$; $X_C = U_C / I$; $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$; P ; Q ; S ; φ , график зависимости I_i / I_0 от частоты и результаты расчёта параметров контура Q ; d ; f_0 ; ρ ; $2\Delta f$. Построенную векторную диаграмму электрической цепи.

6 Для электрической схемы рисунка 3.13 результаты измерений напряжения U , токов I ; I_C ; I_K , активного сопротивления катушки индуктивности R_K на резонансной частоте f_0 , зависимости тока от частоты (таблица 3.4), результаты расчетов $Z_K = U_K / I_K$; $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$; $X_C = U_C / I_C$; P ; Q ; S ; φ на f_0 . Построенную векторную диаграмму электрической цепи.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Перечислите основные величины, характеризующие синусоидальный ток. В каких единицах они измеряются?
- 2 Сформулируйте понятия мгновенного, амплитудного, действующего и среднего значений синусоидального тока. Укажите связь между ними?
- 3 Как и для чего вводятся комплексные амплитуды (комплексные действующие значения) тока, напряжение и ЭДС?
- 4 Дайте определение индуктивности. В каких единицах она измеряется? Как реализуется на практике индуктивность как элемент электрической цепи?
- 5 Дайте определение емкости. В каких единицах измеряется емкость?
- 6 Как зависит от частоты индуктивное и емкостное сопротивления, записать эти соотношения?
- 7 Что такое векторная диаграмма электрической цепи, как она строится и для чего применяется?
- 8 Запишите второе правило Кирхгофа для цепи, содержащей последовательное соединение $R; L; C$ элементов и подключенных к источнику напряжения с мгновенным значением ЭДС равным e .
- 9 Запишите закон Ома для комплексных значений тока, напряжения и сопротивления?
- 10 Дайте определение активной, реактивной, полной мощности цепи однофазного синусоидального тока. Что такое треугольник мощностей?
- 11 Дайте определение резонанса напряжений? В какой электрической цепи это явление может наблюдаться?
- 12 Как по показаниям миллиамперметра в последовательном колебательном контуре определить наступление резонанса?
- 13 Дайте определение добротности, коэффициента затухания, характеристического сопротивления, резонансной частоты и полосы пропускания колебательного контура.
- 14 Как связаны между собой величины $Q; f; 2\Delta f$?
- 15 Охарактеризуйте явление резонанса токов в параллельном колебательном контуре.
- 16 Можно ли по показанию одного амперметра определить момент наступления резонанса токов?
- 17 Какое практическое значение имеют явления резонанса токов, резонанса напряжений? Приведите примеры применения колебательных контуров.
- 18 Изложите методику расчёта сложных цепей переменного тока с применением символического метода.

4 Исследование трехфазных цепей при соединении нагрузки треугольником и звездой

- 1 Способы соединения фаз источника трехфазного тока.
- 2 Трехфазные цепи при соединении приемника звездой.
- 3 Трехфазные цепи при соединении приемника треугольником.

Основные понятия по теме

Трехфазные электрические цепи представляют собой частный случай многофазных цепей. Многофазная система электрических цепей есть совокупность нескольких однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, создаваемые общим источником энергии и сдвинутые друг относительно друга по фазе на один и тот же угол. Следует отметить, что термин «фаза» применяют для обозначения угла, характеризующего стадию периодического процесса, а также для названия однофазной цепи, входящей в многофазную цепь [2-5].

Обычно применяют симметричные многофазные системы, у которых амплитудные значения ЭДС одинаковы, а фазы сдвинуты друг относительно друга на один и тот же угол $\frac{2\pi}{m}$, где m – число фаз. Наиболее часто в электротехнике используют двух-, трех- и шестифазные цепи.

Трехфазные цепи – это совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе на один и тот же угол $\frac{2\pi}{3}$.

Источником электрической энергии в трехфазной цепи является синхронный генератор, в трех обмотках которого, конструктивно сдвинутых друг относительно друга на угол $\frac{2\pi}{3}$ и называемых фазами, индуцируются три ЭДС, фазы которых, в свою очередь, также сдвинуты друг относительно друга на угол $\frac{2\pi}{3}$.

Трехфазная система ЭДС, индуцируемых в статоре синхронного генератора, обычно представляет собой симметричную систему. На электриче-

ских схемах обмотки статора трехфазного генератора изображают, как показано на рисунке 4.1, а).

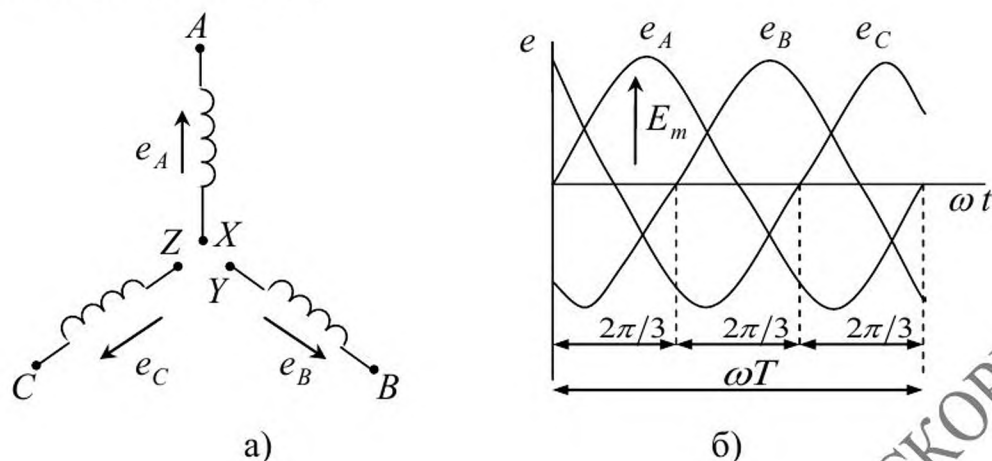


Рисунок 4.1 – Условное изображение обмоток статора трехфазного генератора и трансформатора (а) и графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы (б)

За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе генератора принимают направление от конца к началу обмотки. Если ЭДС фазы *A* принять за исходную, равную нулю, то мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора (рисунок 4.1, б) можно выразить аналитически:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Для симметричной трехфазной системы ЭДС согласно (4.1) справедливо равенство

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (4.2)$$

Учитывая, что вектор ЭДС фазы *A* совмещен с вещественной осью комплексной плоскости (рисунок 4.2), для комплексных значений ЭДС систему (4.1) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= E e^0 = E \\ \dot{E}_B &= E e^{-j \frac{2\pi}{3}} = E \cos \frac{2\pi}{3} - j E \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} E - j \frac{\sqrt{3}}{2} E \\ \dot{E}_C &= E e^{j \frac{2\pi}{3}} = E \cos \frac{2\pi}{3} + j E \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} E + j \frac{\sqrt{3}}{2} E \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Из векторных диаграмм (рисунок 4.2), а также из уравнений (4.3) следует, что

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Таким образом, сумма амплитуд или действующих значений ЭДС симметричной трехфазной системы равна нулю.

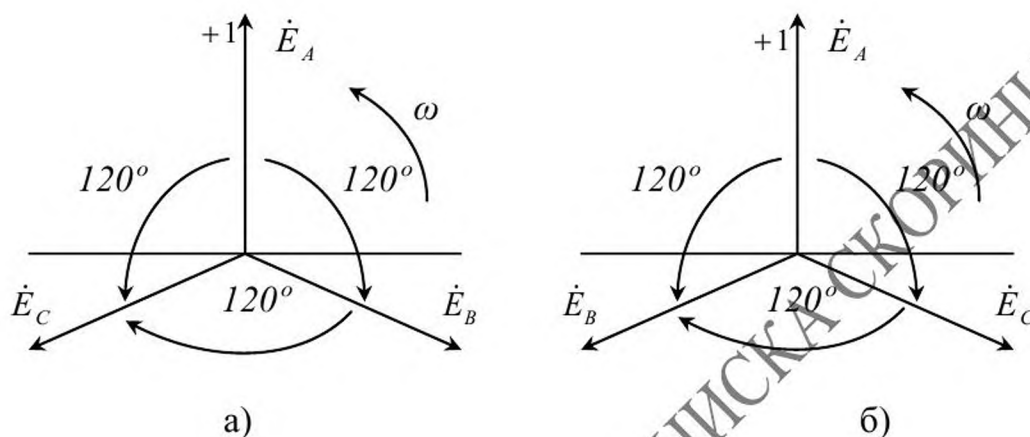


Рисунок 4.2 – Векторные диаграммы прямой (а) и обратной (б) последовательности чередования фаз симметричной трехфазной системы

На рисунке 4.1, б) показано изменение мгновенных значений ЭДС трехфазного генератора, а на рисунке 4.2 даны его векторные диаграммы для прямой и обратной последовательности чередования фаз.

Последовательность, с которой ЭДС в фазных обмотках генератора принимает одинаковые значения, называют последовательностью фаз. Если ротор генератора вращать в прямом направлении, получается последовательность чередования фаз $A; B; C$, т. е. ЭДС фазы B отстает по фазе от ЭДС фазы A и ЭДС фазы C отстает по фазе от ЭДС фазы B .

Такую систему ЭДС называют системой прямой последовательности. Если изменить направление вращения ротора генератора на противоположное, то последовательность чередования фаз будет обратной. У генераторов роторы всегда вращаются в одном направлении, поэтому последовательность чередования фаз никогда не изменяется.

От последовательности чередования фаз зависит направление вращения трехфазных синхронных и асинхронных двигателей. Достаточно поменять местами две любые фазы двигателя, чтобы изменить направление его вращения на противоположное. Последовательность фаз необходимо учитывать при параллельном включении трехфазных генераторов.

С целью уменьшения числа соединительных проводов в трехфазной системе используют связанные цепи, в которых фазы источника или приемника связаны между собой звездой или треугольником.

При соединении фаз источника звездой (рисунок 4.3, а) концы фаз $X; Y; Z$ объединены в общую точку 0 , называемую нейтральной, а начала фаз $A; B; C$ с помощью проводов соединены с приемником тремя проводами, которые называются линейными. Такую трехфазную систему называют трехпроводной.

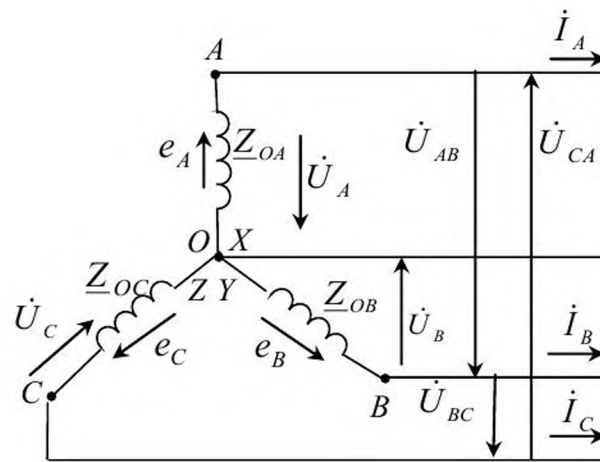
При соединении фаз источника треугольником (рисунок 4.3, б) необходимо подключить конец каждой фазы к началу следующей, т. е. конец X первой фазы – с началом B второй фазы, конец Y второй фазы – с началом C третьей фазы и конец третьей фазы X – с началом A первой фазы. Начала фаз $A; B; C$ с помощью проводов соединяют с приемниками. При соединении фаз источника треугольником создается замкнутый контур, в котором при отключенных приемниках, может возникнуть ток короткого замыкания, однако этого не происходит, так как в симметричной трехфазной системе сумма мгновенных значений ЭДС равна $e_A + e_B + e_C = 0$. Следовательно, при холостом ходе источника ток в его фазах не возникает.

Трехфазные приемники могут быть соединены как звездой, так и треугольником. Если нагрузка несимметричная, т. е. сопротивления фаз приемника не равны между собой, то при соединении источника и приемников звездой необходимо применять помимо трёх линейных проводов четвертый, нейтральный провод, соединяющий нейтральные точки 0 и $0'$ источника и приемника.

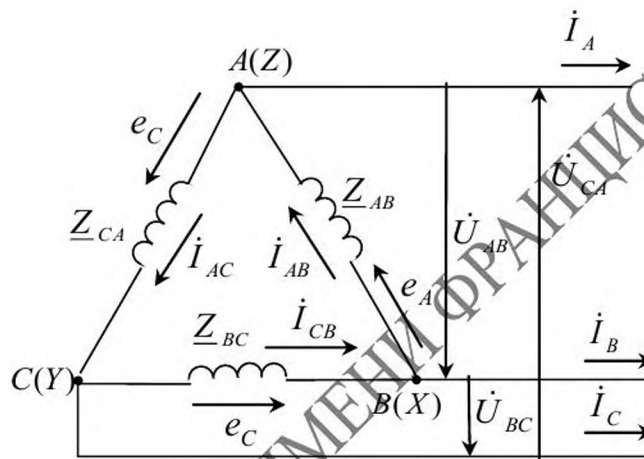
Напряжение между началом и концом фазы источника называют фазным. Например, при соединении звездой фазными являются напряжения между началами фаз и нейтральной точкой источника 0 (рисунок 4.3, а).

