

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Электротехника и электрооборудование»

Утверждено на заседании кафедры
«Электротехника и электрооборудование»
«21» января 2020 г., протокол № 5-1

Заведующий кафедрой


_____ А.Э. Соловьев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине (модулю)**

«Теоретические основы электротехники»

**основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки (*специальности*)
13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника

с направленностью (профилем) (*со специализацией*)
Электроснабжение

Форма(ы) обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 130302-03-20

Тула 2020 год

Разработчик(и) методических указаний

Шпрехер Дмитрий Маркович, д.т.н., доцент
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

Д. М. Шпрехер, В. Е. Полевой, А. В. Чумаков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 1

**Исследование линейных электрических цепей
постоянного и переменного тока**

Лабораторный практикум

Тула

Издательство ТулГУ

2019

УДК 621.31

Шпрехер Д.М., Полевой В.Е., Чумаков А.В. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Исследование линейных электрических цепей постоянного и переменного тока: лабораторный практикум. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – 84 с.

ISBN

В учебном издании изложены описание лабораторных работ, задания и методические рекомендации по их выполнению. Рассматриваются свойства, методы анализа и расчёта линейных однофазных цепей постоянного и переменного тока.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину Теоретические основы электротехники в объёме общеобразовательной дисциплины.

Библиогр. 5 наим.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета
Тулльского государственного университета

Рецензент: Минаков Е.И., докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры.
«Радиоэлектроника».

ISBN

© Шпрехер Д.М., Полевой В.Е., Чумаков А.С. 2019
© Издательство ТулГУ, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие требования к выполнению лабораторных работ	4
Описание комплекта лабораторного оборудования	5
Лабораторная работа № 1 Исследование разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока.....	11
Лабораторная работа № 2 Исследование цепи постоянного тока методами эквивалентного генератора и наложения.....	24
Лабораторная работа № 3 Исследование резонанса в последовательной цепи с R -, L -, C -элементами.....	38
Лабораторная работа № 4 Исследование резонанса в параллельной цепи с R -, L -, C -элементами.....	44
Лабораторная работа № 5 Исследование цепей с взаимной индуктивностью .	54
Библиографический список.....	83

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению цикла лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждая лабораторная работа выполняется в три этапа:

1 этап. Расчётно-графическая часть выполняется студентом самостоятельно внеаудиторно, в ходе подготовки к лабораторным работам и включает в себя: изучение теоретических основ рассматриваемой темы, уяснение целей лабораторной работы и предстоящих исследований, аналитические расчёты режимов работы электрических цепей, подготовка формы протокола экспериментальной части отчёта.

2 этап. Экспериментальная часть выполняется в лаборатории кафедры под руководством преподавателя, в ходе которой осуществляется допуск к работе, сборка исследуемой электрической цепи, проведение экспериментов, согласование и утверждение полученных результатов у преподавателя.

3 этап. Самостоятельная обработка и анализ полученных в ходе экспериментов результатов, проверка их на адекватность с аналитическими расчётами 1-го этапа, формулировка выводов, оформление отчёта и его защита в объёме материала, обозначенного контрольными вопросами.

Отчёт по лабораторной работе оформляется каждым студентом самостоятельно с соблюдением требований существующих стандартов и методических указаний к оформлению отчётов. Форма и структура отчёта приведены в приложении к лабораторным работам.

ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКТА ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Компоновка оборудования

Общая компоновка комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении показана на рисунке 1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из мини-блоков, может устанавливаться и непосредственно на столе.

В выдвижных ящиках хранятся наборы мини-блоков и устройств, соединительные провода, перемычки и кабели, методические материалы. Один из наборов мини-блоков показан на столе (рисунок 1).

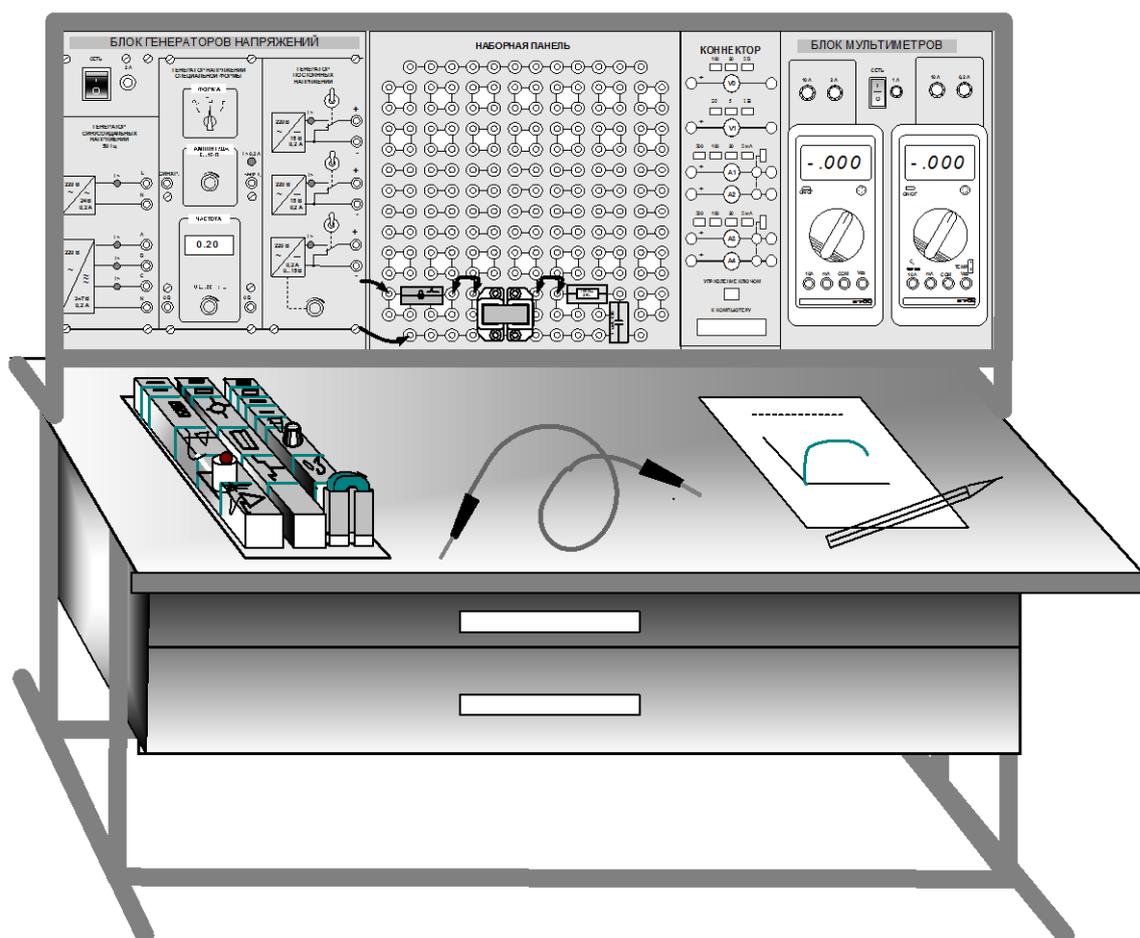


Рисунок 1 – Общая компоновка лабораторного оборудования

Блок генераторов напряжений

Лицевая панель блока генераторов напряжений показана на рисунке 2. Генератор состоит из источника синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 2 А.

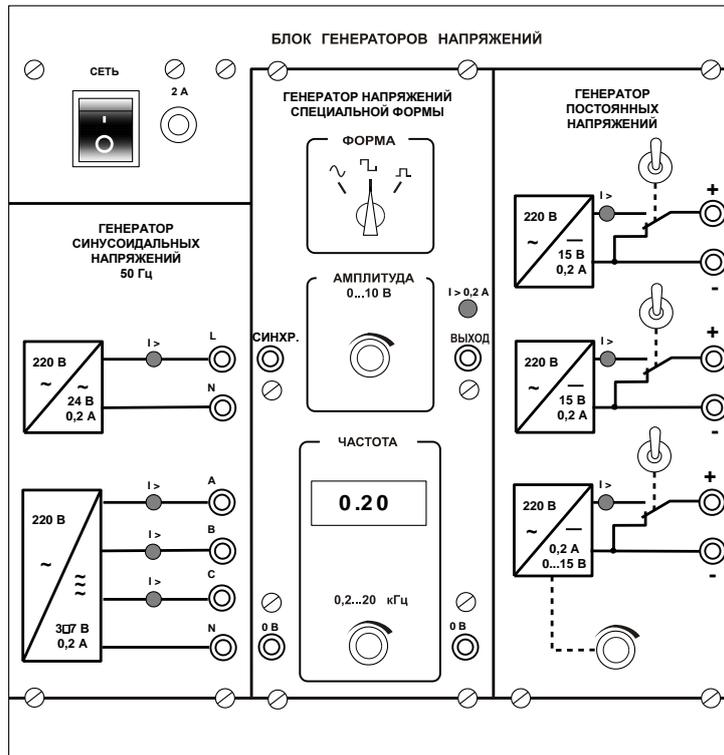


Рисунок 2 – Блок генераторов напрядений

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений гальванически изолированы друг от друга и от корпуса блока и защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Генератор синусоидальных напряжений содержит однофазный источник напряжения 24 В (вторичная обмотка питающего трансформатора 220/24 В) и трёхфазный стабилизированный по амплитуде выходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное. Выходное сопротивление трёхфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю.

Генератор напряжений специальной формы вырабатывает на выходе синусоидальный, прямоугольный двухполярный или прямоугольный однополярный сигнал в зависимости от положения переключателя «ФОРМА». Выходное сопротивление генератора в рабочем диапазоне токов также близко к нулю. Между гнездами «СИНХР» и «0 В» генератора при любом положении переключателя «ФОРМА» вырабатываются однополярные прямоугольные импульсы амплитудой 5 В, которые можно использовать для внешней синхронизации осциллографа. Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА» и не зависит, как от формы и амплитуды сигнала, так и от тока нагрузки.

Генератор постоянных напряжений содержит три источника стабилизированного напряжения 15 В, гальванически изолированных друг от друга. Вы-

ходное напряжение одного из этих источников регулируется от 0 до 15 В десятиоборотным потенциометром. Выходные сопротивления этих источников также близки к нулю и допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений больше 15 В они могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры).

Наборная панель

Наборная панель (рисунок 3) служит для расположения миниблоков в соответствии со схемой исследуемого опыта.