Фазными токами называются токи, проходящие через каждую фазу источника или приемника. Напряжения между началами $A; B; C$ фаз источника или между линейными проводами называются линейными напряжениями, а токи в линейных проводах – линейными токами.

При анализе трехфазных цепей важно знать условные положительные направления ЭДС, напряжений и токов, т. к. от их выбора зависят знаки в уравнениях, составляемых по правилам Кирхгофа, а также направления векторов на векторных диаграммах. За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе источника принимают направление от её конца к началу, а за условное положительное направление напряжения в каждой фазе источника принимают направление от начала фазы к её концу. Направление же фазных токов совпадает с направлением ЭДС в каждой фазе источника (рисунок 4.3).



а)



б)

Рисунок 4.3 – Схемы соединения фаз источника звездой (а) и треугольником (б)

За условные положительные направления линейных напряжений принимают направление от начала одной фазы к началу другой, в частности, напряжение U_{AB} направлено от A к B . Линейные токи, проходящие через линейные провода, всегда направлены от источника к приемнику. Фазные напряжения и токи приемников направлены в одну и ту же сторону.

Согласно второму правилу Кирхгофа, ЭДС фазы $A0$ при соединении звездой $\dot{E}_A = \dot{I}_A \underline{Z}_{OA} + \dot{U}_A$, откуда $\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{I}_A \underline{Z}_{OA}$, где $\underline{Z}_{OA}$ – внутреннее сопротивление фазы A источника. Аналогично находят напряжения в двух других фазах $\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{I}_B \underline{Z}_{OB}$; $\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{I}_C \underline{Z}_{OC}$, где $\underline{Z}_{OB}$ – внутреннее сопротивление фазы B источника, $\underline{Z}_{OC}$ – внутреннее сопротивление фазы C источника.

На практике приемники подключают не к отдельному источнику, а к сети, питающейся от системы параллельно работающих генераторов. Поэтому обычно пренебрегают внутренним сопротивлением фаз источников и считают фазные ЭДС равными фазным напряжениям.

Чтобы найти связь между фазными и линейными напряжениями, при соединении источников ЭДС звездой согласно с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений по второму правилу Кирхгофа можно записать следующие соотношения:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_B - \dot{U}_A = 0; \quad \dot{U}_{BC} + \dot{U}_C - \dot{U}_B = 0; \quad \dot{U}_{CA} + \dot{U}_A - \dot{U}_C = 0,$$

Откуда

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (4.5)$$

Для симметричных источников

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_\phi; \quad \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_L.$$

Если принять потенциал нейтральной точки источника $\varphi_0 = 0$, то потенциалы начала его фаз будут равны фазным напряжениям:

$$\dot{U}_A = \varphi_A - \varphi_0 = \varphi_A; \quad \dot{U}_B = \varphi_B - \varphi_0 = \varphi_B; \quad \dot{U}_C = \varphi_C - \varphi_0 = \varphi_C,$$

а линейные напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \varphi_B - \varphi_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \varphi_C - \varphi_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \quad (4.6)$$

По соотношениям (4.5), зная значения фазных напряжений, можно построить векторные диаграммы фазных и линейных напряжений источника при соединении его фаз звездой (рисунок 4.4), которые будут представлять собой симметричную систему векторов, так как система фазных и линейных напряжений трехфазных генераторов, питающих электрическую сеть, вследствие их конструктивных особенностей симметрична.

Векторная диаграмма, представленная на рисунке 4.4, а) соответствует симметричной системе фазных и линейных напряжений при соединении источников звездой.

Векторную диаграмму фазных и линейных напряжений источника при соединении звездой можно представить, и как показано на рисунке 4.4, б), где линейные напряжения изображены векторами, соединяющими соответствующие векторы фазных напряжений.

Из векторных диаграмм можно получить соотношение, связывающее между собой фазные и линейные напряжения симметричного источника при соединении звездой. Так для фазы A линейное напряжение равно $\dot{U}_{AB} = 2U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_A$. В общем случае при соединении фаз симметричного источника звездой связь между линейными и фазными напряжениями описывается выражением $U_L = \sqrt{3} U_\phi$.

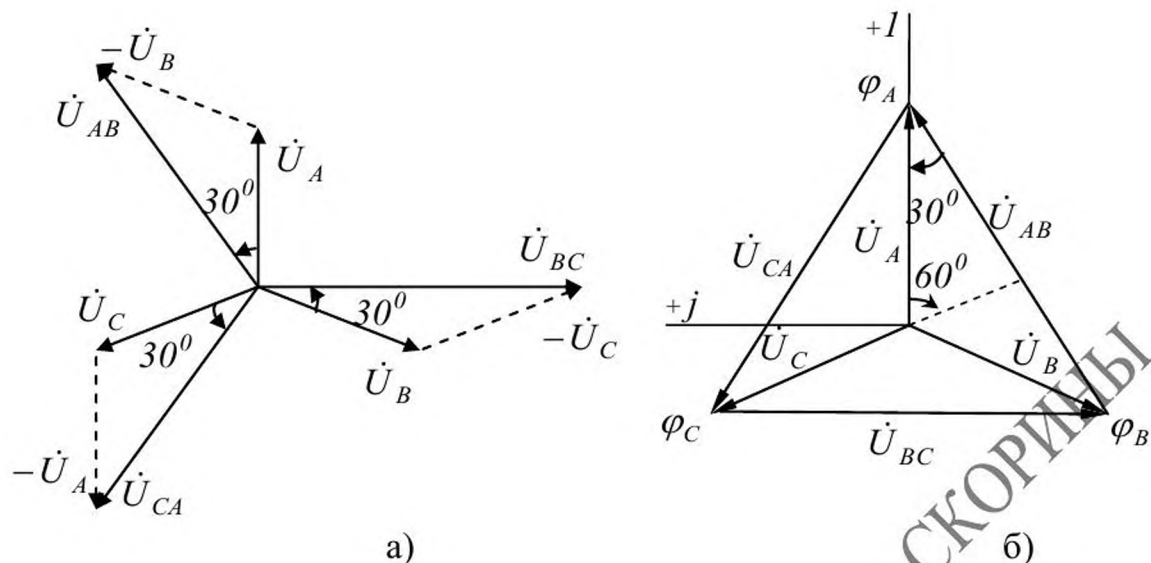


Рисунок 4.4 – Векторная (а) и топографическая (б) диаграммы напряжений трехфазного источника при соединении его фаз звездой

Следует отметить, что в практике эксплуатации синхронных генераторов фазы их трехфазных обмоток соединяют только звездой, так как при отклонении ЭДС источника от синусоидальной формы из-за наличия высших гармоник сумма мгновенных значений ЭДС не будет равна нулю. При соединении фаз синхронного генератора треугольником при холостом ходе в его обмотках будут возникать токи, которые будут вызывать их нагревание и снижение КПД генератора. Из рисунка 4.3, б) видно, что при соединении фаз источника треугольником линейные напряжения равны фазным $U_L = U_\phi$.

Итак, независимо от способа соединения фаз источника линейные напряжения между линейными проводами трехфазной цепи одинаковы и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $\frac{2\pi}{3}$, вследствие чего сумма их мгновенных значений или векторов всегда равна нулю. Однако значение линейных напряжений при соединении фаз источника треугольником будут в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем значения линейных напряжений при соединении фаз того же источника звездой.

Рассмотрим трехфазную цепь при соединении симметричного приемника звездой. В этом случае концы фаз приемника соединены в общий узел O' , а концы фаз генератора соединены в общий узел O . Если узлы O и O' соединить проводом, называемым нейтральным, с сопротивлением $Z_{OO'}$, то получим четырехпроводную цепь (рисунок 4.5, а). Сопротивления проводов, связывающих источник с нагрузкой, можно учесть в сопротивлениях нагрузки Z_a ; Z_b ; Z_c .

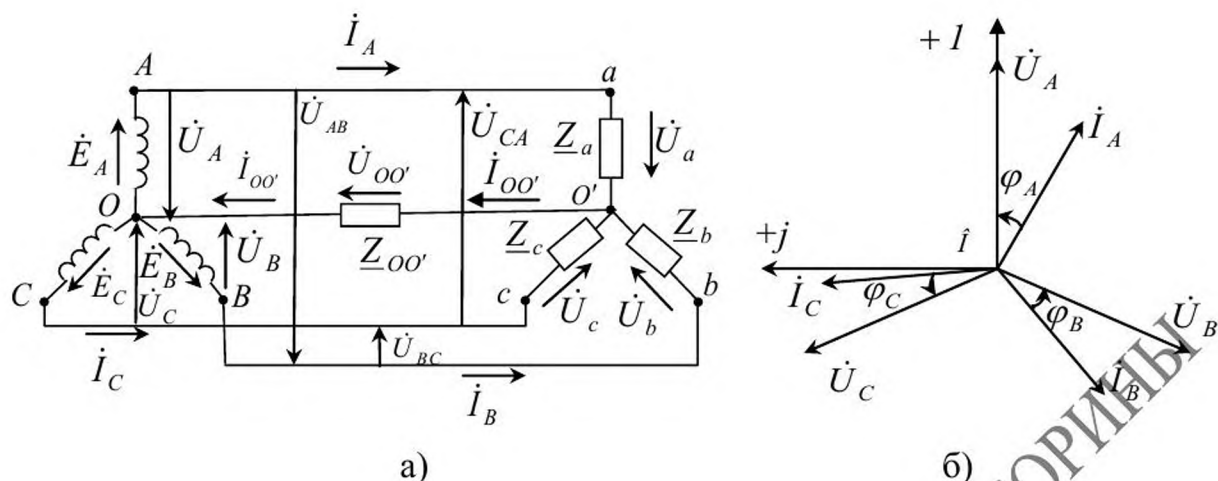


Рисунок 4.5 – Схема четырехпроводной трехфазной цепи (а) и векторная диаграмма (б) напряжений и токов симметричного приемника, соединенного звездой

Так как при соединении звездой фазы генератора соединены последовательно с фазами нагрузки, линейные токи одновременно являются и фазными токами, как в фазах генератора, так и фазах нагрузки $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

За условные положительные направления линейных токов $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ принимают направления от источника к нагрузке, а за положительное направление тока в нейтральном проводе – от нагрузки к источнику.

Согласно первому правилу Кирхгофа, ток в нейтральном проводе равен

$$\dot{I}_{OO'} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

При симметричной нагрузке напряжения $\dot{U}_a = \dot{U}_b = \dot{U}_c$ и сопротивления $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$, поэтому токи в фазах приемника равны по значению и сдвинуты по фазе на один и тот же угол относительно соответствующих напряжений, т. е. на угол $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$. Векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной нагрузки представлена на рисунок 4.5, б). Из диаграммы видно, что ток в нейтральном проводе равен нулю $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$. Таким образом, если нагрузка симметричная (равномерная), то необходимость в нейтральном проводе отпадает. Трехфазная цепь без нейтрального провода является трехпроводной цепью.

Рассмотрим четырехпроводную цепь более подробно. Найдем для этой цепи напряжение между нейтральными точками O и O' или смещение нейтрали по методу двух узлов

$$\dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_{OO'}}, \quad (4.10)$$

где $\dot{U}_A = U_A$; $\dot{U}_B = U_A e^{-j120^\circ}$; $\dot{U}_C = U_A e^{j120^\circ}$; $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$; $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$; $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ –

комплексные проводимости фаз приемника; $\underline{Y}_{OO'} = \frac{1}{\underline{Z}_{OO'}}$ – комплексная

проводимость нейтрального провода. Так как при симметричной нагрузке $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c$, то (4.10) можно переписать в виде

$$\dot{U}_{OO'} = \frac{\underline{Y}_a(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{3\underline{Y}_a + \underline{Y}_{OO'}}. \quad (4.11)$$

Для случая симметричной нагрузки имеем $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0$, а значит $\dot{U}_{OO'} = 0$. Так как ток в нейтральном проводе $\dot{I}_{OO'} = \frac{\dot{U}_{OO'}}{\underline{Z}_{OO'}}$, то при симметричной нагрузке $\dot{I}_{OO'} = 0$.

Согласно второму правилу Кирхгофа, для контуров (рисунок 4.5, а) $OAaO'O$; $OBbO'O$; $OCcO'O$ находим

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{OO'}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{OO'}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{OO'}. \quad (4.12)$$

Так как, при симметричной нагрузке $\dot{U}_{OO'} = 0$, то из (4.12) следует, что $\dot{U}_a = \dot{U}_A$; $\dot{U}_b = \dot{U}_B$; $\dot{U}_c = \dot{U}_C$.

Итак, зная фазные напряжения и сопротивления нагрузки, находим токи в каждой фазе приемника

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}. \quad (4.13)$$

Так как при симметричной нагрузке токи в фазах приемника равны, то достаточно определить ток только в одной из фаз трехфазной цепи.

Рассмотрим трехфазную цепь с несимметричным приемником, соединенным звездой, т. е. для которого $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$. В этом случае для анализа применяют четырехпроводные цепи. Так как напряжения на фазах приемника различны, то нарушается соотношение между фазными и линейными напряжениями $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, причем на одних фазах приемника напряжение становится большим, а на других – меньшим чем $\frac{U_L}{\sqrt{3}}$.