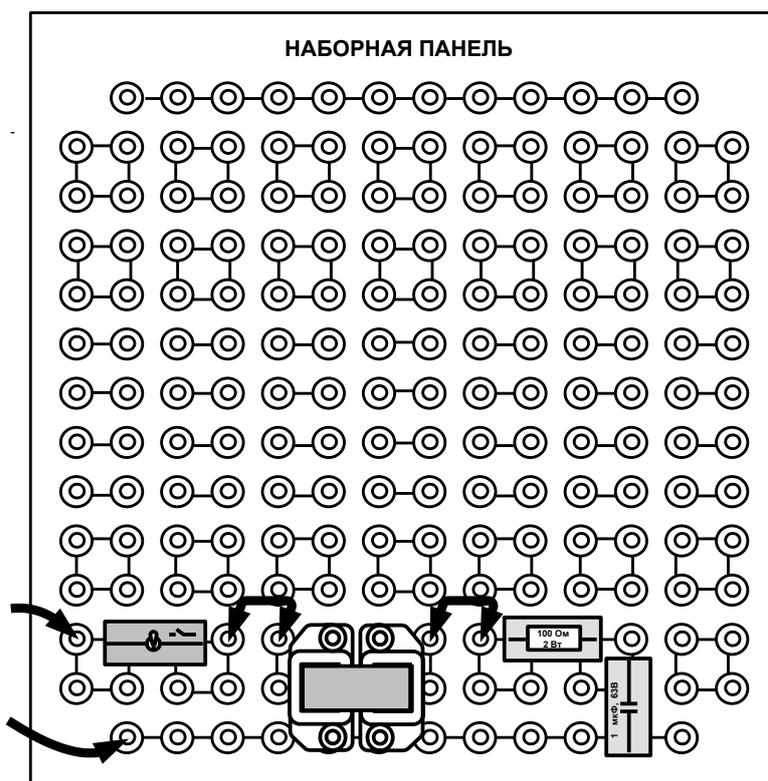


Рисунок 3 – Наборная панель лабораторного стенда

Гнёзда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнезда панели. Остальные соединения выполняются соединительными проводами и перемычками. Так на фрагменте цепи, показанной на рисунке 3, напряжение подаётся проводами через выключатель к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно.

Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек и вместо неё в образовавшийся разрыв включается амперметр. Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр.

Набор миниблоков лабораторного стенда

Мини-блоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые мини-блоки содержат несколько элементов, соединённых между собой в более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные графические обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики.

Набор трансформаторов

Набор трансформаторов включает в себя четыре разборных трансформатора, выполненных на разъёмных *U*-образных сердечниках из электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На трёх трансформаторах установлены катушки 900/300 витков, на четвёртом 100/100 витков, однако, они легко переставляются.

Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рисунке 4. В нём установлены 2 серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводится в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

- не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы;
- устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину, если порядок измеряемой величины неизвестен;
- отключайте щупы от проверяемой цепи перед тем, как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!);
- не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение;
- не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены;
- будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64.

Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения имеющихся в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

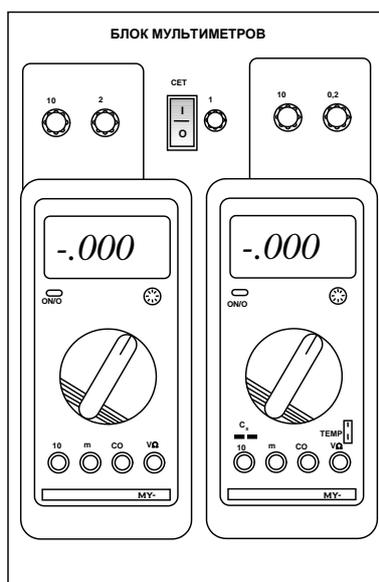


Рисунок 4 – Блок мультиметров лабораторного стенда

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: $-V$, $\sim V$, $-A$, $\sim A$ или \square ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра в качестве вольтметра, амперметра и омметра показано на рисунке 5.

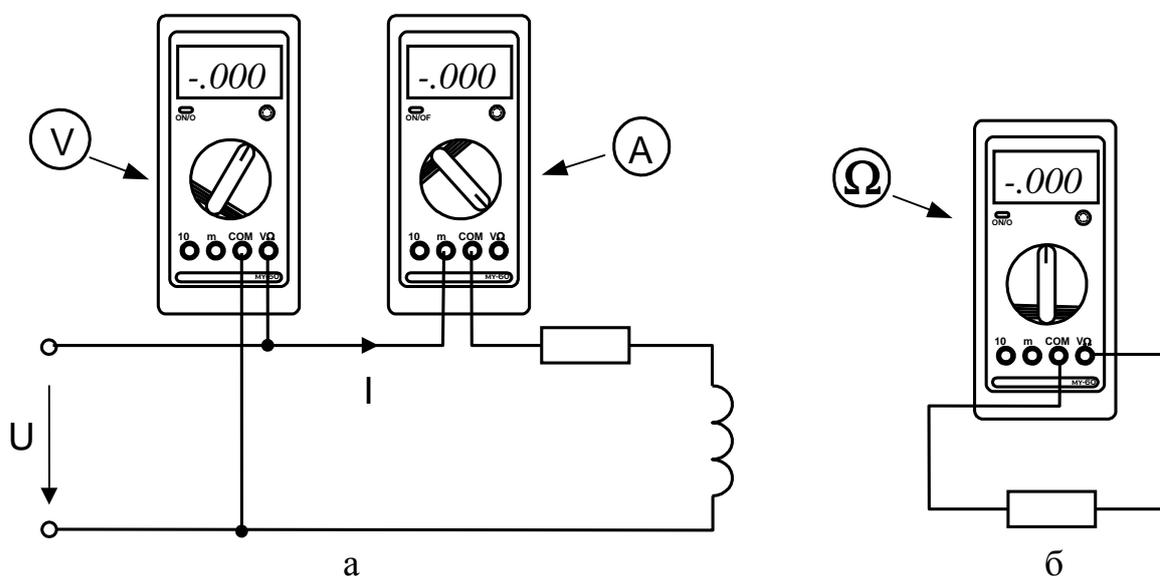


Рисунок 5 – Подключение мультиметра: а – в качестве вольтметра и амперметра; б – в качестве омметра

Ваттметр учебного стенда

Ваттметр учебного стенда (рисунок 6) цифрового типа. На его дисплее отображается среднее значение произведения мгновенных величин тока и напряжения.

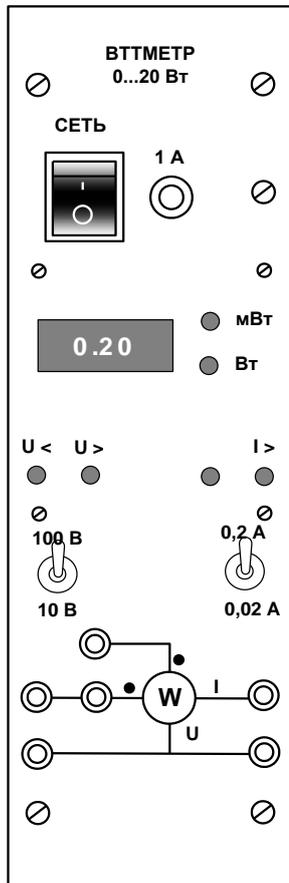


Рисунок 6 – Ваттметр стенда

Прибор включается в цепь согласно схеме, приведённой на лицевой панели. Для измерения активной мощности, гнезда, отмеченные символом «•», должны быть соединены перемычкой. После сборки схемы необходимо включить выключатель «СЕТЬ» и установить необходимые пределы измерения по току и напряжению тумблерами. Если выбран заниженный предел измерения, то включается сигнализация перегрузки «I >» или (и) «U >». В случае если предел превышен, то включается сигнализация «I <» или (и) «U <».

Справа от окошка цифровых индикаторов автоматически включаются светодиоды сигнализации размерности «Вт» или «мВт».

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1 Цели работы

1 Получение навыков сборки электрических цепей и пользования электроизмерительными приборами.

2 Экспериментальное исследование параметров цепи, построение потенциальной диаграммы, освоение основных расчётных способов по определению токов и напряжений на участках цепи.

2 Основные положения теории электрических цепей

2.1 Основные понятия, законы Ома и Кирхгофа

Электрической цепью называют совокупность устройств и объектов (элементов), соединенных друг с другом, по которым может протекать *электрический ток*, и предназначенных для распределения, преобразования и передачи электрической энергии.

Для протекания тока необходимы *источники электрической энергии* – источники напряжения (ЭДС) или тока.

Электрическая цепь содержит также устройства, в которых энергия электрического тока преобразуется в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и т.д.). Эти устройства называются *приёмниками электрической энергии*, или *нагрузками*.

Если элемент цепи характеризуется линейными алгебраическими или дифференциальными уравнениями, то его называют *линейным*.

Цепи, содержащие только линейные элементы, называют *линейными* цепями. Основное свойство таких цепей – применимость принципа наложения (суперпозиции), заключающегося в том, что результирующая реакция линейной цепи на несколько приложенных одновременно возмущений равна сумме реакций, обусловленных каждым возмущением в отдельности.

Для замыкания и размыкания цепей используют *выключатели* (тумблеры) того или иного вида.

Ток, неизменный по величине и направлению, называют *постоянным* и обозначают символом I .

Каждая точка электрической цепи характеризуется потенциалом φ . Он определяется относительно какой-либо одной точки, потенциал которой условно принимают равным нулю.

Закон Ома математически выражает соотношение между напряжением U , током I и сопротивлением R на участке цепи и читается следующим образом: «Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к участку, и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка» (рисунки 7).

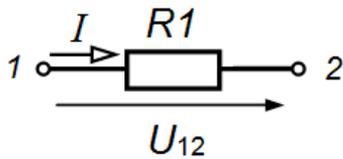


Рисунок 7

$$I = \frac{U_{12}}{R_1}, \quad (1.1)$$

где $U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)$.

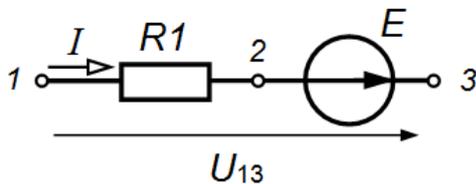


Рисунок 8

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС (рисунок 8):

$$\varphi_2 = \varphi_1 - IR_1;$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 + E.$$

Отсюда следует:

$$\varphi_3 = \varphi_1 - IR_1 + E;$$

$$\varphi_1 - \varphi_3 = IR_1 - E;$$

$$U_{13} = IR_1 - E;$$

$$IR_1 = U_{13} + E,$$

Тогда ток протекающий по участку цепи определяется выражением

$$I = (U_{13} + E)/R_1. \quad (1.2)$$

Для любого узла электрической цепи справедлив первый закон Кирхгофа, формулируемый следующим образом: *сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю*. Существует и другая, аналогичная по смыслу формулировка: *сумма значений токов, входящих в узел, равна сумме значений токов, выходящих из узла*.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (1.3)$$

При этом полагают, что токи, втекающие в узел, считаются положительными, а вытекающие – отрицательными.

Для любого замкнутого контура электрической цепи справедлив второй закон Кирхгофа, формулируемый следующим образом: *алгебраическая сумма ЭДС, действующих в контуре равна алгебраической сумме падений напряжения на элементах этого контура*.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m I_k U_k. \quad (1.4)$$

2.2 Методы расчёта электрических цепей

2.2.1 Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

Классическим методом расчёта сложных электрических цепей является метод непосредственного применения законов Кирхгофа. Все остальные методы расчёта вытекают из этих фундаментальных законов.