Наличие нейтрального провода в цепи с несимметричным приемником позволяет выравнять напряжение на фазах приемника и поддерживать их постоянными, равными фазным напряжениям источника $\frac{U_L}{\sqrt{3}}$, т. е. нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника. Иначе говоря, при наличии нейтрального провода, когда $\underline{Z}_{OO'} = 0$, даже при несимметричном приемнике фазные напряжения равны друг дру-

гу и соблюдается соотношение между фазными и линейными напряжениями $U_L = \sqrt{3}U_\phi$.

Если сопротивления приемника несимметричны и нейтральный провод имеет конечное сопротивление $Z_{OO'}$, то напряжение $\dot{U}_{OO'}$ между нейтральными точками O и O' определяется по формуле (4.10), а напряжения на фазах нагрузки – по формулам (4.12). Тогда токи в схеме рисунка 4.5, а) запишутся как:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = (\dot{U}_A - \dot{U}_{OO'}) Y_a; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = (\dot{U}_B - \dot{U}_{OO'}) Y_b; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = (\dot{U}_C - \dot{U}_{OO'}) Y_c; \quad \dot{I}_{OO'} = \frac{\dot{U}_{OO'}}{Z_{OO'}} = \dot{U}_{OO'} Y_{OO'} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \end{aligned}$$

Если напряжения источника $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$ образуют симметричную систему, то при отсутствии нейтрального провода и при $\dot{U}_{OO'} \neq 0$ напряжения на фазе нагрузки $\dot{U}_a; \dot{U}_b; \dot{U}_c$ несимметричны, что видно из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 4.6. Особенностью этой диаграммы является то, что каждой точке электрической цепи $A; B; C; O; O'$ соответствует определенная точка на диаграмме.

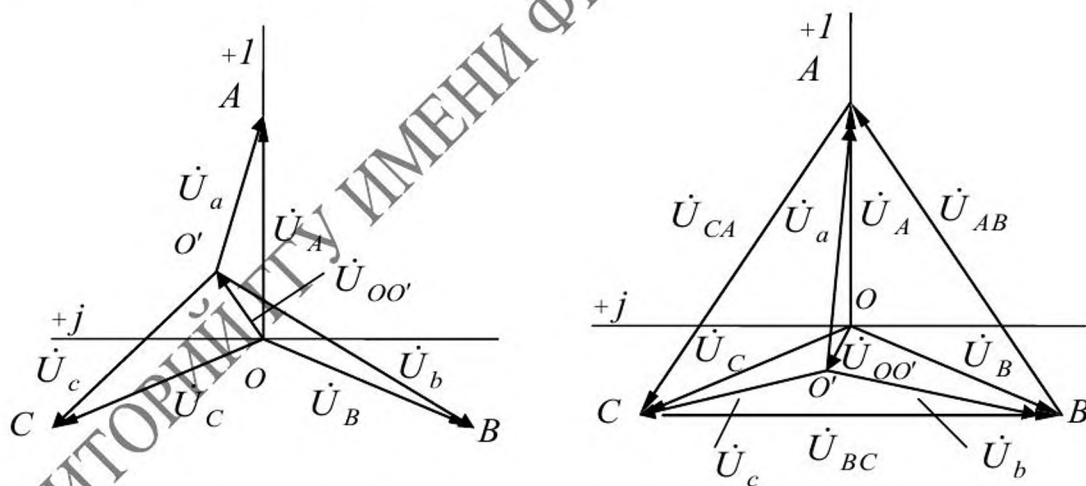


Рисунок 4.6 – Векторные диаграммы напряжений и токов несимметричного приемника, соединенного звездой

Напряжения на фазах нагрузки тем больше отличаются друг от друга, чем больше напряжение $\dot{U}_{OO'}$. Из выражения (4.10) и из рисунка 4.6 видно, что напряжение между нейтральными точками $\dot{U}_{OO'}$ будет изменяться при изменении нагрузки в любой фазе, при этом с изменением $\dot{U}_{OO'}$ будет изменяться напряжение всех фаз приемника.

Чтобы напряжения на фазах приемника были одинаковыми, необходимо чтобы $\dot{U}_{OO'} = 0$, что может быть получено двумя способами. Во-

первых, выравниванием сопротивления в фазах приемника, т. е. чтобы $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_\phi$, а значит, согласно (4.10),

$$\dot{U}_{OO'} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{OO'}} = \frac{\underline{Y}_\phi (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{OO'}} = 0,$$

так как $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$.

Во-вторых, если имеется нейтральный провод с сопротивлением $\underline{Z}_{OO'} = 0$, то напряжение $\dot{U}_{OO'}$ согласно (4.10), также принимает нулевое значение независимо от нагрузки фаз. Для этого случая построена векторная диаграмма (рисунок 4.7).

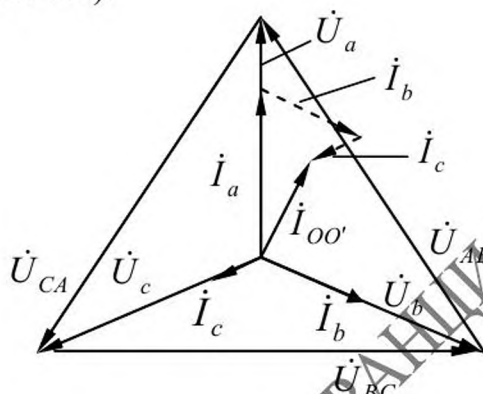


Рисунок 4.7 – Векторная диаграмма напряжений и токов несимметричного приемника, соединенного звездой при $\underline{Z}_{OO'} = 0$

При обрыве нейтрального провода и несимметричной нагрузке напряжение $\dot{U}_{OO'}$ станет максимальным. В фазах нагрузки могут возникнуть перенапряжения, поэтому в нейтральный провод плавкий предохранитель не ставят.

Рассмотрим трехфазную цепь при соединении симметричных приемников треугольником (рисунок 4.8).

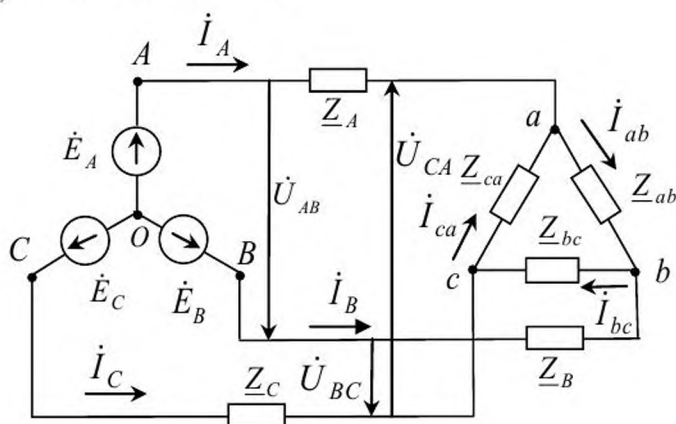


Рисунок 4.8 – Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

Если учесть сопротивление линейных проводов, то потенциалы вершин этого треугольника будут отличаться от потенциалов зажимов источника, поэтому зажимы трехфазного приемника обозначены a, b, c . Из схемы рисунка 4.8 видно, что каждая фаза приемника непосредственно подключена на линейное напряжение, т. е.

$$U_{\phi} = U_{\text{л}}. \quad (4.14)$$

Однако, при соединении треугольником, в отличие от соединения звездой фазные и линейные токи не равны между собой. У приемников условно принятые положительные направления линейных напряжений совпадают с условными положительными направлениями фазных токов. Применяя первое правило Кирхгофа к узловым точкам a, b, c , определяем линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \quad (4.15)$$

где $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ – линейные токи; $\dot{I}_{ab}; \dot{I}_{ca}; \dot{I}_{bc}$ – фазные токи.

Из (4.15) следует, что значения линейных токов $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ равны геометрической разности векторов соответствующих фазных токов.

Зная сопротивление фаз приемника, можно определить фазные токи по формулам:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (4.16)$$

Из уравнения (4.15) следует, что геометрическая сумма векторов линейных токов в трехпроводной цепи равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Так как при симметричной нагрузке комплексы полных сопротивлений фаз $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$ и значения напряжений $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ca}$ равны, то также равны между собой фазные токи и углы сдвига их фаз по отношению к соответствующим фазным напряжениям:

$$I_{ab} = I_{ca} = I_{bc} = I_{\phi}; \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi.$$

На рисунке 4.9 изображена векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке, соединенной треугольником. Из векторной диаграммы видно, что фазные токи сдвинуты относительно друг друга на угол $\frac{2\pi}{3}$ и что линейные токи отстают от соответствующих фазных токов

на угол $\frac{\pi}{6}$. Находим соотношение между линейным I_A и фазным I_{ab} токами: $I_A = 2I_{ab} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{ab}$. Такое же соотношение будет между другими линейными и фазными токами. При симметричной нагрузке линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}$.

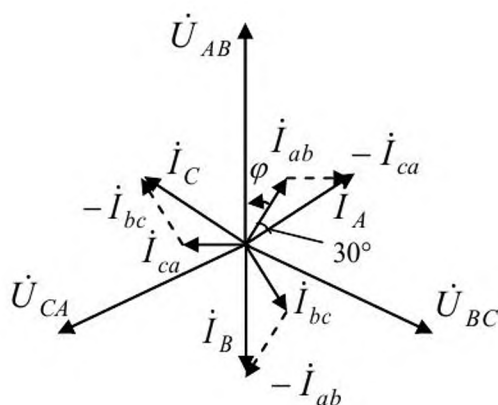


Рисунок 4.9 – Векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке, соединенной треугольником

Если нагрузка симметрична, то обычно расчет проводят по одной фазе:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad I_L = \sqrt{3}I_\phi.$$

Несимметричной нагрузкой в общем случае считают, когда сопротивление фаз $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Однако нагрузка несимметрична и в том случае, когда сопротивление хотя бы одной из фаз не равно сопротивлениям других фаз. При несимметричной нагрузке фазные токи, углы сдвига фаз между фазными токами и напряжениями, а также линейные токи различные. При этом фазные токи определяют, как и при симметричной нагрузке, по формулам (4.16), а линейные токи по формулам (4.15).

Линейные токи можно определить и графическим способом, построив векторную диаграмму напряжений и токов (рисунок 4.10). Построение векторов линейных токов на диаграмме производится в соответствии с выражениями (4.15).

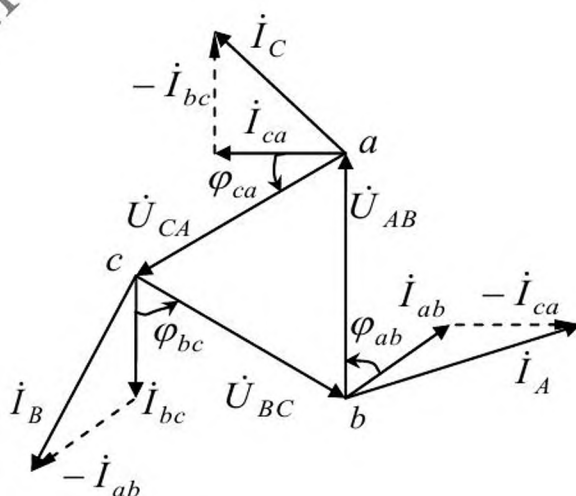


Рисунок 4.10 – Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов при нагрузке соединенной треугольником

Необходимо отметить, что, согласно (4.15), геометрическая сумма векторов линейных токов в трехфазной цепи при несимметричной нагрузке, соединенных треугольником, также как и при симметричной нагрузке, равна нулю.

Если пренебречь сопротивлением линейных проводов, то напряжения фаз приемника будут равны напряжениям источника. В этом случае фазы приемника независимы друг от друга, т. е. изменение сопротивления в какой-либо одной фазе приемника вызывает изменение тока этой фазы и токов в двух линейных проводах, соединенных с этой фазой, но никак не отражается на токах других фаз. Если же сопротивления линейных проводов не равны нулю, то из-за падения напряжения в них при соединении треугольником не обеспечивается независимость фаз. Например, изменение сопротивления фазы ab вызовет изменение фазного тока $\dot{I}_{ab}$, а, следовательно, и линейных токов $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_B$. При этом происходит падение напряжения в линейных проводах A и B , что при неизменных линейных напряжениях на зажимах генератора вызывает изменение напряжений на всех трех фазах приемника, так как потенциалы узлов a и b изменяются, то изменяются также токи $\dot{I}_{bc}$ и $\dot{I}_{ca}$ в тех фазах, сопротивление которых оставалось неизменным. Следует отметить, что при расчетах трехфазных цепей считают, что генераторы имеют симметричную систему напряжений.

Несимметрия нагрузки практически не влияет на систему напряжений фаз генератора в том случае, если мощность нагрузки очень мала по сравнению с мощностью генераторов (или сети электроснабжения), т. е. тогда, когда рассматривается система с источником бесконечно большой мощности.

Трехфазную цепь можно рассматривать как цепь однофазного синусоидального тока с тремя источниками энергии, поэтому комплекс полной мощности трехфазной цепи можно записать в виде

$$\tilde{S} = \dot{U}_A \dot{I}_A^* + \dot{U}_B \dot{I}_B^* + \dot{U}_C \dot{I}_C^* = P + jQ, \quad (4.17)$$

где P – активная мощность трехфазной цепи

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = P_A + P_B + P_C, \quad (4.18)$$

а Q – реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C = Q_A + Q_B + Q_C. \quad (4.19)$$

По формулам (4.18) и (4.19) можно подсчитать мощность в трехфазной цепи при несимметричной нагрузке, соединенной звездой.