Расчёт производится в следующей последовательности:

1. Произвольно задаются условно положительными направлениями токов во всех ветвях схемы.

2. Определяется количество уравнений системы для решения задачи (число уравнений равно числу неизвестных токов).

3. Определяется количество узлов в схеме.

4. Если в схеме n узлов, то количество независимых уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, равно $n - 1$.

5. Недостающее количество уравнений системы составляется по второму закону Кирхгофа для независимых контуров.

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. Обычно в задаче заданы значения ЭДС источников E_1, E_2 и сопротивлений всех резисторов R_1-R_6 . Требуется определить токи во всех ветвях схемы I_1-I_6 .

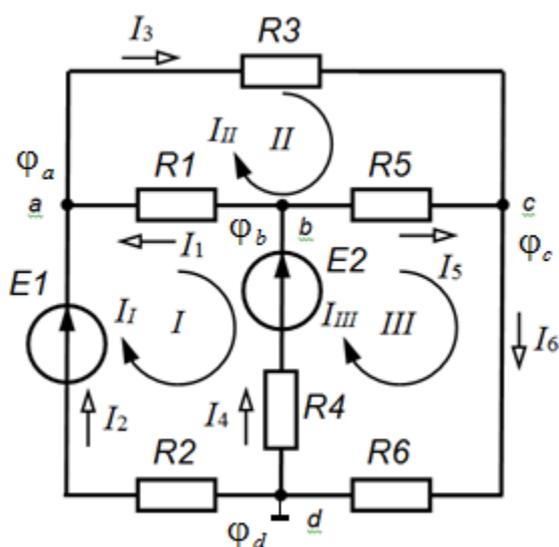


Рисунок 9 – Схема разветвлённой электрической цепи

Определим токи в ветвях схемы методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

1. Во всех ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов $I_1 - I_6$;

2. Определяется количество уравнений, равное числу неизвестных токов (в данном случае их 6);

3. Определяется количество (n) узлов в схеме ($n = 4$);

4. Составляются уравнения по первому закону Кирхгофа для количества узлов на один меньше ($n-1$), чем в схеме:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{ для узла } a: I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ - \text{ для узла } b: -I_1 + I_4 - I_5 = 0; \\ - \text{ для узла } c: I_3 + I_5 - I_6 = 0. \end{array} \right\} \quad (1.5)$$

5. Недостающие число уравнения записываются по второму закону Кирхгофа для 3-х независимых контуров:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{ для контура } I: -I_1R_1 + I_2R_2 - I_4R_4 = E_1 - E_2; \\ - \text{ для контура } II: I_1R_1 + I_3R_3 - I_5R_5 = 0; \\ - \text{ для контура } III: I_4R_4 + I_5R_5 + I_6R_6 = E_2. \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

6. Решая совместно уравнения системы (1.5-1.6), находят значения иско-
мых токов.

Если в результате решения системы уравнений некоторые токи получатся отрицательными, то это указывает на то, что истинное направление токов в этих ветвях противоположно выбранному нами (условно положительному).

2.2.2 Метод контурных токов

Этот метод применяется для расчёта сложных электрических цепей и позволяет уменьшить количество составляемых уравнений и тем самым упростить расчёт. При расчёте методом контурных токов полагают, что в каждом независимом контуре схемы течёт свой, так называемый, *контурный ток*. Уравнения составляются по второму закону Кирхгофа и определяются контурные токи. Затем от контурных токов переходят к токам в ветвях.

Расчёт схемы производится **в следующей последовательности**:

1. Во всех ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов.
2. Определяются независимые контуры в схеме.
3. Выбираются условно положительные направления контурных токов.
4. Составляется система уравнений на основании первого закона Кирхгофа с учётом обобщённого закона Ома для выбранных контуров:
5. Решая полученную систему уравнений, находят значения контурных токов.
6. По найденным значениям контурных токов определяются токи ветвей.

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. В задаче заданы значения ЭДС источников E_1 , E_2 и сопротивлений всех резисторов R_1 - R_6 . Требуется определить токи в ветвях схемы I_1 - I_6 методом контурных токов.

1. Во всех ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов.
2. Определяются независимые контуры в схеме. На рисунке 9 они обозначены римскими цифрами.
3. Выбираются условно положительные направления контурных токов I_I - I_{III} . В данной задаче – по часовой стрелке.
4. Составляется система уравнений на основании первого закона Кирхго-

фа с учётом обобщённого закона Ома для выбранных трёх независимых контуров:

$$\left. \begin{aligned} I_I R_{11} + I_{II} R_{12} + I_{III} R_{13} &= E_I; \\ I_I R_{21} + I_{II} R_{22} + I_{III} R_{23} &= E_{II}; \\ I_I R_{31} + I_{II} R_{32} + I_{III} R_{33} &= E_{III}, \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

где R_{11}, R_{22}, R_{33} – собственные сопротивления контуров:

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_4; \quad R_{22} = R_1 + R_3 + R_5; \quad R_{33} = R_4 + R_5 + R_6; \quad (1.8)$$

$R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}, R_{31}, R_{32}$ – сопротивления смежных ветвей контуров:

$$R_{12} = R_{21} = -R_1; \quad R_{13} = R_{31} = -R_4; \quad R_{23} = R_{32} = -R_5; \quad (1.9)$$

E_I, E_{II}, E_{III} – контурные ЭДС;

$$E_I = E_1 - E_2; \quad E_{II} = 0; \quad E_{III} = E_2. \quad (1.10)$$

С учётом (1.8-1.10) система уравнений (1.7) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} - \text{для контура } I: & I_I(R_1 + R_2 + R_4) - I_{II}R_1 - I_{III}R_4 = E_1 - E_2; \\ - \text{для контура } II: & I_{II}(R_1 + R_3 + R_5) - I_I R_1 - I_{III}R_5 = 0; \\ - \text{для контура } III: & I_{III}(R_4 + R_5 + R_6) - I_I R_4 - I_{II}R_5 = E_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

При этом ЭДС, направления которых совпадают с направлением контурного тока, имеют знак «плюс», в противном случае – знак «минус».

5. Решая уравнения (1.11) совместно, определяются контурные токи I_I и I_{II}, I_{III} . затем от контурных токов переходим к токам в ветвях.

6. По найденным значениям контурных токов определяются токи ветвей.

Ветви схемы, по которым протекает один контурный ток, называются **внешними**, а ветви, по которым протекают несколько контурных токов, называются **общими**. Ток I_3 во внешней ветви совпадает по величине и по направлению с контурным током I_{II}

$$I_3 = I_{II}.$$

Аналогично

$$I_2 = I_I; \quad I_6 = I_{III}.$$

Ток в общей ветви равен алгебраической сумме контурных токов, протекающих в этой ветви.

$$I_1 = -I_I + I_{II}; \quad I_5 = -I_{II} + I_{III}; \quad I_4 = -I_I + I_{III}.$$

Рекомендации при решении задач:

1. Контурные выбирают произвольно, но целесообразно выбрать контуры таким образом, чтобы их внутренняя область не пересекалась ни с одной ветвью, принадлежащей другим контурам.

2. Контурные токи желательно направлять одинаково (по часовой стрелке или против).

3. Если нужно определить ток в одной ветви сложной схемы, необходимо сделать его контурным.

4. Если в схеме имеется ветвь с известным контурным током, этот ток следует сделать контурным, благодаря чему количество уравнений становится на единицу меньше.

2.2.3 Метод узловых потенциалов

Этот метод также применяется для расчёта сложных электрических цепей и позволяет уменьшить количество составляемых уравнений и упростить решение задачи. Суть метода узловых потенциалов заключается в том, что один из узлов схемы заземляется и его потенциал принимается равным нулю. Далее определяются потенциалы остальных узлов, что дает возможность определить напряжения на зажимах каждой ветви. Затем, используя закон Ома (1.2), определяются токи в ветвях.

Расчёт схемы производится по следующему алгоритму.

1. В схеме определяется число узлов, узлы нумеруются.
2. Потенциал любого узла, чаще последнего по номеру принимается равным нулю (заземляется).
3. Составляется система уравнений на основании первого закона Кирхгофа с учётом обобщённого закона Ома для полученного числа узлов (за исключением заземленного узла) следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 G_{11} + \varphi_2 G_{12} + \varphi_3 G_{13} + \dots + \varphi_n G_{1n} &= I_{11}; \\ \varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} + \varphi_3 G_{23} + \dots + \varphi_n G_{2n} &= I_{22}; \\ \varphi_1 G_{31} + \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} + \dots + \varphi_n G_{3n} &= I_{33}; \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi_1 G_{n1} + \varphi_2 G_{n2} + \varphi_3 G_{n3} + \dots + \varphi_n G_{nn} &= I_{nn}. \end{aligned} \right\}$$

4. Решается система уравнений, и находятся потенциалы узлов.
5. Используя закон Ома для ветвей не содержащих источники ЭДС (1.1) и обобщенный закон Ома, для ветвей, содержащих источники ЭДС (1.2) по найденным потенциалам вычисляются токи в ветвях

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. Известны значения ЭДС источников E_1, E_2 и сопротивлений всех резисторов R_1-R_6 . Требуется определить токи в ветвях схемы I_1-I_6 методом узловых потенциалов.

1. Обозначим на схеме узлы a, b, c, d . Потенциал узла d принимаем равным нулю ($\varphi_d = 0$).
2. Составляем систему уравнений на основании первого закона Кирхгофа с учётом обобщённого закона Ома для узлов a, b, c .

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a G_{11} + \varphi_b G_{12} + \varphi_c G_{13} &= I_{11}; \\ \varphi_a G_{21} + \varphi_b G_{22} + \varphi_c G_{23} &= I_{22}; \\ \varphi_a G_{31} + \varphi_b G_{32} + \varphi_c G_{33} &= I_{33}, \end{aligned} \right\}$$

где G_{11} , G_{22} , G_{33} – собственные проводимости ветвей, подсоединённые соответственно к узлам a , b , c (всегда со знаком «плюс»):

$$G_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad G_{22} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}; \quad G_{33} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}.$$

G_{12} , G_{21} , G_{13} , G_{31} , G_{23} , G_{32} – взаимные проводимости ветвей, соединяющие соответствующие узлы (всегда со знаком «минус»).

$$G_{12} = G_{21} = -\frac{1}{R_1}; \quad G_{13} = G_{31} = -\frac{1}{R_3}; \quad G_{23} = G_{32} = -\frac{1}{R_5}.$$

I_{11} , I_{22} , I_{33} – узловые токи, токи в ветвях, содержащие источники ЭДС и подключенные к соответствующему узлу. Вычисляются, как отношение источника ЭДС, действующего в данной ветви к сопротивлению данной ветви.

При этом источник ЭДС, направленный к узлу, принимается со знаком «плюс», в противном случае – со знаком «минус».

$$I_{11} = \frac{E_1}{R_2}; \quad I_{22} = \frac{E_2}{R_4}; \quad I_{33} = 0.$$

2.3 Энергетический баланс в электрических цепях

При протекании токов по резисторам в них выделяется теплота. На основании закона сохранения энергии количество теплоты, выделяющееся в единицу времени в резисторах схемы, должно равняться энергии, доставляемой за то же время источником питания. То есть, в любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс – баланс мощностей, который читается так: алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии (в частности, источников тока и источников ЭДС) равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии (в частности, резистивных элементов).

Уравнение баланса мощностей при питании только от источников ЭДС имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{i=m} E_i I_i = \sum_{j=1}^{j=n} I_j^2 R_j.$$

Причём, если направление тока I , протекающего через источник ЭДС E , совпадает с направлением ЭДС, то источник ЭДС является источником энергии и в уравнении энергетического баланса произведение EI принимается со знаком «плюс». Если же направление тока I встречно направлению ЭДС E , то источник ЭДС является приёмником энергии и в уравнении энергетического баланса произведение EI принимается со знаком «минус».

Запишем уравнение баланса мощностей для схемы (рисунок. 10).

Предположим, что в схеме рассматриваемой цепи указаны истинные направления токов в ветвях. Тогда выражение для баланса мощностей будет иметь вид:

$$E_1 I_2 - E_2 I_3 + E_3 I_4 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_6^2 R_7.$$

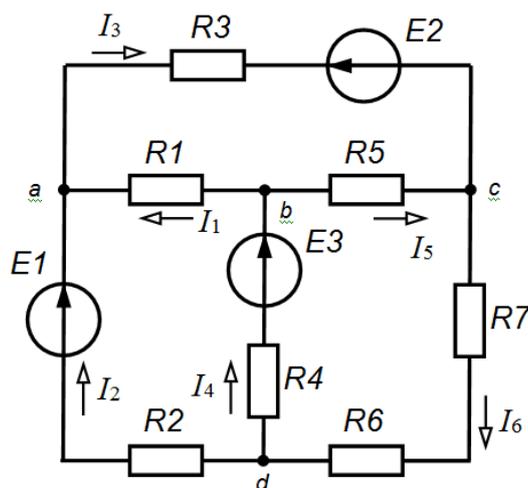


Рисунок 10 – Схема разветвлённой электрической цепи

Следует отметить, что баланс мощностей часто является проверкой правильности решения задачи. Если баланс мощностей сходится с погрешностью, не превышающей 3 %, то задача решена верно. В противном случае – нет.

2.4 Потенциальная диаграмма

Потенциальная диаграмма – это графическое изображение распределения электрического потенциала вдоль замкнутого контура в зависимости от сопротивления участков, входящих в выбранный контур.

Диаграмма строится после нахождения токов (решения задачи) по одному из вышеперечисленных методов. По оси абсцисс диаграммы откладываются сопротивления вдоль выбранного контура, начиная с какой-либо произвольной точки, по оси ординат – потенциалы этих точек. Каждой точке участка цепи или замкнутого контура соответствует своя точка на потенциальной диаграмме.

Последовательность построения потенциальной диаграммы следующая:

1. Задаются токи в ветвях схемы с указанием их истинных направлений.
2. На схеме указываются характерные точки, между которыми содержится один элемент (резистор или ЭДС).
3. Заземляется любая точка, потенциал в которой будет равен нулю, а потенциалы других точек рассчитываются. Если направление обхода контура совпадает с направлением тока через резистор, то потенциал уменьшается. При совпадении направление обхода контура с направлением ЭДС потенциал увеличивается. И наоборот.
4. Строится потенциальная диаграмма, при этом на оси абсцисс в выбранном масштабе откладываются сопротивления между характерными точками, начало координат должно соответствовать точке с нулевым потенциалом.
5. На оси ординат в масштабе откладываются потенциалы характерных точек.
6. Полученные точки соединяются прямыми линиями.
7. На оси абсцисс в масштабе откладываются сопротивления между характерными точками.

Рассмотрим на примере построение потенциальной диаграммы замкнутого контура фрагмента цепи, изображенного на рисунке 11, учитывая что на схеме указаны истинные направления токов в ветвях.

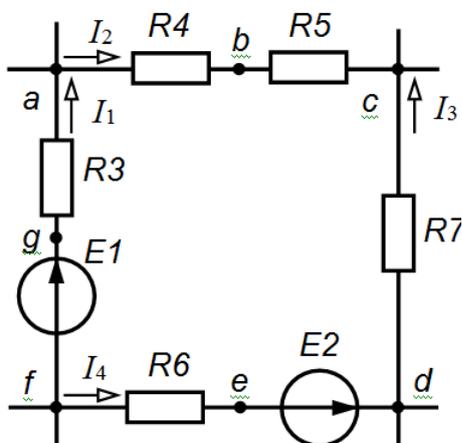


Рисунок 11

1. Задаём токи в ветвях схемы и указываем их истинные направлений.
2. На схеме указываем характерные точки: a, b, c, d, e, f, g , между которыми содержится один элемент (резистор или ЭДС).
3. Заземляем точку a , потенциал в которой будет равен нулю, и рассчитываем потенциалы других точек:

$$\begin{aligned} \varphi_a = 0; & \quad \varphi_b = \varphi_a - I_2 R_4; & \quad \varphi_c = \varphi_b - I_2 R_5; & \quad \varphi_d = \varphi_c + I_3 R_7; \\ \varphi_e = \varphi_d + I_4 R_6; & \quad \varphi_f = \varphi_e - E_2; & \quad \varphi_g = \varphi_f + E_1; & \quad \varphi_a = \varphi_g - I_1 R_3. \end{aligned}$$

4. Строим потенциальную диаграмму (рисунок 12). При этом на оси абсцисс в выбранном масштабе откладываем сопротивления между характерными точками, начало координат должно соответствовать точке a с нулевым потенциалом.

5. На оси ординат в масштабе откладываем потенциалы характерных точек.

6. Полученные точки соединяем прямыми линиями.

7. На оси абсцисс в выбранном масштабе откладываем сопротивления между характерными точками.

Произвольно примем потенциал одной из точек, например, точки a , $\varphi_a = 0$. Эту точку на диаграмме (рисунок 12) поместим в начало координат. Отметим на диаграмме потенциалы всех точек контура и соединим их прямыми линиями.

Потенциальная диаграмма позволяет определить напряжения между любыми точками цепи, если на оси ординат отмечены потенциалы этих точек.

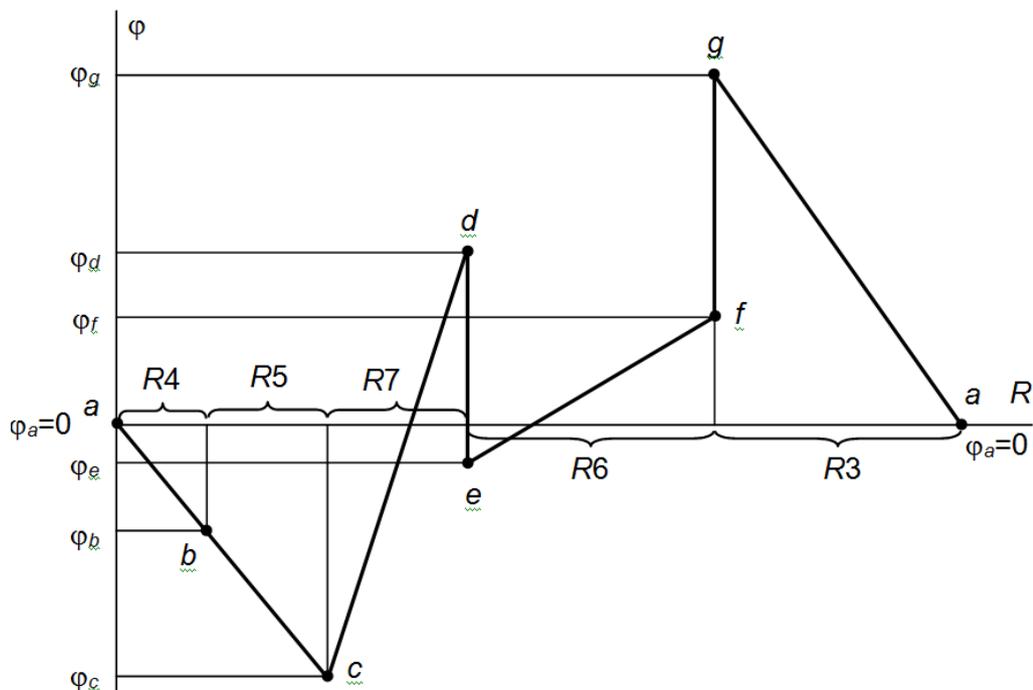


Рисунок 12 – Потенциальная диаграмма

3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе исследуются режимы работы линейной разветвленной цепи постоянного тока.

Объектом исследования являются цепи постоянного тока, содержащие линейные элементы резисторы из комплекта мини-блоков учебного стенда.

Источником постоянного тока служат два генератора постоянных напряжений из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ: регулируемый генератор (0-15 В) и нерегулируемый (15 В). Оба тумблера на этих генераторах при выполнении работы необходимо установить в верхнее положение.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Начертить схему исследуемой цепи для выбранного варианта. Варианты схем представлены на рисунке 13.

Параметры цепи для вариантов заданы в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
5	15	10	22	33	47	100	150