Активная и реактивная мощности при симметричной нагрузке

$$P = 3P_\phi = 3I_\phi U_\phi \cos \varphi_\phi; \quad Q = 3Q_\phi = 3I_\phi U_\phi \sin \varphi_\phi.$$

Полная мощность при симметричной нагрузке

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3\sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2} = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi.$$

Обычно в качестве паспортных данных для трехфазных приемников приняты линейные напряжения и токи. Поэтому мощности трехфазных приемников целесообразно выражать через линейные напряжения и токи. Обычно при таком условии индекс «л» у линейного напряжения и тока не указывают.

Так как при соединении симметричной нагрузки треугольником $U_\phi = U_L = U$ и $I_\phi = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{I}{\sqrt{3}}$, а при соединении симметричной нагрузки звездой $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ и $I_\phi = I_L = I$, то независимо от схемы соеди-

нения фаз приемника произведение $U_\phi I_\phi = \frac{UI}{\sqrt{3}}$ оказывается одинаковым.

Таким образом, независимо от схемы соединения симметричной нагрузки имеет место следующие выражения для мощностей:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi; \quad S = \sqrt{3} UI.$$

Индекс «ф» у угла сдвига фаз φ между фазным напряжением и током также опускают.

Лабораторная работа 4

Цель работы: изучить основные способы соединения трехфазных цепей; установить экспериментально взаимосвязь между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении трехфазных приемников звездой и треугольником.

Материалы и оборудование: генератор трехфазного напряжения (ГТН), цифровой мультиметр DT-58, осциллограф С1-101, панель монтажная, набор резисторов, набор индуктивностей, набор проводов со штекерами.

Порядок работы

1. Настроить генератор трехфазного напряжения ГТН с помощью осциллографа на частоту заданную преподавателем из таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Значения частоты

№ подгруппы	1			2			3		
№ бригады	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f_i , кГц	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9

2 Собрать на монтажной панели лабораторного стенда схему трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой (рисунка 4.11) и подключить ее проводниками к клеммам ГТН.

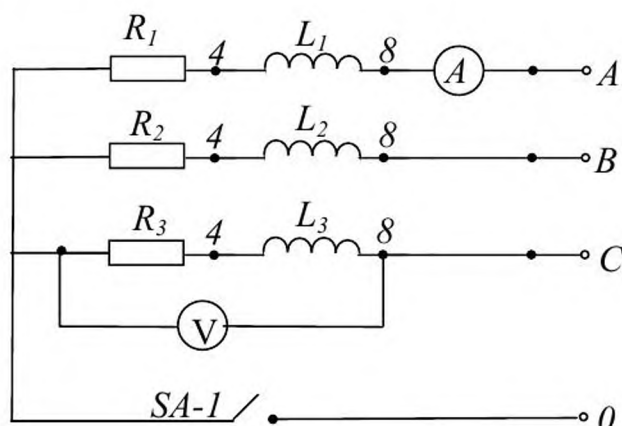


Рисунок 4.11 – Схема для исследования трехфазной цепи для случая соединения фаз нагрузки звездой, где $SA-1$ – тумблер; A – тестер; $L_1; L_2; L_3$ – катушки индуктивности; R_1 – резистор 680 Ом (100 Ом); R_2 – резистор 680 Ом ($2,2 \text{ кОм}$); R_3 – резистор 680 Ом (10 кОм);

3 Для симметричной нагрузки, соединенной звездой, измерить и записать линейные и фазные напряжения и токи на каждой из фаз:

- без нулевого провода;
- с нулевым проводом.

4 Для несимметричной нагрузки, соединенной звездой, измерить и записать линейные и фазные напряжения и токи на каждой из фаз нагрузки. Измерить и записать напряжения на катушках индуктивности U_k и на резисторах U_R в каждой фазе:

- без нулевого провода;
- с нулевым проводом.

5 Собрать на монтажной панели лабораторного стенда схему трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником (рисунка 4.12) и подключить ее проводниками к клеммам ГТН. Проверить соответствие частоты генератора значению частоты вашего варианта.

6 Для симметричной нагрузки, соединенной треугольником, измерить и записать линейные и фазные напряжения и токи на каждой фазе нагрузки.

7 Для несимметричной нагрузки, соединенной треугольником, измерить и записать линейные и фазные напряжения и токи, напряжение на катушках индуктивности U_k и на резисторах U_R в каждой фазе.

8 В обесточенной цепи измерить и записать активные сопротивления R_k в каждой из катушек индуктивностей.

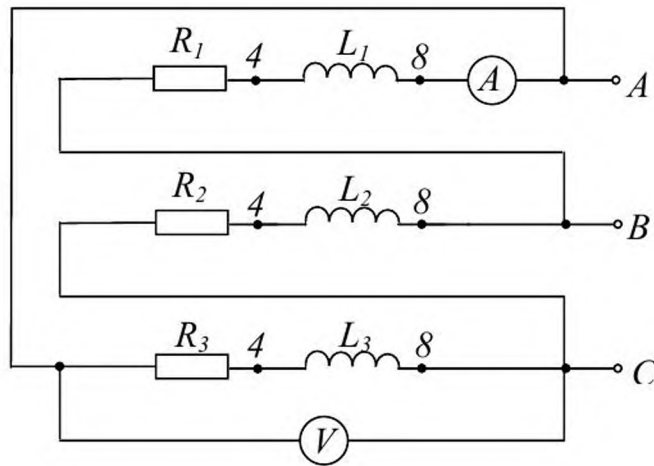


Рисунок 4.12 – Схема для исследования трехфазной цепи для случая соединения фаз нагрузки треугольником, где A – тестер; $L_1; L_2; L_3$ – катушки индуктивности; R_1 – резистор 680 Ом (100 Ом); R_2 – резистор 680 Ом ($2,2 \text{ кОм}$); R_3 – резистор 680 Ом (10 кОм)

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1 Титульный лист.
- 2 Название и цель работы.
- 3 Схему трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой.
- 4 Результаты измерений линейных и фазных напряжений и токов для симметричной нагрузки, соединенной звездой. Соотношения между линейными и фазными величинами, найденными по результатам измерений. Результаты вычисленных значений следующих величин:

$$P_{\phi} = I_{\phi}^2 \cdot R_{\phi}; \cos \varphi_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{S_{\phi}}; Q = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi;$$

$$P = 3P_{\phi}; Q = 3Q_{\phi}; S = 3S_{\phi}; S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}.$$

Построенную векторную диаграмму.

- 5 Результаты измерений линейных и фазных напряжений и токов для несимметричной нагрузки, соединенной звездой без нулевого провода и с нулевым проводом. Соотношения между линейными и фазными величинами, найденными по результатам измерений. Результаты вычисленных значений следующих величин:

$$\underline{Y}_{\phi 1}; \underline{Y}_{\phi 2}; \underline{Y}_{\phi 3}; \underline{U}_{OO'}; \underline{U}_{AO}; \underline{U}_{BO}; \underline{U}_{CO}; I_A; I_B; I_C.$$

Построенную векторную диаграмму.

Результаты расчета мощности и коэффициента мощности по следующим формулам:

$$R_{\phi A} = R_1 + R_{KA}; P_{\phi A} = I_{\phi A}^2 R_{\phi A}; S_{\phi A} = U_{\phi A} I_{\phi A}; \cos \varphi_{\phi A} = P_{\phi A} / S_{\phi A};$$

$$R_{\phi B} = R_2 + R_{KB}; P_{\phi B} = I_{\phi B}^2 R_{\phi B}; S_{\phi B} = U_{\phi B} I_{\phi B}; \cos \varphi_{\phi B} = P_{\phi B} / S_{\phi B};$$

$$R_{\phi C} = R_3 + R_{KC}; P_{\phi C} = I_{\phi C}^2 R_{\phi C}; S_{\phi C} = U_{\phi C} I_{\phi C}; \cos \varphi_{\phi C} = P_{\phi C} / S_{\phi C};$$

$$P = P_{\phi A} + P_{\phi B} + P_{\phi C}; S = S_{\phi A} + S_{\phi B} + S_{\phi C}; Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

6 Результаты измерений линейных и фазных величин для симметричной нагрузки, соединенной треугольником. Соотношения между линейными и фазными величинами. Результаты расчета значений Q ; P ; S ; φ . Построенную векторную диаграмму.

7 Результаты измерений линейных и фазных напряжений и токов для несимметричной нагрузки, соединенной треугольником. Соотношения между линейными и фазными величинами. Результаты расчета Q ; P ; S ; φ . Построенную векторную диаграмму.

8 Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Дайте определение многофазной системы ЭДС?
- 2 Что представляет собой трехфазная цепь?
- 3 Как обозначается трехфазный генератор на схеме?
- 4 Что такое нулевая точка генератора (нагрузки)?
- 5 Какой провод в четырехпроводной системе называется нулевым (нейтральным)?
- 6 Что понимается под фазой генератора (нагрузки)?
- 7 В чем разница между фазами ЭДС и фазными напряжениями?
- 8 Дайте определение фазных и линейных напряжений и токов.
- 9 Что представляет собой соединение фаз генератора (приемника) в звезду, каковы соотношения между линейными и фазными величинами для этого способа соединения?
- 10 Что представляет собой соединение фаз генератора (приемника) в треугольник? Каковы соотношения между линейными и фазными величинами для этого способа соединения?
- 11 Чем обусловлено широкое применение трехфазных систем в промышленности?
- 12 Перечислите известные вам способы соединения трехфазного генератора и приемника между собой.
- 13 К чему приводит обрыв или отсутствие нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз?
- 14 Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-звезда» для случая симметричной нагрузки?

15 Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-звезда» для случая несимметричной нагрузки?

16 Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-треугольник» для случая несимметричной нагрузки?

17 Как рассчитывается активная, реактивная и полная мощность трехфазной цепи?

18 Что такое коэффициент мощности, и какую роль он играет в электроэнергетике?

19 Как и для чего строятся векторные и потенциальные (топографические) диаграммы?

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

5 Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях

- 1 Переходной, принужденный и свободный режимы.
- 2 Переходные процессы в электрической цепи при последовательном соединении RL элементов.
- 3 Переходные процессы в электрической цепи при последовательном соединении RC элементов.
- 4 Переходные процессы в электрической цепи при последовательном соединении RLC элементов.

Основные понятия по теме

При переходе от одного установившегося режима к другому в линейных электрических цепях имеют место переходные процессы. Переходные процессы возникают при всех изменениях режима электрической цепи: подключении и отключении цепи, при изменении нагрузки, при возникновении аварийных режимов (коротком замыкании, обрыве провода, ударе молнии в линию электропередачи) и т. п. Любые изменения в электрической цепи можно представить в виде тех или иных переключений, называемых в общем случае коммутацией [2- 6].

Во время переходных процессов токи в цепи и напряжения на ее участках определяются не только источниками энергии, но и индуктивными, а также емкостными элементами цепи, которые обладают способностью накапливать или отдавать соответственно энергию магнитного или электрического поля. По окончании переходного процесса устанавливается новый установившийся режим, который определяется только внешними источниками энергии. При отключении внешних источников энергии переходный процесс может возникать в цепи только за счет энергии электромагнитного поля, накопленной до начала переходного режима в индуктивных и емкостных элементах цепи.

Задача исследования переходных процессов заключается в том, чтобы найти закономерности отклонений токов в ветвях и напряжений на участках цепи от их установившихся значений. Имеется ряд методов анализа переходных процессов в линейных электрических цепях. Рассмотрим классический метод исследования переходных процессов, который заключается в решении дифференциальных уравнений. Для расчета переходных процессов в цепях составляют уравнения по правилам Кирхгофа для мгновенных значений напряжений и токов. В общем случае анализ переходного

процесса в электрических цепях с линейными элементами, имеющими постоянные параметры, сводится к решению линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Чтобы получить однозначное решение, дифференциальные уравнения необходимо решать при заданных начальных условиях. Независимыми начальными условиями называются значения тока в индуктивности и напряжения на емкости в момент коммутации, т. е. при $t = 0$. Принято считать, что коммутация происходит мгновенно за время $t = 0$, тогда ток в индуктивности и напряжение на емкости непосредственно до коммутации обозначают $i_L(0_-)$ и $u_C(0_-)$, а непосредственно после коммутации — $i_L(0)$ и $u_C(0)$. Независимые начальные условия характеризуют запасенную в магнитном и электрическом полях энергию к моменту коммутации.

Без знания законов коммутации невозможно проводить анализ и расчет переходных процессов. Имеются два закона коммутации.

Первый закон коммутации состоит в том, что ток в ветви с индуктивным элементом в начальный момент времени после коммутации имеет то же значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения он начинает плавно изменяться:

$$i_L(0_-) = i_L(0).$$

Этот закон вытекает из невозможности мгновенного изменения энергии магнитного поля $W_M = \frac{L^2 i_L^2}{2}$, запасенной в индуктивном элементе.

Второй закон коммутации состоит в том, что напряжение на емкостном элементе в начальный момент после коммутации имеет то же значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения оно начинает плавно изменяться:

$$u_C(0_-) = u_C(0).$$

Второй закон коммутации вытекает из невозможности мгновенного изменения энергии электрического поля емкостного элемента:

$$W_E = \frac{C^2 u_C^2}{2}.$$

Начальные условия, вытекающие из законов коммутации, называются независимыми. Все остальные начальные условия зависимы.

При нулевых начальных условиях, т. е. когда $i_L(0_-) = 0$ и $u_C(0_-) = 0$, емкостный элемент (конденсатор) в начальный момент времени после коммутации разряжен, что равносильно короткому замыканию цепи, так как разность потенциалов на его обкладках равна нулю ($u_C(0_-) = 0$). Наличие индуктивности, в начальный момент времени после коммутации, равносильно разрыву цепи, так как $i_L(0_-) = 0$.

Переходные процессы в неразветвленной электрической цепи с параметрами $R; L; C$ (рисунок 5.1) описываются дифференциальным уравне-

нием для мгновенных значений напряжений, составленным по второму правилу Кирхгофа:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = e.$$

В этой формуле i – ток переходного процесса, называемый переходным.

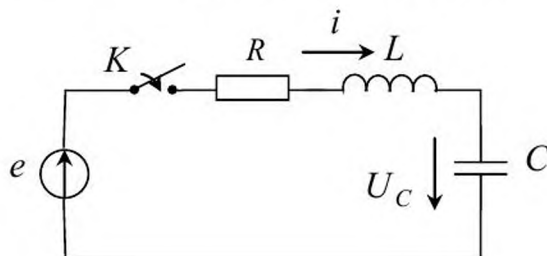


Рисунок 5.1 – Неразветвленная электрическая цепь с R ; L ; C элементами

После окончания переходного режима наступает принужденный (установившийся) режим, который создается источником периодически изменяющейся ЭДС.

При исследовании переходных процессов необходимо установить порядок уравнения электрического состояния цепи, который равен числу независимых начальных условий для токов индуктивностей и напряжений на емкостях. Для цепи рисунка 5.1 переходный процесс описывается уравнением второго порядка, так как значения i и u_C можно задать независимо друг от друга:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{de}{dt}.$$

Решение линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами представляет собой сумму двух решений: частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения. Частное решение описывает принужденный режим, задаваемый источником энергии, и зависит от вида функции, стоящей в правой части уравнения. Если функция правой части уравнения постоянна или является периодической функцией времени, то принужденный ток будет установившимся. Общее решение однородного уравнения описывает переходный процесс, протекающий без воздействия внешних источников, т. е. протекающий за счет энергии, накопленной в индуктивных и емкостных элементах цепи до начала переходного режима, и имеет одинаковый вид для любого переходного процесса в данной цепи. Это означает, что исследуемая цепь в этом случае освобождается от воздействия внешнего источника энергии, поэтому токи или напряжения, найденные в результате решения однородного уравнения, называются свободными составляющими (или просто свободными). При отсутствии внешних источников энергия, запасенная в цепи, постепенно расходуется и свободная составляющая с тече-

нием времени уменьшится до нуля. Для определения свободного тока однородное уравнение, имеет вид:

$$L \frac{d^2 i_{св}}{dt^2} + R \frac{di_{св}}{dt} + \frac{1}{C} i_{св} = 0.$$

При этом соответствующее характеристическое уравнение имеет вид:

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0.$$

Определив из характеристического уравнения корни p_1 и p_2 , запишем общее решение в виде:

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий.

Действительное значение тока во время переходного режима равно сумме принужденного и свободного токов:

$$i = i_{np} + i_{св}.$$

Аналогично, действительное напряжение на любом участке цепи при переходном режиме равно сумме принужденной и свободной составляющих:

$$u = u_{np} + u_{св}.$$

Рассмотрим короткое замыкание RL цепи, присоединенной к источнику постоянного напряжения $U = U_0$ (рисунок 5.2).

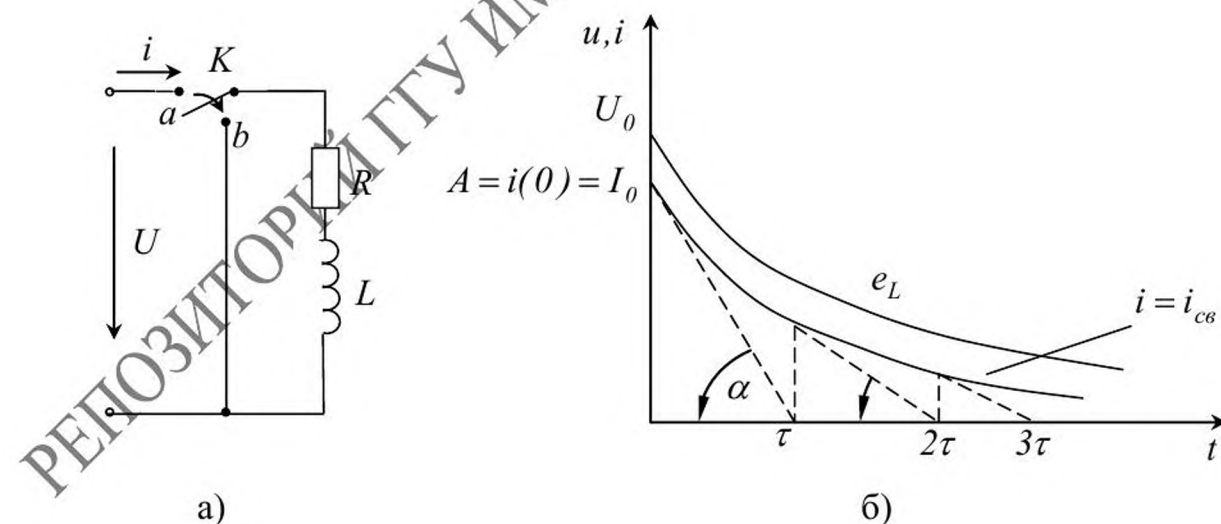


Рисунок 5.2 – Короткое замыкание RL цепи (а) и график изменения напряжения и тока (б)

Если переключатель K перебросить из положения a в положение b , то возникнет накоротко замкнутый контур, в котором принужденный ток существовать не может, так как RL цепь отключена от воздействия напря-

жения сети. В этом случае принужденный ток в цепи после коммутации равен нулю. Следовательно, в данном случае в цепи существует только свободный ток $i_{св}$.

Запишем уравнение электрического состояния RL цепи по второму правилу Кирхгофа:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u.$$

Тогда однородным уравнением, определяющим свободный ток $i_{св}$ этой цепи, будет уравнение вида:

$$L \frac{di_{св}}{dt} + Ri_{св} = 0.$$

Характеристическим уравнением будет уравнение типа:

$$Lp + R = 0,$$

где $p = -\frac{R}{L}$ – корень данного уравнения.

Тогда свободный ток запишется как:

$$i_{св} = A e^{pt} = A e^{-Rt/L} = A e^{-t/\tau}.$$

Полученное выражение графически представляет собой затухающую кривую экспоненту (рисунок 5.2, б). Величина $-\frac{1}{p} = \frac{L}{R} = \tau$, имеющая размерность времени ($\text{Гн/Ом} = \text{Ом}\cdot\text{с/Ом} = \text{с}$), называется постоянной времени.

Постоянная времени τ характеризует скорость протекания переходного процесса, причем, чем больше τ , тем продолжительнее переходный процесс. Величина, обратная постоянной времени ($\alpha = R/L = 1/\tau$), называется коэффициентом затухания, при этом, чем больше коэффициент затухания, тем быстрее происходит уменьшение свободного тока.

Для того чтобы проанализировать переходной процесс при коротком замыкании RL -цепи, необходимо из начальных условий найти постоянную интегрирования A . При $t=0$, $A = i_{св}(0)$.

Если до короткого замыкания по цепи проходил постоянный ток $I_0 = U_0 / R$, где U_0 – постоянное напряжение, приложенное к цепи (рисунок 5.2, а), то это значение тока сохранится и для первого момента $t=0$ после замыкания цепи. Отсюда можно определить постоянную интегрирования:

$$A = i_{св}(0) = i(0) - i_{np}(0) = i(0) = I_0 = U_0 / R.$$

Так как принужденный ток при коротком замыкании цепи $i_{np} = 0$, следовательно, ток в исследуемой цепи;

$$i = i_{св} = A e^{-Rt/L} = I_0 e^{-Rt/L} = \frac{U_0}{R} e^{-Rt/L}.$$

В переходный период в такой цепи возникает электродвижущая сила самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \left(-\frac{R}{L}\right) \frac{U_0}{R} e^{-Rt/L} = U_0 e^{-Rt/L} = u_L,$$

откуда видно, что ЭДС самоиндукции при коротком замыкании в цепи возникает скачкообразно, принимая в момент коммутации максимальное значение, т. е. при $t=0$ $e_L = U_0$ (рисунок 5.2, б). Так как напряжение на индуктивном элементе $u_L = -e_L = -U_0 e^{-Rt/L}$, а на активном сопротивлении $u_R = Ri = U_0 e^{-Rt/L}$, то в замкнутом контуре при коротком замыкании $u_R + u_L = 0$.

В короткозамкнутом контуре переходный процесс заканчивается (теоретически) при $t = \infty$, следовательно, энергия, расходуемая за это время на нагрев сопротивления R цепи, равна энергии магнитного поля, запасенной в индуктивном элементе до момента замыкания цепи, т. е.:

$$W = \int_0^{\infty} R i^2 dt = RI_0^2 \int_0^{\infty} e^{-2Rt/L} = \frac{1}{2} LI_0^2.$$

Аналогичное выражение описывает процессы в цепи при прохождении переменного тока, но при $t=0$ вместо действующего значения тока I_0 стоит мгновенное значение тока.

При включении RL цепи на постоянное напряжение $U = U_0$, принужденный ток определяется как $i_{np} = U_0 / R$, а свободный ток, как и в предыдущем случае, равен $i_{св} = Ae^{-Rt/L}$ (рисунок 5.3, а). Ток переходного процесса запишется как $i = U_0 / R + Ae^{-Rt/L}$.

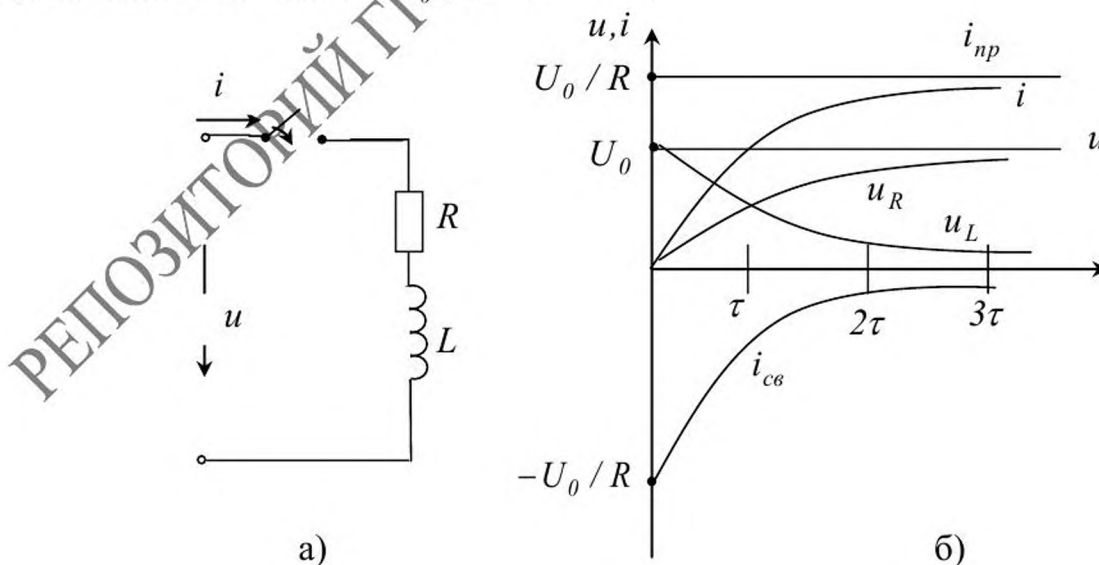


Рисунок 5.3 – Включение RL цепи на постоянное напряжение (а) и график изменения напряжения и тока (б)

Найдем постоянную интегрирования A из начальных условий. Ток до переходного процесса и в первый момент после включения равен нулю:

$$i(0) = U_0 / R + A = 0,$$

откуда $A = -U_0 / R$.

В результате искомый переходный ток запишется как:

$$i = \frac{U_0}{R} - \frac{U_0}{R} e^{-Rt/L} = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-Rt/L}).$$

Напряжение на индуктивном элементе определим как

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \left(-\frac{R}{L}\right) \left(-\frac{U_0}{R}\right) e^{-Rt/L} = U_0 e^{-Rt/L},$$

а напряжение на резистивном элементе определится как

$$u_R = R i = U_0 (1 - e^{-Rt/L}).$$

Графики изменения i ; i_{np} ; $i_{св}$; u_L ; u_R приведены на рисунке 5.3, б).

До коммутации напряжение на индуктивном элементе было равно нулю, а в момент включения ($t = 0$) стало $u_L = U_0$, т. е. напряжение на индуктивности изменяется скачком. Поэтому в первый момент после включения напряжение целиком сосредоточивается только на индуктивном элементе, а затем постепенно переходит на резистивный элемент, а при $t = \infty$ $u_L = 0$; $u_R = U_0$ (рисунок 5.3, б).