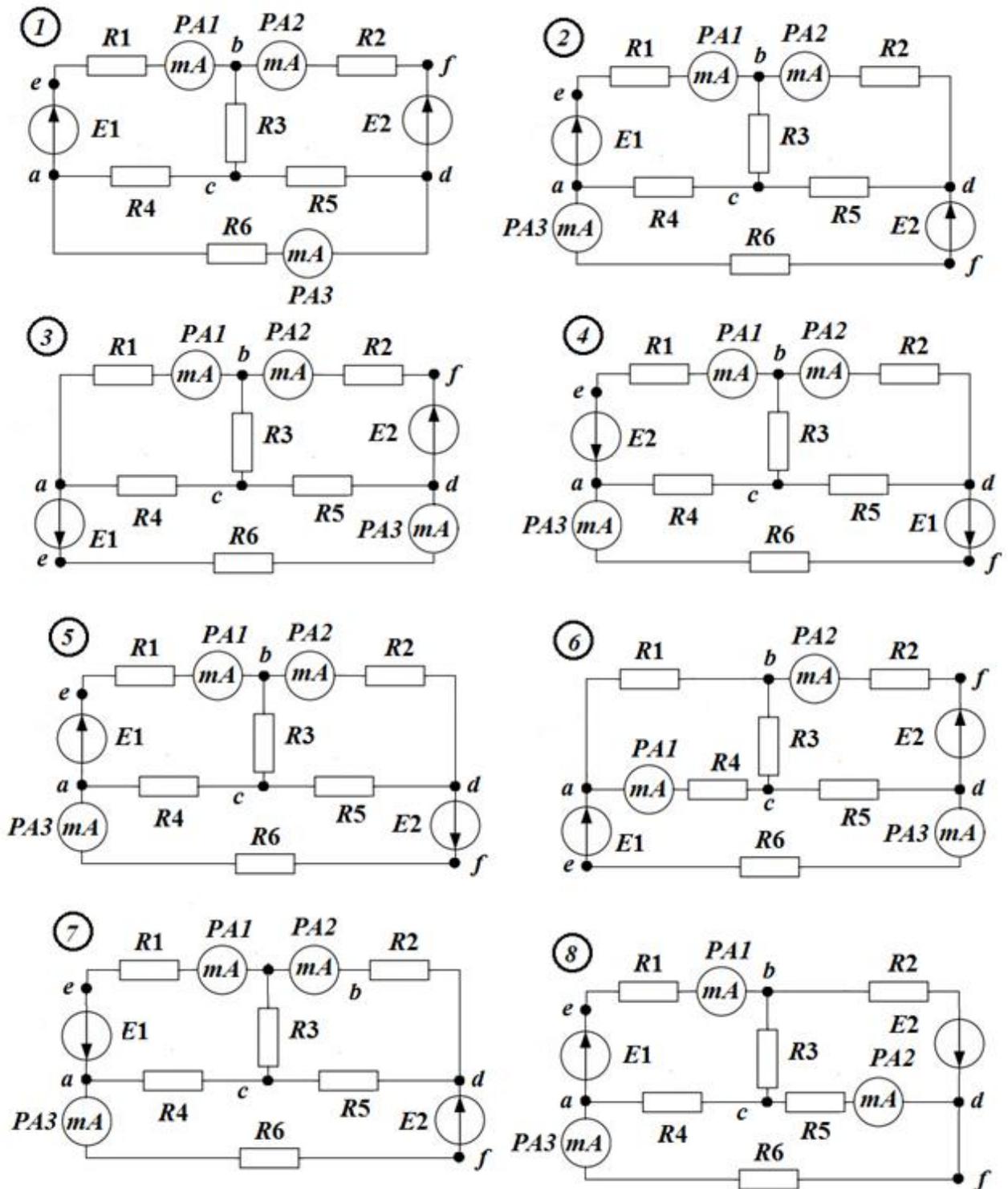


Рисунок 13 – Варианты схем к лабораторной работе № 1

4.2 Рассчитать для выбранной схемы методом непосредственного применения законов Кирхгофа токи в её ветвях и падения напряжений на каждом резисторе. При расчёте рекомендуется использовать ЭВМ. Полученные результаты занести в таблицы Б.2, Б.3 (приложение Б).

4.3 Рассчитать для выбранной схемы токи в её ветвях методом контурных токов. Результаты занести в таблицу Б.2. Сравнить полученные результаты с результатами, рассчитанными в п.4.2.

4.4 Рассчитать токи в выбранной схеме методом узловых потенциалов,

приняв потенциал одного из узлов равным нулю. Результаты занести в таблицу Б.2. Сравнить полученные результаты с результатами, рассчитанными в пп. 4.2, 4.3.

5 Экспериментальная часть

5.1 Собрать на наборной панели электрическую цепь выбранного варианта, включив три мультиметра в режиме амперметров как показано на рисунке 13. Пример монтажной схемы изображён на рисунке Б.1 (приложение Б).

5.2 Тумблеры SA1, SA2 на источниках напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (рисунок Б.1, приложение Б) установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений $U_{ВХ} = 5$ В. Установить заданные в таблице Б.1 величины R1, R2, R3, R4, R5, R6 из миниблоков резисторов. Установить на мультиметрах (РА1, РА2, РА3) режим измерения постоянного тока – I с диапазоном 200 мА.

5.3 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.4 Включить выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров.

5.5 Измерить амперметрами РА1-РА3 токи в исследуемых ветвях. Подсоединить амперметры РА1-РА3 в остальные ветви и измерить токи в них. Измеренные величины занести в таблицу Б.2 протокола испытаний.

5.6 Отсоединить мультиметр РА1, закоротив место его отсоединения, и перевести его в режим измерения постоянного напряжения – PV1. Подсоединяя вольтметр к зажимам резисторов, измерить падения напряжений на них. Измеренные величины занести в таблицу Б.3 протокола испытаний.

5.7 Выбрать в электрической цепи точку с нулевым потенциалом, аналогича выбранной в п. 4.4.

5.8 Измерить с помощью вольтметра PV1 потенциалы всех узлов цепи относительно выбранной точки с нулевым потенциалом. Результаты занести в таблицу Б.4.

5.9 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров и выключатель QF.

5.10 По измеренным потенциалам вычислить их разность.

5.11 Используя закон Ома, вычислить токи во всех ветвях исследуемой схемы. Результаты занести в таблицу Б.5 и сравнить их с результатами таблицы Б.3.

5.12 Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

5.13 Составить баланс мощностей для исследуемой схемы.

6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи для выбранного варианта.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта требуемыми

методами.

6.5 Описание экспериментальной части лабораторной работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Потенциальная диаграмма исследуемой цепи.

6.8 Сравнение измеренных экспериментальных значений с рассчитанными значениями согласно пп. 4.2-4.4.

6.9 Расчёт баланса мощностей исследуемой цепи.

7 Контрольные вопросы

7.1 Какой ток называется постоянным?

7.2 Какие источники электрической энергии относятся к источникам напряжения (ЭДС)?

7.3 Какие схемы замещения источников электрической энергии Вы знаете?

7.4 Как измерить ЭДС источника и его внутреннее сопротивление?

7.5 Какие режимы работы источника электрической энергии Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.

7.6 Как аналитически найти условие получения максимальной мощности во внешней цепи (режим согласования)?

7.7 Как преобразовать схему замещения источника напряжения в схему замещения источника тока и наоборот?

7.8 Что такое «внешняя характеристика» источника электрической энергии? Какой вид имеет эта характеристика у источника ЭДС и источника тока?

7.9 Сформулируйте обобщенный закон Ома для активного участка цепи.

7.10 Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа.

7.11 Какие методы расчёта разветвленных электрических цепей постоянного тока Вы знаете? Дайте им краткую сравнительную характеристику и обоснуйте области применимости.

7.12 Каким уравнением можно воспользоваться для наиболее полной проверки правильности расчета электрической цепи?

7.13 Каким образом рассчитывается мощность, отдаваемая источниками ЭДС?

7.14 Зависит ли вид второго закона Кирхгофа от направления обхода контура?

7.15 В каких случаях расчёт цепи целесообразно проводить по методу узловых потенциалов, а в каких – по методу контурных токов?

7.16 Сформулируйте и запишите систему уравнений для расчёта цепи методом контурных токов.

7.17 Сформулируйте и запишите систему уравнений для расчёта цепи методом узловых потенциалов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДАМИ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА И НАЛОЖЕНИЯ

1 Цели работы

Сравнение результатов расчёта цепей постоянного тока методами эквивалентного генератора и наложения с результатами экспериментальных исследований.

2 Основные положения теории

2.1 Метод эквивалентного генератора

Этот метод используется, когда необходимо определить ток только в одной ветви сложной цепи. Сущность метода заключается в том, что по отношению к исследуемой ветви сложная цепь заменяется активным двухполюсником, схема замещения которого представляется эквивалентным источником (эквивалентным генератором) с ЭДС $E_{экр}$ и внутренним сопротивлением $R_{вн}$, нагрузкой для которого является сопротивление R_n исследуемой ветви.

Расчёт производится в следующей последовательности.

1. Ветвь, выбранная для расчёта, удаляется из схемы.

2. Обозначаются узлы, к которым она присоединялась. Оставшаяся часть схемы и будет представлять собой активный двухполюсник (эквивалентный генератор) с эквивалентной ЭДС $E_{экр}$ и внутренним сопротивлением $R_{вн}$.

3. Определяется эквивалентная ЭДС генератора $E_{экр}$, которая равна напряжению холостого хода $U_{хх}$ на зажимах двухполюсника.

4. Определяется внутреннее сопротивление генератора $R_{вн}$ относительно зажимов двухполюсника, при этом идеальные источники ЭДС отбрасываются и закорачиваются.

5. Подключается удалённая ветвь к эквивалентному генератору.

6. По найденным значениям эквивалентной ЭДС $E_{экр}$ и внутреннего сопротивления генератора $R_{вн}$, определяется искомый ток в выбранной ветви.

Пример. В электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 14, определить ток I_5 в ветви с резистором R_5 .

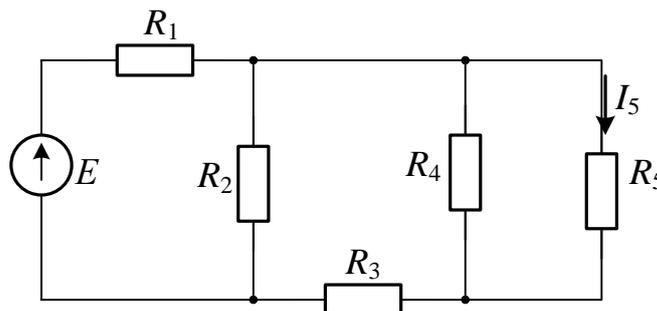


Рисунок 14

Решение

1. Ветвь с резистором R_5 удаляем из схемы (рисунок 15).

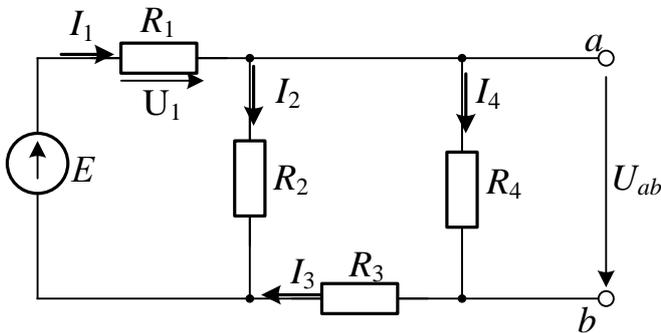


Рисунок 15

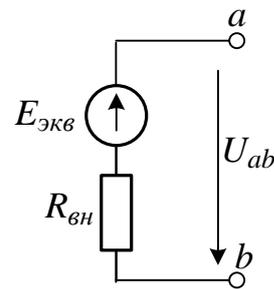


Рисунок 16

2. Узлы, к которым присоединялась ветвь с резистором R_5 обозначим a и b . Оставшуюся часть схемы представим активным двухполюсником (эквивалентным генератором) с эквивалентной ЭДС $E_{\text{экв}}$ и внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$ (рисунок 16).

3. Определяем эквивалентную ЭДС генератора $E_{\text{экв}}$, равную напряжению холостого хода U_{xx} на зажимах двухполюсника.