Из графика зависимости тока $i(t)$ на рисунке 5.3, б) видно, что ток в цепи не устанавливается мгновенно. Для этого требуется время, чтобы наступил в цепи принужденный режим со значением тока U_0 / R . Возрастание переходного тока i при включении будет тем медленнее, чем медленнее затухает свободный ток, т. е. чем больше постоянная времени $\tau = L / R$, а значит, тем большая энергия передается магнитному полю индуктивного элемента.

Рассмотрим короткое замыкание RC цепи (рисунок 5.4, а), что соответствует разрядке конденсатора.

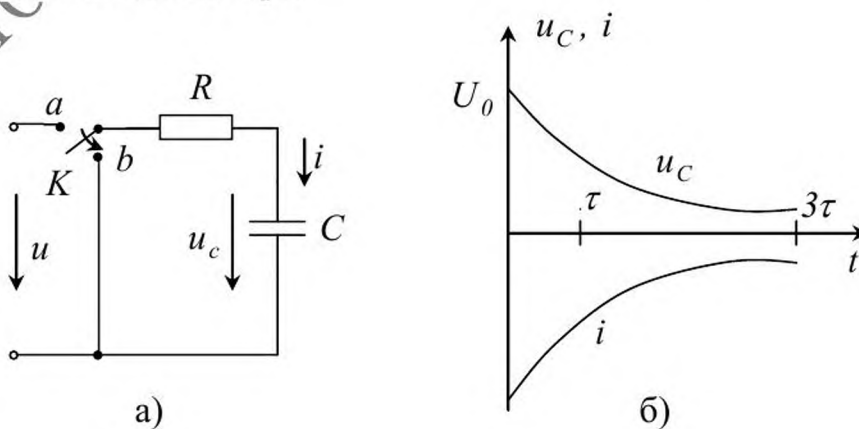


Рисунок 5.4 – Короткое замыкание RC цепи (а) и график изменения напряжения и тока (б)

Пусть цепь находится под постоянным напряжением $U = U_0$ и конденсатор полностью зарядился, т. е. напряжение между его обкладками u_c стало равным напряжению, приложенному к цепи ($u_c = U_0$).

После переключения ключа K из положения a в положение b , образуется накоротко замкнутый контур, в котором конденсатор будет разряжаться. В цепи будет существовать только свободное напряжение на емкостном элементе и свободный ток, так как процесс после коммутации протекает только за счет энергии $W_s = Cu_c^2 / 2$, запасенной в электрическом поле конденсатора до начала переходного процесса. Принужденное напряжение на емкостном элементе и принужденный ток в цепи в этом случае равны нулю.

Уравнением для свободного процесса, является уравнение вида:

$$Ri_{cв} + u_{C\ cв} = 0, \text{ где } i_{cв} = C \frac{du_{C\ cв}}{dt}.$$

Однородное дифференциальное уравнение для свободного напряжения на емкостном элементе можно переписать в виде:

$$RC \frac{du_{C\ cв}}{dt} + u_{C\ cв} = 0.$$

Характеристическим уравнением будет уравнение вида:

$$RCp + 1 = 0,$$

где $p = -1/(RC)$ корень данного уравнения.

Напряжение свободное на емкости запишется:

$$u_{C\ cв} = A e^{p t} = A e^{-t/(RC)} = A e^{-t/\tau} = A e^{-\alpha t},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи, а $\alpha = 1/\tau = 1/(RC)$ называется коэффициентом затухания цепи.

Для нахождения постоянной интегрирования A воспользуемся вторым законом коммутации:

$$u_c(0_-) = u_c(0).$$

В цепи до коммутации конденсатор был заряжен до напряжения U_0 , поэтому $u_c(0_-) = u_c(0)$ и при

$$t = 0, A = u_{C\ cв}(0) = u_c(0) - u_{C\ np}(0) = U_0 - 0 = U_0.$$

Итак, окончательно искомое напряжение на емкостном элементе имеет вид:

$$u_c = u_{C\ cв} = U_0 e^{-t/(RC)},$$

а ток в цепи запишется, как

$$i = C \frac{du_c}{dt} = C \left(-\frac{1}{RC} \right) U_0 e^{-t/(RC)} = -\frac{U_0}{R} e^{-t/(RC)}.$$

Знак минус свидетельствует о том, что ток разрядки имеет направление, противоположное напряжению на конденсаторе. Графики изменения напряжения u_C и тока i приведены на рисунке 5.4, б).

Так как переходный процесс при коротком замыкании в RC цепи теоретически заканчивается при $t = \infty$, то энергия, расходуемая за это время на нагрев сопротивления R равна $W = \int_0^{\infty} Ri^2 dt = \int_0^{\infty} \frac{U_0^2}{R} e^{-2t/(RC)} dt = \frac{1}{2} CU_0^2$ и равна энергии, запасенной до коммутации в электрическом поле конденсатора.

Пусть RC цепь включена на постоянное напряжение (рисунок 5.5, а), что соответствует зарядке конденсатора цепи до принужденного напряжения $u_C = U_0$.

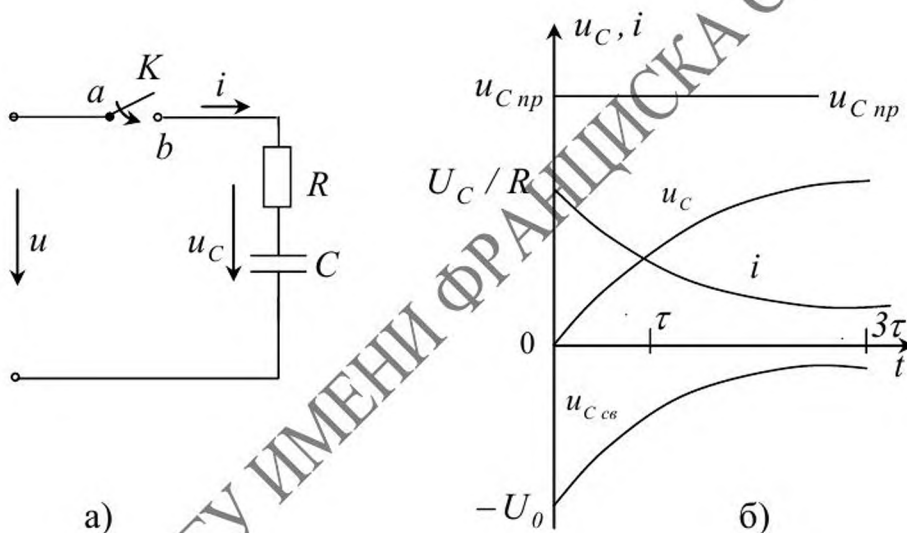


Рисунок 5.5 – Включение RC цепи на постоянное напряжение (а) и график изменения напряжения и тока (б)

Запишем уравнение электрического состояния цепи для этого случая:

$$RC \frac{du_{C\text{св}}}{dt} + u_{C\text{св}} = 0,$$

где $u_{C\text{св}} = Ae^{-t/(RC)}$ – свободное напряжение на емкостном элементе.

Тогда переходное напряжение запишется:

$$u_C = u_{C\text{нр}} + u_{C\text{св}} = U_0 + Ae^{-t/(RC)}.$$

Напряжение на емкостном элементе до коммутации, а, следовательно, и в первый момент после включения равно нулю, так как конденсатор не был заряжен, т. е. при $t = 0$ напряжение $u_C(0) = U_0 + A = 0$, откуда $A = -U_0$ и $u_C = U_0 - U_0 e^{-t/(RC)} = U_0 (1 - e^{-t/(RC)})$.

Напряжение на емкостном элементе возрастает постепенно, причем тем медленнее, чем больше постоянная времени $\tau = RC$ (рисунок 5.5, б).

Ток при зарядке конденсатора в момент коммутации (при $t = 0$) возникает скачком, а затем спадает по экспоненциальному закону, как и ток разрядки. Его направление положительно (рисунок 5.5, б). Ток спадает тем медленнее, чем больше постоянная времени цепи τ , т. е. чем медленнее затухает свободное напряжение на емкостном элементе $U_{C\text{св}}$.

Энергия, расходуемая на нагрев резистора при зарядке конденсатора, независимо от сопротивления R будет такой же, как и при разрядке конденсатора $W_{\text{с}} = CU_0^2 / 2$, т. е. равной энергии электрического поля, запасенной в конденсаторе при его зарядке.

Рассмотрим апериодическую разрядку конденсатора (рисунок 5.6). Если ключ K переключить из положения a в положение b , то образуется накоротко замкнутый RLC контур, в котором до коммутации конденсатор заряжен до напряжения источника U_0 .

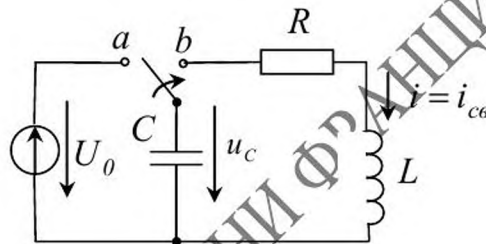


Рисунок 5.6 – Аperiодическая разрядка конденсатора

После коммутации в замкнутом RLC контуре протекает свободный процесс, который, согласно второму правилу Кирхгофа, описывается однородным уравнением:

$$L \frac{di_{cв}}{dt} + Ri_{cв} + u_{cв} = 0.$$

Так как $i_{cв} = C du_{C\text{св}} / dt$, то

$$LC \frac{d^2 u_{C\text{св}}}{dt^2} + RC \frac{du_{C\text{св}}}{dt} + u_{C\text{св}} = 0.$$

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0, \text{ или } p^2 + Rp/L + 1/(LC) = 0,$$

где корнями данного уравнения являются два корня:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Если в колебательном контуре резонансная частота $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и $R/(2L) = \delta$, то выражение для определения корней характеристического уравнения можно переписать:

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$$

Характер свободного процесса зависит от вида корней характеристического уравнения, которые, в свою очередь, зависят от соотношения параметров цепи R ; L ; C . Свободный процесс, наблюдаемый в замкнутом RLC контуре после коммутации, представляет собой апериодическую разрядку конденсатора. Апериодической называется разрядка конденсатора, заряженного до напряжения U_0 , через резистор и индуктивную катушку, когда напряжение на конденсаторе постепенно спадает до нуля. Апериодический процесс разрядки конденсатора имеет место, если корни характеристического уравнения вещественны, т. е. если $R^2/(4L^2) > 1/(LC)$, или $R/(2L) > 1/\sqrt{LC}$, или $R > 2\sqrt{L/C} = R_{кр}$ получается пара разных корней.

Сопротивление $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ называется критическим, так как оно является наименьшим сопротивлением RLC контура, когда еще имеет место апериодический процесс разрядки конденсатора. При $R < 2\sqrt{L/C}$ корни характеристического уравнения получаются комплексными и сопряженными. Таким образом, корни характеристического уравнения p_1 и p_2 будут вещественными и различными, если выполняется условие $R > R_{кр}$. Если корни различны, то общее решение однородного дифференциального уравнения имеет вид:

$$u_{C\text{св}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где A_1 и A_2 - постоянные интегрирования, а p_1 и p_2 - вещественные и различные корни, которые должны быть отрицательными, так как свободный процесс должен быть затухающим во времени.

Так как при разрядке конденсатора в накоротко замкнутом RLC контуре процесс является свободным, то переходные значения напряжения u_C и тока i равны их свободным значениям, т. е. $u_C = u_{C\text{св}}$ и $i = i_{\text{св}}$. Ток цепи:

$$i = i_{\text{св}} = C \frac{du_{C\text{св}}}{dt} = CA_1 p_1 e^{p_1 t} + CA_2 p_2 e^{p_2 t}.$$

Подставляя начальные условия при $t=0$, $u_C = U_0$ и $i = 0$ в

$$u_C(0) = A_1 + A_2 = U_0; i(0) = A_1 p_1 + A_2 p_2 = 0$$

и решая совместно систему уравнений, определяем постоянные интегрирования:

$$A_1 = \frac{p_2 U_0}{p_2 - p_1}; A_2 = -\frac{p_1 U_0}{p_2 - p_1}.$$

Окончательно получаем, что

$$u_C = u_{C\text{св}} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t});$$

$$i = i_{\text{св}} \frac{U_0 C p_1 p_2}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

Напряжение на индуктивном элементе u_L определяется по формуле;

$$u_L = u_{L\text{св}} = L \frac{di_{\text{св}}}{dt} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}).$$

Лабораторная работа 5

Цель работы: освоить методы исследования переходных процессов в линейных электрических цепях при наличии одного и двух накопителей энергии; установить влияние параметров исследуемой цепи на характер переходного процесса; приобретение навыков применения электронного осциллографа для исследования и измерения быстропротекающих периодических несинусоидальных электрических величин.

Материалы и оборудование: блок питания (БП), цифровой мультиметр DT-58, осциллограф С1-101, электронный коммутатор, панель монтажная, набор резисторов, конденсаторов, индуктивностей, набор проводов со штекерами.