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{экв}}} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4}}.$$

Находим падение напряжения U_{ab} равную напряжению U_{xx} :

$$U_{ab} = I_1 R_{234} = I_1 \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4},$$

тогда

$$I_4 = \frac{U_{ab}}{R_3 + R_4} = \frac{I_1 R_2}{R_2 + R_3 + R_4};$$

$$E_{\text{экв}} = U_{\text{xx}} = I_4 R_4.$$

4. Определяем внутреннее сопротивление генератора $R_{\text{вн}}$ относительно зажимов a и b двухполюсника, при этом отбросив и закоротив идеальный источник ЭДС E .

$$R_{1,2,3} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3; \quad R_{\text{вн}} = \frac{R_{1,2,3} R_4}{R_{1,2,3} + R_4}.$$

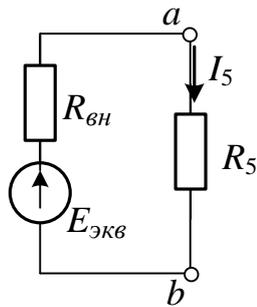


Рисунок 17

5. Подключаем удаленную ветвь с резистором R_5 к эквивалентному генератору (рисунок 17).

6. По найденным значениям эквивалентной ЭДС генератора $E_{экв}$ и внутреннего сопротивления генератора $R_{вн}$, определяем искомый ток I_5 в выбранной ветви по следующей формуле:

$$I_5 = \frac{E_{экв}}{R_5 + R_{вн}}.$$

2.2 Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную «звезду»

При расчёте схем встречаются сложные соединения элементов цепи, которые нельзя отнести ни к последовательным, ни к параллельным соединениям. Примерами являются соединения по схеме «звезда» (рисунок 18) и по схеме «треугольник» (рисунок 19).

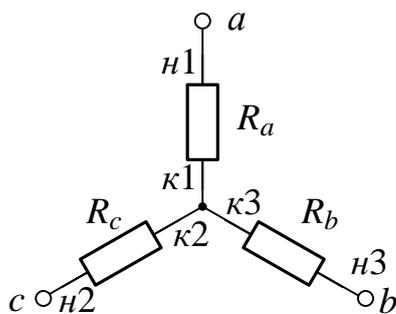


Рисунок 18

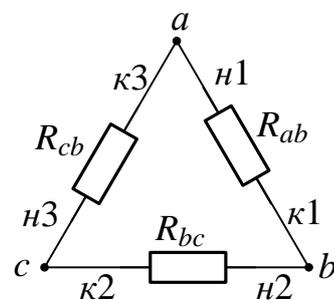


Рисунок 19

Соединение резисторов по схеме «звезда» – это такое соединение, в котором условные концы резисторов соединены в одном узле, а условные начала подключены к источнику.

Соединение резисторов по схеме «треугольник» – это такое соединение, в котором условный конец первого резистора соединен с условным началом второго, условный конец второго – с условным началом третьего и условный конец третьего – с началом первого. Иными словами, это соединение трёх резисторов, образующих замкнутый контур.

Расчёт цепей, содержащих такие соединения, в большинстве случаев не представляется возможным без преобразования одного вида соединения в другой.

Для преобразования соединения резисторов в «треугольник», соединенных до этого в эквивалентную «звезду», необходимо воспользоваться следующими соотношениями:

$$R_{ab} = R_a + R_b + R_a R_b / R_c ;$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + R_b R_c / R_a ;$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + R_c R_a / R_b .$$

Для преобразования соединения резисторов в схему «звезда», соединенных до этого в эквивалентный «треугольник», необходимо воспользоваться следующими соотношениями:

$$R_a = R_{ab} R_{ca} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}) ;$$

$$R_b = R_{bc} R_{ab} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}) ;$$

$$R_c = R_{ca} R_{bc} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}) .$$

Пример. Рассмотрим применение эквивалентных преобразований для следующей цепи (рисунок 20). В результате преобразования схемы «звезда» в эквивалентный «треугольник», получим схему, представленную на рисунке 21.

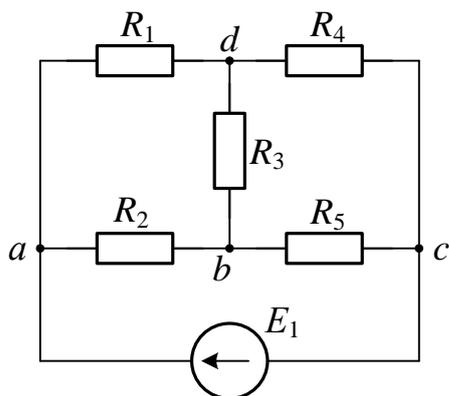


Рисунок 20

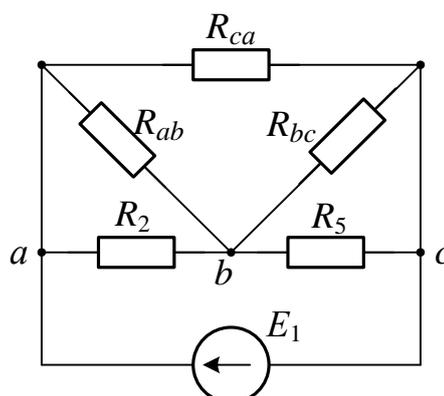


Рисунок 21

Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи можно определить из выражения:

$$R_{\text{экв}} = (R_2 \parallel R_{ab} + R_5 \parallel R_{ca}) \parallel R_{bc} .$$

В результате преобразования схемы «треугольник» в эквивалентную «звезду», получим схему, представленную на рисунке 22.

При этом эквивалентное сопротивление цепи можно определить из выражения:

$$R_{\text{экв}} = (R_d + R_4) \parallel (R_b + R_5) + R_a .$$

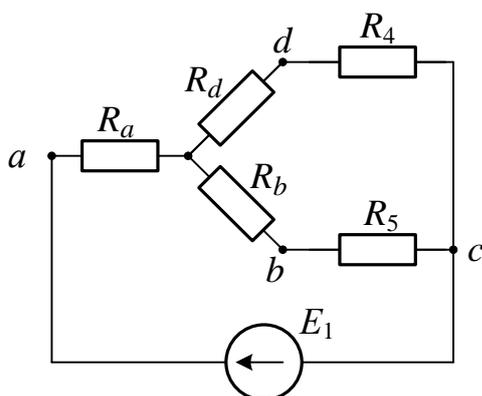


Рисунок 22

Очевидно, второе преобразование приводит к более простому расчёту, чем первое.

2.2 Способы соединения элементов электрической цепи

2.2.1 Последовательное соединение элементов

Последовательное соединение резисторов – это такое соединение, в котором условный конец одного резистора соединен с условным началом второго резистора, а конец второго резистора с началом третьего и так далее.

Схема последовательного соединения резисторов представлено на рисунке 23.

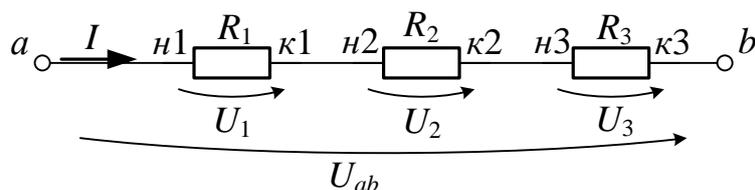


Рисунок 23 – Последовательное соединение резисторов

Последовательное соединение элементов между двумя узлами образуют ветвь, по которой проходит один и тот же электрический ток I .

Определим эквивалентное (общее) сопротивление цепи.

На основании второго закона Кирхгофа общее напряжение U всей цепи равно сумме напряжений на элементах

$$U_{ab} = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3).$$

Отсюда следует, что

$$R_{э\text{кв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Таким образом, при последовательном соединении элементов общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков. Следовательно, цепь с любым числом последовательно включенных сопротивлений можно заменить простой цепью с одним эквивалентным сопротивлением $R_{э\text{кв}}$.

$$R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^{k=n} R_k ,$$

где n – общее количество резисторов в цепи.

Следует отметить, что при равенстве сопротивлений всех резисторов, имеем

$$R_1 = R_2 = R_3 = R; \quad R_{\text{экв}} = 3R.$$

Тогда в общем виде получим:

$$R_{\text{экв}} = Rn,$$

где n – общее количество резисторов в цепи.

2.2.2 Параллельное соединение элементов

Параллельное соединение резисторов – это такое соединение, в котором условные начала всех резисторов соединены в одном узле, а их концы в другом узле (рисунок 24).

При таком соединении ко всем резисторам будет приложено одно и то же напряжение $U_{ab} = U_{12}$.

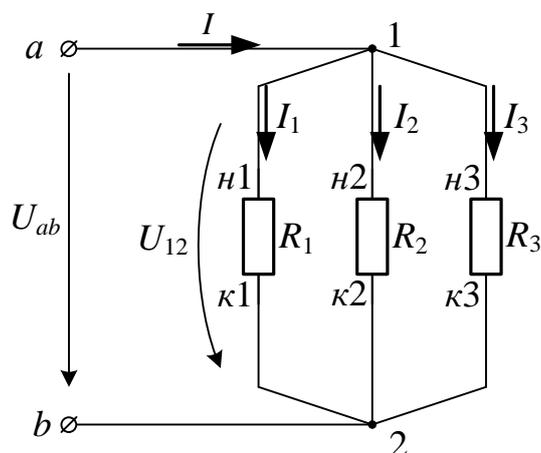


Рисунок 24 – Параллельное соединение резисторов

Определим эквивалентное (общее) сопротивление цепи.

В этом случае для узлов цепи 1 и 2 на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что общий ток I всей цепи равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или с учётом закона Ома

$$\frac{U_{ab}}{R_{\text{экв}}} = \frac{U_{12}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} + \frac{U_{12}}{R_3} .$$

Тогда

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{(R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2)}{R_1 R_2 R_3}.$$

В результате имеем:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}.$$

В общем виде при параллельном соединении эквивалентное (общее) сопротивление всей цепи будет определяться выражением:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{R_k},$$

где n – общее количество резисторов в цепи.

Следует отметить, что при равенстве сопротивлений всех резисторов

$$R_1 = R_2 = R_3 = R, \quad 1/R_{\text{экв}} = 1/3R.$$

Тогда в общем виде получим:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{n},$$

где n – общее количество резисторов в цепи.

2.3 Метод эквивалентных преобразований (свертывания)

Метод эквивалентных преобразований применяется при смешанном соединении элементов цепи, подключенных к одному источнику питания.

Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных сопротивлений.

Для цепи, представленной на рисунке 25, расчёт эквивалентного сопротивления начинается с конца схемы.

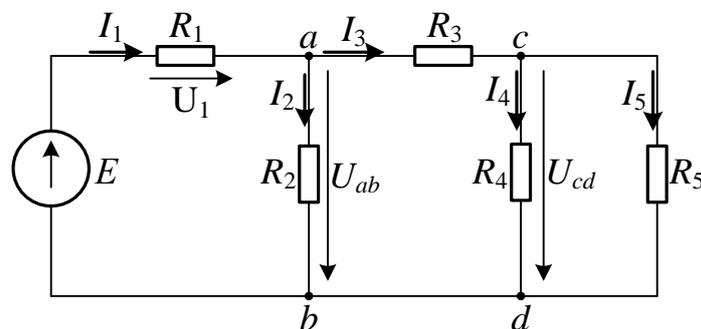


Рисунок 25 – Смешанное соединение резисторов

Для упрощения расчётов примем, что все сопротивления в этой схеме являются одинаковыми:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R.$$

Сопротивления R_4 и R_5 включены параллельно, тогда сопротивление участка цепи cd равно:

$$R_{cd} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R^2}{2R}.$$

В этом случае исходную схему (рисунок 25) можно представить в следующем виде (рисунок 26).