Порядок работы

- 1 Собрать на лицевой панели лабораторного стенда схему рисунка 5.7.
- 2 Подключить схему для исследования переходных процессов к стабилизированному источнику постоянного напряжения $U = 12 \text{ В}$ и включить электронный коммутатор.
- 3 Включить напряжение питания осциллографа, нажав кнопку «сеть» на передней панели прибора, осуществить прогрев его в течение 3-5 минут.
- 4 Подать на осциллограф напряжение с резистора $R = 1 \text{ кОм}$, используя для этого соединительный кабель со штекером.
- 5 Установить на экране осциллографа полтора-два периода напряжения питания и по полученной временной зависимости $u(t)$ на экране осциллографа определить: а) амплитуду напряжения импульса; б) дли-

тельность импульса и паузы; в) частоту коммутации электронного коммутатора.

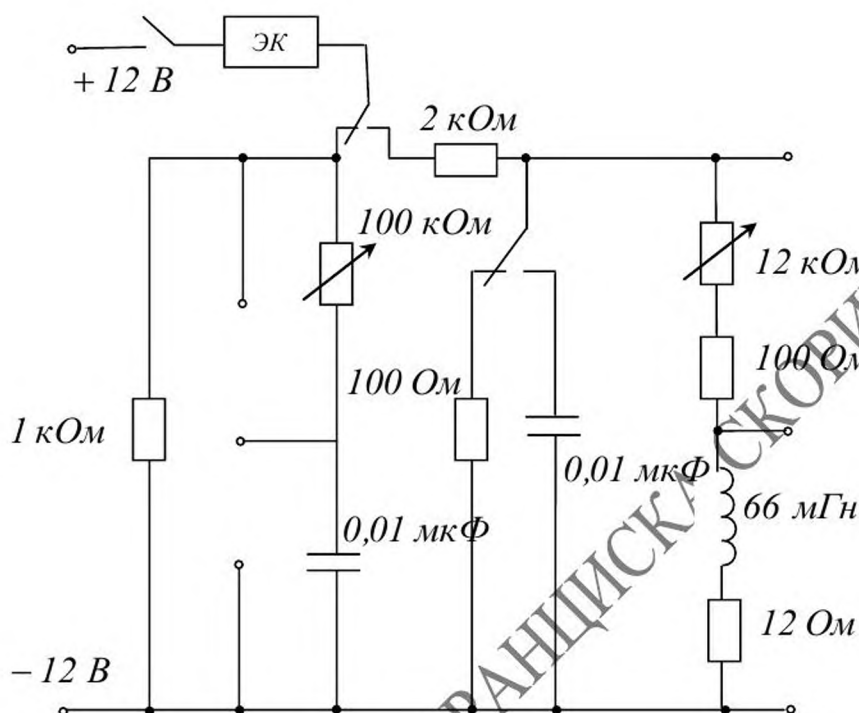


Рисунок 5.7 – Схема для исследования переходных процессов

6 Провести исследование переходных процессов в электрической цепи с резистором и конденсатором:

а) переключить вход осциллографа с резистора $R = 1 \text{ кОм}$ на конденсатор $C = 0,01 \text{ мкФ}$; затем при трех различных значениях сопротивления переменного резистора ($R \approx 20; 60; 100 \text{ кОм}$) снять на кальку осциллограммы напряжений на конденсаторе и на резисторе при переходных процессах;

б) для каждой осциллограммы установить масштаб по осям напряжения и времени.

7 Исследовать переходные процессы в электрической цепи с резистором и катушкой индуктивности:

а) соответствующими кнопками на панели стенда включить под прямоугольное напряжение электронного коммутатора электрическую цепь, состоящую из переменного резистора и катушки индуктивности; при этом параллельно включенный конденсатор $C = 0,01 \text{ мкФ}$ должен быть отключен;

б) снять осциллограмму подаваемого на исследуемую цепь прямоугольного напряжения и определить его амплитуду;

в) снять с экрана осциллографа на кальку осциллограммы напряжений на переменном резисторе и катушке индуктивности при трех значе-

ниях сопротивления переменного резистора ($R = 100 \text{ Ом}$; $R = 5 \text{ кОм}$; $R = 10 \text{ кОм}$).

8 Исследовать переходные процессы в электрической цепи с двумя накопителями энергии – конденсатором и катушкой индуктивности:

а) подключить параллельно переменному резистору и катушке индуктивности конденсатор с емкостью $C = 0,01 \text{ мкФ}$; затем провести три опыта при значениях суммарного сопротивления резисторов $R > 2\sqrt{L/C}$; $R = 2\sqrt{L/C}$; $R < 2\sqrt{L/C}$; измерение сопротивления резисторов произвести при отключенном напряжении питания исследуемой цепи;

б) при выполнении опытов снять на кальку осциллограммы напряжения на катушке индуктивности при зарядке и разрядке конденсатора.

9 Провести обработку результатов опытов:

а) определить постоянные времени исследуемых RC цепей при разрядке и зарядке конденсатора по осциллограммам $u_C(t)$ опыта пункта 6 и сравнить их с соответствующими значениями, рассчитанными по числовым значениям параметров отдельных элементов цепи;

б) определить постоянные времени исследуемых RL цепей при переходных процессах по осциллограммам $u_L(t)$ опыта пункта 7 и сравнить их с аналогичными расчетными значениями;

в) по осциллограмме $u_L(t)$ опыта пункта 8, соответствующей колебательному переходному процессу, определить частоту собственных колебаний исследуемой цепи и ее коэффициент затухания и сравнить их с аналогичными, рассчитанными по числовым значениям, параметрами цепи;

г) по осциллограмме $u_L(t)$ опыта пункта 8, соответствующей предельному апериодическому переходному процессу, определить интервал времени, в течение которого напряжение на катушке индуктивности достигает максимального значения, и сравнить его с рассчитанным по известным параметрам цепи.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1 Титульный лист.
- 2 Название и цель работы.
- 3 Схему рисунка 5.7.
- 4 Осциллограммы напряжений на конденсаторе и на резисторе при переходных процессах при различных значениях переменного резистора.
- 5 Осциллограммы напряжений на переменном резисторе и катушке индуктивности при $R = 100 \text{ Ом}$; $R = 5 \text{ кОм}$; $R = 10 \text{ кОм}$.

6 Осциллограммы напряжения на катушке индуктивности при зарядке и разрядке конденсатора.

7 Значения постоянных времени RC цепей при разрядке и зарядке конденсатора.

8 Значения постоянных времени RL цепей при переходных процессах.

9 Значение частоты собственных колебаний исследуемой цепи и ее коэффициент затухания.

10 Значение интервала времени, в течение которого напряжение на катушке индуктивности достигает максимального значения.

Вопросы для самоконтроля

1 Дайте определение установившегося и переходного процессов в электрической цепи?

2 Дайте определение постоянной времени электрической цепи?

3 Поясните, в течение, какого промежутка времени практически заканчивается переходной процесс в электрической цепи?

4 Как можно определить постоянную времени электрической цепи по экспериментальным зависимостям тока и напряжения при переходном процессе?

5 Укажите, от каких параметров зависит постоянная времени неразветвленных RC и RL цепей?

6 Как определить емкость конденсатора или сопротивление резистора, на который разряжается конденсатор, по кривой его разрядки на экране осциллографа, если одно из них известно?

7 Напишите выражение для переходного напряжения на конденсаторе при включении RC цепи на постоянное напряжение?

8 Напишите выражение для переходного тока при включении электрической RL цепи на постоянное напряжение?

9 Назовите устройства, в которых используются явления, возникающие при переходных процессах в электрических цепях?

10 Дайте определение законов коммутации?

Приложение А

Описание

универсального лабораторного стенда

(обязательное)

Универсальный лабораторный стенд предназначен для выполнения лабораторных работ по курсам «Электротехника», «Основы электротехники». В состав лабораторного стенда входит блок питания, генератор трехфазного напряжения, набор элементов. Для выполнения лабораторных работ используются цифровые мультиметры типа DT-58, осциллограф универсальный типа С1-101.

Краткие сведения по приборам, входящим в состав стенда

Блок питания стенда. Блок обеспечивает напряжения и токи, указанные в таблице А1.

Таблица А1– Выходные параметры блока питания

Выходные напряжения, В	Максимально допустимый ток, А	Предел регулирования напряжения, В
5	0,1	Нерегулируемое
+ 15	0,1	от 5 до 20
– 15	0,1	от 5 до 20
~ 8	0,1	Нерегулируемое
~ 24	0,1	Нерегулируемое

Включение БП осуществляется тумблером «СЕТЬ ВКЛ». Контроль постоянных напряжений осуществляется вольтметром, путём его подключения к каждому из выходов «5 В; + 15 В; – 15 В» переключателем «СТАБ. НАПРЯЖЕНИЯ». Плавная регулировка напряжений выходов «+15В» и «–15 В» осуществляется переменными резисторами «ПЛАВНАЯ РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ».

Генератор трёхфазного напряжения (ГТН). Генератор обеспечивает амплитуду выходного напряжения каждой фазы не менее 8 В. Диапазон частоты ГТН от 5 кГц до 10 кГц регулируется переменным резистором

«ЧАСТОТА, кГц». Включается генератор тумблером "ВКЛ" после включения БП.

Описание принципа работы. Для выполнения необходимой лабораторной работы на монтажной панели собирается схема с помощью элементов лабораторного набора и измерительных приборов. Электрические соединения элементов схемы, электрических приборов и подключение схемы к гнездам осуществляется с помощью проводов и перемычек. С блока питания подаются необходимые напряжения питания для проведения лабораторной работы.

Цифровой мультиметр типа DT-58

Прибор предназначен для измерения напряжения при постоянном и переменном токе, переменного и постоянного тока, сопротивления.

Измерение напряжения при постоянном и переменном токе

1 Установите переключатель диапазона функций в требуемую позицию.

2 Подключите черный тестирующий провод к терминалу «COM», а красный провод к входному терминалу «V/OHM».

3 Подключите провода к измеряемым точкам и считайте с дисплея показания. Полярность красного провода будет показана в то же время, что и напряжение.

Примечания:

1 Если напряжение неизвестно заранее, установите переключатель функций в наивысший диапазон и продолжайте работать.

2 когда на дисплее появляется только цифра «1», это означает превышения диапазона и нужно установить переключатель на более высокий диапазон.

Измерение переменного и постоянного тока

1 Подключите черный провод к терминалу «COM», а красный к терминалу «A», $I_{max} = 0,5 \text{ A}$ (DT 5801-2A).

2 Установите переключатель диапазона функций в нужную позицию.

3 Подключите провода к измерительным точкам и считайте показания с дисплея. Полярность на красном проводе будет определена в одно время с величиной тока.

Примечания:

1 Если величина тока неизвестна заранее, установите переключатель на самый высокий диапазон и продолжайте работу.

2 Когда на дисплее появляется цифра «1», это означает превышение текущего диапазона и нужно установить переключатель на более высокий диапазон.

3 Максимальное значение 10 A постоянного тока и максимальное значение 20 A переменного тока должно быть по времени измерения не более 15 с .

Измерение сопротивления

1 Подключите черный тестирующий провод к терминалу «СОМ» и красный тестирующий провод к «V/ОНМ» входному терминалу.

2 Установите переключатель функций в положение ОНМ.

3 Подключите тестирующие провода к измеряемому сопротивлению и считайте с дисплея показания.

Примечания:

1 Полярность красного тестирующего провода «+».

2 Когда вход не подключен, т. е. цепь разомкнута, на дисплее появится цифра «1», как и для условия более высокой величины.

3 Если величина измеряемого сопротивления превышает максимальную величину выбранного диапазона, на дисплее появится цифра «1» и нужно установить переключатель функций на более высокий диапазон.

4 Диапазон 200 МОм имеет десятичный разряд (1 МОм), цифру, полученную в результате короткого замыкания, нужно вычесть из измеренного результата, например измеряемая величина 100 МОм на дисплее появится 101,0 и последняя цифра 10-го разряда (т. е. целое число) должна быть вычтена.

Осциллограф универсальный С1-101

Универсальный осциллограф С1-101 предназначен для исследования формы периодических сигналов путём визуального наблюдения и измерения амплитуды в диапазоне от $0,01$ до 100 В и временных интервалов от $0,3 \cdot 10^{-6}$ до $0,4\text{ с}$ (диапазон частот от 0 до 5 МГц).

Технические характеристики прибора приведены в техническом описании. Потребляемая мощность прибора 18 Вт .