На схеме (рисунок 26) сопротивление R_3 и R_{cd} соединены последовательно, тогда сопротивление участка цепи ad равно:

$$R_{ad} = R_3 + R_{cd}.$$

Тогда схему (рисунок 26) можно представить в сокращенном варианте (рисунок 27):

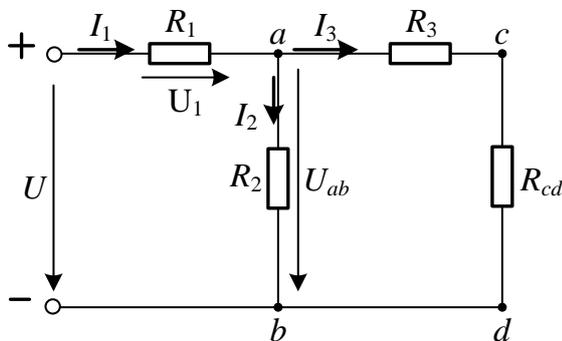


Рисунок 26

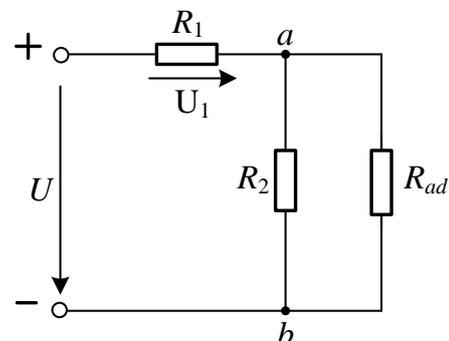


Рисунок 27

На схеме (рисунок 27) сопротивление R_2 и R_{ad} соединены параллельно, тогда сопротивление участка цепи ab равно

$$R_{ab} = \frac{R_2 \cdot R_{ad}}{R_2 + R_{ad}} = \frac{R \frac{3}{2} R}{R + \frac{3}{2} R} = \frac{3}{5} R.$$

Схему (рисунок 27) можно представить в упрощенном варианте (рисунок 28), где сопротивления R_1 и R_{ab} включены последовательно.

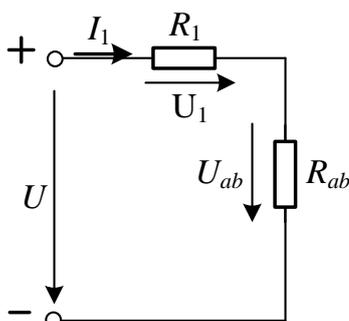


Рисунок 28

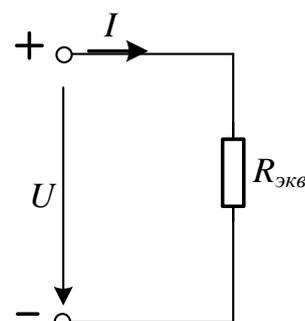


Рисунок 29

Тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы (рисунк 25) определяется выражением:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{ab} = R + \frac{3}{5}R = \frac{8}{5}R.$$

В результате эквивалентных преобразований исходная схема (рисунок 25) представлена в виде схемы (рисунок 29) с одним сопротивлением $R_{\text{экв}}$.

Потребляемый электрической цепью ток I_1 на основании закона Ома определяется выражением:

$$I_1 = E/R_{\text{экв}}.$$

Токи в ветвях соответственно могут быть найдены следующим образом:

$$U_{ab} = I_2 R_{ab}; \quad I_2 = U_{ab} / R_2; \quad I_3 = U_{ac} / R_{ac};$$

$$U_{cd} = (I_4 + I_5) R_{cd}; \quad I_4 = U_{cd} / R_4; \quad I_5 = U_{cd} / R_5.$$

2.4 Метод наложения (суперпозиции)

Принцип наложения справедлив только в линейных электрических цепях. Он формулируется следующим образом:

Ток в k -ой ветви равен алгебраической сумме токов, вызываемых каждой из ЭДС схемы в отдельности.

Принцип наложения положен в основу метода расчёта линейных электрических цепей, получившего название **метода наложения**.

При расчёте цепей данным методом поступают следующим образом: поочередно рассчитывают токи, возникающие от действия каждой из ЭДС, мысленно замыкая накоротко остальные, но оставляя в схеме их внутренние сопротивления. Находят токи в ветвях путём алгебраического сложения частичных токов.

Рассмотрим для примера схему, представленную на рисунке 30, *а*.

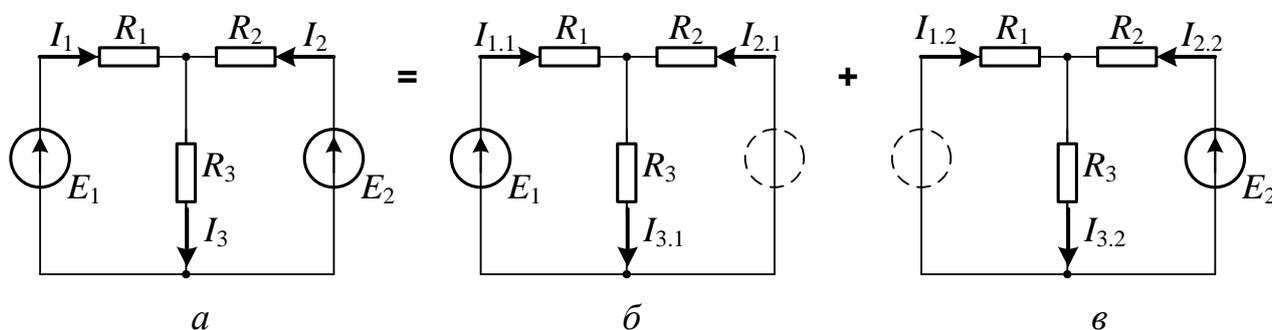


Рисунок 30 – Расчёт цепи методом наложения

Расчёт схемы производится в следующей последовательности.

1. В ветвях схемы принимаются условно положительные направления токов.

2. Определяются частичные токи в ветвях от действия каждого источника ЭДС в отдельности.

3. Определяются токи в ветвях путём сложения их частичных токов.

Выполним расчёт схемы (рисунок 30,а) в указанной последовательности.

1. Принимаем в ветвях схемы условно положительные направления токов $I_1 - I_3$.

2. Определяем частичные токи в ветвях от действия каждого источника в отдельности.

После исключения ЭДС E_2 получается простое смешанное соединение резистивных элементов (рисунок 30,б), Частный ток $I_{1.1}$ в неразветвлённой части от действия источника ЭДС E_1 определится выражением:

$$I_{1.1} = \frac{E_1}{R_{\text{экв.1}}} = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2}};$$

Токи в двух параллельных ветвях определяются следующим образом:

$$I_{2.1} = \frac{E_1 - R_1 I_{1.1}}{R_2};$$

$$I_{3.1} = \frac{E_1 - R_1 I_{1.1}}{R_3}.$$

Затем исключается ЭДС E_1 (рисунок 30,в) и аналогично рассчитываются частные токи $I_{1.2}, I_{2.2}, I_{3.2}$.

3. По методу наложения токи в ветвях электрической цепи рисунок 30,а определяются следующим образом:

$$I_1 = I_{1.1} + I_{1.2}; \quad I_2 = I_{2.2} + I_{1.2}; \quad I_3 = I_{3.1} + I_{3.2}''.$$

Применяя метод наложения, можно определять частичные токи не отдельно от каждого источника, а от источников, разделённых на группы.

3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе осуществляется проверка выполнимости методов расчёта цепей постоянного тока по методам эквивалентного генератора и наложения.

Объектом исследования является цепь постоянного тока, содержащая линейные элементы резисторы из мини-блоков.

Источником постоянного тока служат два генератора постоянных напряжений из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ: регулируемый генератор (0-15 В) и нерегулируемый (15 В). Оба тумблера на этих генераторах при выполнении работы необходимо установить в верхнее положение. Для получения напряжения более 15 В оба генератора необходимо соединить последовательно. При этом для получения напряжения от 0 до 15 В следует установить тумблер SA1 на источнике 15 В в нижнее положение, а тумблер SA2 на источ-

нике 0-15 В установить в верхнее положение. Для получения напряжения выше 15 В оба тумблера установить в верхнее положение.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Проверка метода эквивалентного генератора

4.1.1 Начертить схему исследуемой цепи, представленную на рисунке 31. Параметры цепи для каждого варианта заданы в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

№ варианта	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	E_3 , В	E_5 , В
1	10	22	33	47	100	150	15	5
2	22	33	47	100	22	10	15	7
3	33	47	100	22	150	22	15	9
4	47	100	22	150	10	33	15	11
5	100	22	150	10	22	47	15	13
6	22	150	10	22	33	100	15	8

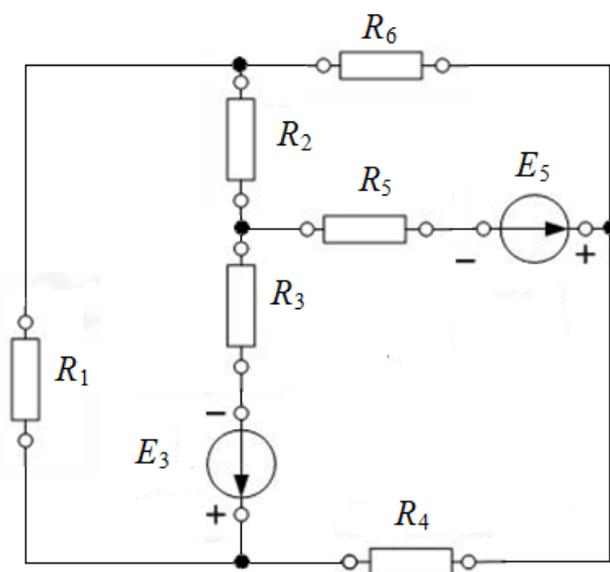


Рисунок 31 – Схема исследуемой цепи

4.1.2 Рассматривая цепь относительно резистора R_1 как активный двухполюсник (эквивалентный генератор), рассчитать его параметры: U_{XX} , R_{BX} , I_{K3} . Для определения U_{XX} предлагается использовать метод контурных токов. Для определения R_{BX} предлагается использовать преобразование элементов «треугольник» в эквивалентную «звезду». Результаты расчётов занести в табли-

цу В.2. Начертить последовательную схему замещения активного двухполюсника. Вычислить значение тока I_1 через R_1 по полученной схеме замещения. Построить вольт-амперную характеристику активного двухполюсника $U_1(I_1)$ при изменении R_1 от 0 до ∞ . Графически определить значение тока I_1 и напряжения U_{R1} при R_1 равном заданному и при $R_1=R_{вн}$.