Описание органов управления осциллографа

Осциллограф имеет следующие органы управления:

- ручкой «☼» регулируется яркость изображения;
- ручкой «□» регулируется чёткость (фокус) изображения;

- ручкой « $\Leftrightarrow$ » регулируется астигматизм;
 - ручкой «УСТАНОВКА ЛИНИИ ЛУЧА» совмещается линия развёртки с горизонтальной осью шкалы ЭЛТ;
 - переключателем «Y/ДЕЛ» устанавливаются калиброванные коэффициенты отклонения канала усилителя «Y»;
 - ручкой « $\uparrow$ » регулируется положение луча по вертикали;
 - переключателем режима работы в положении « $\sim$ » обеспечивается подача сигнала на вход вертикального отклонения через разделительный конденсатор, в положении « $\perp$ » обеспечивается отключение входа усилителя от источника исследуемого напряжения, а в положении « $-, \sim$ » обеспечивается подача исследуемого сигнала с постоянной составляющей (открытый вход);
 - на разъём «1 M Ω , 40 pF» (с правой стороны прибора) подаётся исследуемый сигнал;
 - через отверстие под отвёртку в верхней крышке прибора « ∇ Y» осуществляется калибровка коэффициента отклонения;
 - ручкой «УРОВЕНЬ» выбирается уровень исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развёртки;
 - переключателем синхронизации в положении «ВНУТР» обеспечивается синхронизация исследуемым сигналом усилителя вертикального отклонения, а в положении «ВНЕШН» обеспечивается синхронизация внешним сигналом;
 - переключателем «ВРЕМЯ/ДЕЛ» устанавливается коэффициент развёрток;
 - потенциометром « $\rightarrow$ » перемещается луч по горизонтали;
 - тумблером «ПИТАНИЕ» включается и выключается прибор.
- На правой боковой стенке осциллографа расположены:
- гнездо « $\perp$ » – корпус прибора;
 - разъём «» выход пилообразного напряжения;
 - разъём « $\square/\nabla$, 1kHz» выход калибратора;
 - разъём «ВНЕШН 1:1» подачи сигнала внешней синхронизации без ослабления;
 - разъём «ВНЕШН 1:10» подачи сигнала внешней синхронизации с 10-кратным ослаблением.
- На задней панели осциллографа расположены:
- разъём штепсельный 12 В для подсоединения кабелей И24.864.060; И24.864.060.01; И24.864.060-02; И24.853.482;
 - держатель предохранителя «1 А»;
 - тумблер «220 В, 50 Гц, 400 Гц – 115 В, 400 Гц» для переключения напряжения питания;
 - клемма « $\perp$ » для заземления корпуса прибора.

На нижней крышке находится отверстие « ∇ X» для калибровки коэффициентов развёртки.

Включение прибора и проверка работоспособности осциллографа

Установить ручки органов управления в следующих положениях:

«☀» – в крайнее левое;

«□» – в среднее;

«V/ДЕЛ» – в положение «0,01»;

«-, ~, $\perp$ » – в положение « $\perp$ »;

«↑» – в среднее;

«ВРЕМЯ/ДЕЛ» – в положение «1 ms»;

«ВНУТР, ВНЕШН» – в положение «ВНУТР»;

«УРОВЕНЬ» – влево и вправо на $45 - 80^\circ$ от среднего (нулевого) положения;

«→» – в среднее положение.

При питании от сети переменного напряжения используется блок питания 22.087.459, разъём х2 которого подключается к разъёму х8 (И22.044.09Э.3), расположенному на задней панели прибора.

Тумблер «220 В 50 Гц, 400 Гц – 115 В, 400 Гц» блока питания установить в первое положение, а корпусную клемму « $\perp$ » подключить к контуру защитного заземления.

Включить тумблер «ПИТАНИЕ» на передней панели прибора. При этом должна загореться сигнальная лампочка. После прогрева (5 мин) ручкой «☀» установить яркость изображения, удобную для наблюдения. Ручкой «↑» совместить линию развёртки с центром экрана. Ручкой «□» установить одинаковую четкость изображения по всей линии луча. Установить переключатель «V/ДЕЛ» в положение « ∇ 5 ДЕЛ». Установить поворотом ручки «УРОВЕНЬ» устойчивое изображение на экране ЭЛТ. Поворотом ручки «→» до упора убедиться в перемещении изображения по горизонтали. Установить переключатель «V/ДЕЛ» в положение «0,2», а переключатель «-, ~, $\perp$ » в положение «-, ~». Соединить с помощью кабеля вход «1M Ω , 40pF» с выходом калибратора «1V, 1kHz». Величина изображения импульсов должна составлять 5 делений шкалы экрана.

Установить переключатель развёртки в положение «1ms» поворотом ручки «→» совместить начало первого периода сигнала с первой вертикальной линией экрана ЭЛТ. На всей длине экрана (8 делений) должно поместиться 8 периодов.

Проведение измерений с помощью осциллографа

Для проведения измерений выполните следующие операции:

- а) подайте сигнал на гнездо « $\odot$ 1M Ω 40pF»;
- б) установите переключатель «V/ДЕЛ» в такое положение, чтобы амплитуда изображения составила около пяти делений;
- в) установите переключатель « $\underline{\sim}$, $\perp$, $\sim$ » в положение « $\sim$ ». Для сигналов низкой частоты ниже 50 Гц рекомендуется использовать положение « $\underline{\sim}$ »;
- г) ручкой «УРОВЕНЬ» установите устойчивое напряжение. Установите переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» в положении, при котором наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала;
- д) установите ручку « $\updownarrow$ » вертикального перемещения так, чтобы минимальный уровень сигнала совпадал с одной из нижних линий, а максимальный – находился в пределах экрана. Ручкой « $\leftrightarrow$ » горизонтального перемещения сместите изображение таким образом, чтобы один из верхних пиков находился на вертикальной средней линии шкалы (рисунок 1);
- е) измерьте деления между крайними точками размаха амплитуды вертикального отклонения. Этот метод может быть использован не только для определения напряжения между пиками, но и между двумя любыми точками сигнала;
- ж) умножьте расстояние, измеренное в подпункте е) на показание переключателя «V/ДЕЛ».

Пример. Предположим, что размах вертикального отклонения составляет 5,6 деления, используя делитель 1:10, переключатель «V/ДЕЛ» установлен в положение «0,5».

Напряжение амплитуды составляет: $5,6 \text{ дел} \times 0,5 \text{ В / дел} \times 10 = 28 \text{ В}$.

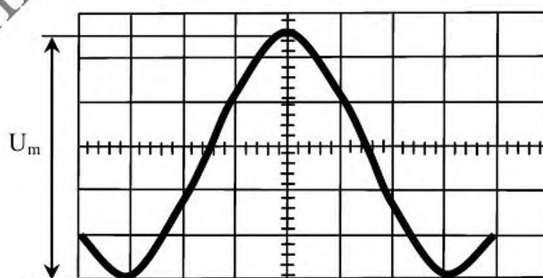


Рисунок 1 – Измерение полного размаха переменного напряжения (максимум расположен на градуированной вертикальной линии)

Для измерения мгновенного значения сигнала с постоянной составляющей выполните следующие операции:

- а) поставьте переключатель «ВНУТР.ВНЕШН» в положение «ВНУТР»;

б) расположите линию развертки ниже средней линии сетки или другой контрольной линии. Если напряжение отрицательно относительно «ЗЕМ-ЛИ», переместите луч к верхней линии шкалы. Не следует перемещать ручку « $\uparrow$ » после установки контрольной линии;

в) подайте сигнал на входной разъем « $\odot 1\text{M}\Omega 40\text{pF}$ »;

г) установите переключателем «V/ДЕЛ» импульс равный по амплитуде 3 - 5 делений шкалы.

Примечания: для измерения уровня напряжения относительно другого напряжения, а не корпуса, сделайте следующее:

1 Установите переключатель « $\sim$, $\perp$, $\sim$ » в положение « $\sim$ », подайте опорное напряжение на гнездо « $\odot 1\text{M}\Omega 40\text{pF}$ » усилителя и расположите линию развертки на контрольной линии.

2 Установите ручкой «УРОВЕНЬ» устойчивое изображение. Переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» установите в положение, при котором на экране наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала.

3 Определите расстояние в делениях между контрольной линией и точкой на линии сигнала, в которой нужно измерить напряжение. Например, измерение производится между контрольной линией и точкой А на рисунке 2.

4 Умножьте полученный размер в делениях на коэффициент отклонения. Следует также учитывать коэффициент ослабления выносного делителя, если он используется.

Пример. Допустим, что измеренное расстояние составляет 3 деления (рисунок 2), сигнал положительной полярности (изображение находится выше контрольной линии). Переключатель «V/ДЕЛ» находится в положении «2». При измерении используется делитель напряжения 1:10. Измеренное мгновенное значение напряжения будет: $2\text{ В} \times 3 \times 10 = 60\text{ В}$.

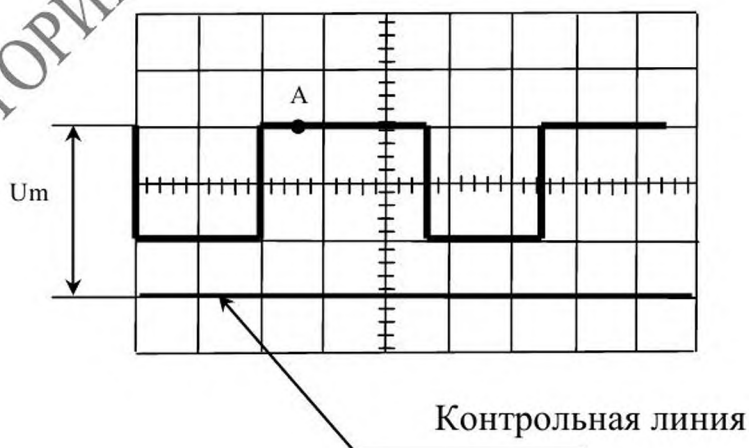


Рисунок 2 – Измерение переменного напряжения с постоянной составляющей

Для измерения длительности сигнала между двумя его точками произведите следующие операции:

- а) подайте исследуемый сигнал на гнездо с « $\odot$ 1M Ω 40pF»;
- б) установите переключатель «V/ДЕЛ» в такое положение, чтобы изображение на экране составляло около 3–5 делений по амплитуде;
- в) установите переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» в такое положение, при котором расстояние между измеряемыми точками будет меньше 8 делений;
- г) установите ручкой «УРОВЕНЬ» устойчивое изображение на экране ЭЛТ;
- д) переместите ручкой « $\updownarrow$ » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились на горизонтальной линии;
- е) установите ручкой « $\leftrightarrow$ » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились в пределах восьми центральных делений сетки;
- ж) измерьте горизонтальное расстояние между выбранными точками и умножьте измеренное расстояние на коэффициент развертки.

Пример. Допустим, что расстояние между измеренными точками *A* и *B* составляет 6 делений (рисунок 3), а переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» установлен в положение «0,2 мс». Время $T = 0,2 \text{ мс} \times 6 = 1,2 \text{ мс}$.

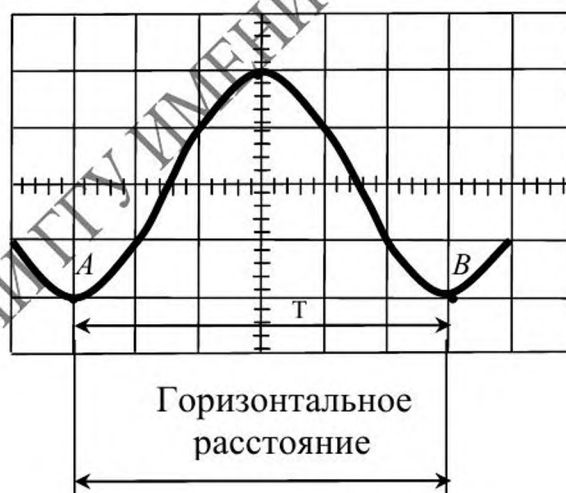


Рисунок 3 – Измерение длительности и частоты

Для измерения частоты периодических сигналов сделайте следующее:

- а) измерьте длительность времени (рисунок 1.3) одного периода сигнала;
 - б) рассчитайте частоту сигнала f_c по формуле: $f_c = 1/T$,
- где f_c – частота, Гц, T – длительность периода, с.

Пример. Частота сигнала с длительностью периода 1,2 мс будет равна:

$$f = 1 / (1,2 \times 10^{-3} \text{ с}) = 833 \text{ Гц}.$$

Измерение времени нарастания основано на том же методе, что и измерение длительности времени. Основная разница только в точках, между которыми производится измерение. Ниже приводится методика измерения времени нарастания между точками импульса на уровне 0,1 и 0,9.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

Литература

1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов – М., 2006. – 701 с.

4 Атабеков, Г. И. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г. И. Атабеков. – 2-е изд. – СПб. : 2006. – 592 с.

3 Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский; под ред. А. Е. Каплянского. – М. : 1972. – 448 с.

4 Батура, М. П. Теория электрических цепей: учебник / М. П. Батура, А. П. Кузнецов, А. П. Курулев; под редакцией А. П. Курулева. – 2-е изд. – Мн.: 2007. – 606 с.

5 Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. в 3 т. Т. 1: Теоретические основы электротехники. / К. С. Демирчян [и др.] – 4-е изд. – СПб. : 2004. – 576 с.

6 Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. в 3 т. Т. 2: Теоретические основы электротехники. / К. С. Демирчян [и др.] – 4-е изд. – СПб. : 2004. – 463 с.

РЕПОЗИТОРИЙ ГТУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

Учебное издание

**Богданович Валентина Иосифовна
Мышковец Виктор Николаевич**

**ТЕОРИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**Учебно-методическое пособие
для студентов вузов
по специальности
«Автоматизированные системы обработки информации»**

Редактор В. И. Шкредова
Корректор В. В. Калугина

Лицензия № 02330/0133208 от 30.04.04.

Подписано в печать 30.03.09. Формат 60х84 1/16.

Бумага писчая №1. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 4,88.

Уч. -изд. л. 5,25. Тираж 75 экз. Заказ № 35.

Отпечатано с оригинала-макета на ризографе
учреждения образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Лицензия № 02330/0056611 от 03.02.09.
246019, г. Гомель, ул. Советская, 104