4.1.3 Определить величину сопротивления R_1 , при которой в нём выделяется максимальная мощность. Вычислить P_{max} . Построить график зависимости $P_1(R_1)$ при изменении R_1 от 0 до ∞ .

4.2 Проверка метода наложения

4.2.1 Для схемы, изображенной на рисунке 31 методом наложения рассчитать ток через сопротивление R_1 . Для этого сначала закоротить источник E_5 и методом эквивалентных преобразований смешанного содинения резисторов, используя замещение схемы элементов «треугольник» в эквивалентную «звезду», рассчитать ток $I_{R1}^{E_3}$ через R_1 от действия источника E_3 . Результаты расчётов занести в таблицу В.4.

4.2.2 Закоротить источник E_3 и методом эквивалентных преобразований рассчитать ток $I_{R1}^{E_5}$ через R_1 от действия источника E_5 . Результаты расчётов занести в табл. В.4.

4.2.3 Вычислить ток через R_1 по методу наложения. Результат занести в таблицу В.4.

5 Экспериментальная часть

5.1 Выбрать необходимые элементы цепи из комплекта стенда согласно варианту, заданному преподавателем (таблица В.1, приложение В)

5.2 Тумблеры SA1, SA2 на источниках напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (рисунок В.2) установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений E_5 согласно таблице В.1 для выбранного варианта.

5.3 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке В.2. В качестве амперметра РА1 использовать мультиметр, установив режим измерения постоянного тока I с диапазоном 200 мА. В качестве вольтметра РV1 использовать второй мультиметр, установив на нём режим измерения постоянного напряжения V-20 В.

5.4 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.5 Включить выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров.

5.6 Отключить резистор R_1 , отсоединив провода от точек a и b , создав режим холостого хода. Измерить напряжение $U_{ХХ}$ холостого хода, равное напряжению эквивалентного генератора. Данные измерений занести в таблицу В.2.

5.7 Закоротить проводом точки a и b , создав режим короткого замыка-

ния. Измерить напряжение I_{K3} короткого замыкания. Данные измерений занести в таблицу В.2.

5.8 По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить внутреннее сопротивление эквивалентного генератора:

$$R_{BH} = U_{XX} / I_{K3}.$$

5.9 Установить в исследуемой цепи вершину резистора R_1 согласно таблице В.1. Измерить амперметром РА1 ток I_1 и сравнить его с вычисленным значением в п. 4.2.

5.10 Изменяя сопротивление R_1 от 0 до ∞ (для 6-8 значений плюс значение, когда $R_1 = R_{BH}$), измерить значения тока I_1 . Результаты занести в таблицу В.3.

5.11 Используя полученные результаты измерений, рассчитать мощность P_1 и занести в таблицу В.3.

5.12 Для схемы, собранной согласно рисунку В.2 замкнуть источник ЭДС E_5 , для чего опустить переключатель SA2 в нижнее положение. Измерить амперметром РА1 ток I_{R1}^{E3} через R_1 . Результат занести в таблицу В.4.

5.13 Вернуть переключатель SA1 в верхнее положение, а переключатель SA2 перевести в нижнее положение, замкнув тем самым ЭДС источника E_3 . Измерить амперметром РА1 ток I_{R1}^{E5} через R_1 . Результат занести в таблицу В.4.

5.14 Вычислить суммарное значение тока от действия обоих источников. Результат I_{R1} занести в таблицу В.4.

5.15 Сравнить значения экспериментальных исследований с результатами аналитических расчётов, выполненных в п.п. 4.2.1-4.2.3.

5.16 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ и блока мультиметров и выключатель QF.

6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи.

6.4 Предварительный расчет цепи для выбранного варианта требуемыми методами.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Вольт-амперная характеристика активного двухполюсника $U_1(I_1)$ и график зависимости $P_1(R_1)$ при изменении R_1 от 0 до ∞ .

6.8 Сравнение полученных экспериментальных значений со значениями рассчитанными в п.п. 4.2.1 и 4.2.2.

7 Контрольные вопросы

7.1 В каких случаях целесообразно использовать метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)?

7.2 Как распределяется общий ток между параллельно соединёнными ветвями?

7.3 В каких случаях источник электрической энергии работает как потребитель?

7.4 Каково внутреннее сопротивление активного двухполюсника, если при подключении по очереди сопротивлений 300 и 1200 Ом оказалось, что выделяющиеся в них мощности одинаковы.

7.5 Напишите формулы для преобразования схемы сопротивлений «треугольник» в эквивалентную «звезду», и наоборот.

7.6 В чём заключается сущность метода наложения?

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С R -, L -, C -ЭЛЕМЕНТАМИ

1 Цель работы

Исследование резонансных явлений и частотных характеристик в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные R -, L -, C -элементы.

2 Основные положения теории

Резонансом напряжений называется явление совпадения начальных фаз мгновенных значений синусоидального напряжения и тока на участке электрической цепи, содержащем последовательно соединенные R -, L -, C -элементы.

В состоянии резонанса напряжений угол сдвига фаз

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0.$$

Справедливы следующие выражения:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 = Z_0 \cos \varphi + jZ_0 \sin \varphi = R_0; \quad I_m(\underline{Z}) = 0; \quad X_0 = 0,$$

где \underline{Z} – полное комплексное сопротивление последовательного R - L - C -контура;
 \underline{Z}_0 – полное комплексное сопротивление последовательного R - L - C -контура при резонансе напряжений;

Z_0 – модуль полного комплексного сопротивления последовательного R - L - C -контура при резонансе напряжений;

X_0 – эквивалентное реактивное сопротивление цепи

В линейной электрической цепи (рисунок 32) режим резонанса напряжений можно получить путём изменения частоты f питающего напряжения $u(t)$ или величин параметров последовательно соединенных R -, L -, C -элементов.

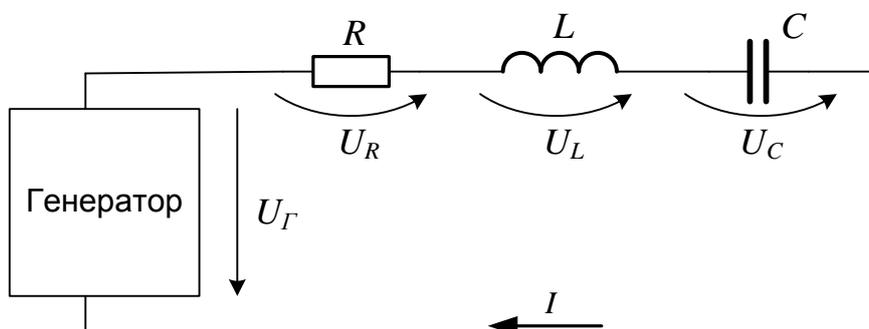


Рисунок 32 – Последовательное соединение R -, L -, C -элементов

На частоте резонанса ω_0 эквивалентное реактивное сопротивление цепи равно нулю

$$X_0 = X_L - X_C = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0, \quad (3.1)$$

где ω_0 – резонансная частота;
 X_L – сопротивление катушки;
 X_C – сопротивление конденсатора;
 L – индуктивность катушки, Гн;
 C – ёмкость конденсатора, Ф.

При этом индуктивное и ёмкостное сопротивление взаимно компенсируются, ток становится максимальным, а фазовый угол – нулевым (то есть ток и приложенное напряжение находятся в фазе). Резонансная частота легко находится из уравнения:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.2)$$

откуда следует:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.3)$$

Величина

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{L/C} = \rho \quad (3.4)$$

имеет размерность сопротивления и носит название *волнового (характеристического) сопротивления контура*.

Резонансные свойства контура характеризует добротность

$$Q = \frac{U_{L0}}{U_{R0}} = \frac{U_{C0}}{U_{R0}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{\rho}{R}. \quad (3.5)$$

При резонансе напряжение на входе контура $U = U_{R0}$. Добротность Q показывает, во сколько раз напряжения на реактивных элементах $U_{L0} = U_{C0}$ отличается от напряжения U . Такой резонанс называют *резонансом напряжений*.

Ток при резонансе достигает наибольшего значения

$$I = I_0 = \frac{U}{R}. \quad (3.6)$$

Зависимости $X(f)$; $X_L(f)$; $X_C(f)$; $Z(f)$ называются *частотными характеристиками* цепи (контура). Они связаны следующими соотношениями:

$$X(f) = X_L(f) - X_C(f);$$

$$Z(f) = \sqrt{R^2 + (X(f))^2} = |R + jx(f)|.$$

Зависимость $\varphi(f) = \arctg(X(f)/R)$ называется *фазочастотной характеристикой* цепи (контура).

Зависимости от частоты действующих значений тока $I(f)$ и напряжений $U_R(f)$, $U_C(f)$, $U_L(f)$ называются *амплитудно-частными характеристиками* (АЧХ).

Диапазон частот, при которых выполняется отношение:

$$\frac{I(f)}{I_0} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X(f))^2}} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

называется *полосой пропускания*. Соотношение (3.7) выполняется точно на частотах f_1 и f_2 , где $|X(f) = R|$. На частоте f_1 меньше f_0 угол сдвига фаз $\varphi(f_1) = -45^\circ$, на частоте f_2 больше f_0 $\varphi(f_1) = +45^\circ$. Частоты f_1 и f_2 называются *нижней и верхней граничной частотой полосы пропускания*. Выполнение условий $\varphi(f_1) = -45^\circ$ и $\varphi(f_1) = +45^\circ$ позволяют экспериментально определить граничные частоты, поэтому полосу пропускания можно определить по фазочастотной характеристике.

Значения граничных частот определяются выражением:

$$f_{1,2} = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} \mp 1). \quad (3.8)$$

Избирательные частотные свойства контура характеризуются полосой пропускания:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q}. \quad (3.9)$$

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является однофазная цепь переменного тока, состоящая из последовательно соединенных резистора, индуктивности и конденсатора, подключенная к источнику синусоидального напряжения.

Источником синусоидального напряжения в лабораторной работе является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из миниблоков резисторов, индуктивностей и ёмкостей.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 33, параметры которой заданы в таблице 3.1, определить по выражению (3.1) частоту f_0 , при которой в цепи наступит резонанс напряжений.

4.2 Рассчитать комплексным методом действующие значения тока и напряжений на ёмкости и на индуктивности при резонансе, а также активную мощность цепи. Действующее значение напряжения на выходе генератора принять равным 7 В.

4.3 По формулам (3.2-3.3), (3.8-3.9) рассчитать характеристическое сопротивление и добротность $R-L-C$ контура, а также полосу пропускания и граничные частоты при резонансе.

4.4 Результаты расчёта записать в таблицу Г.1 протокола испытаний.

Таблица 3.1 – Исходные данные

№ варианта	R , Ом	L , мГн	R_K , Ом	C , мкФ
1	100	100	190,9	1
2	100	40	73,4	1
3	100	100	190,9	0.1
4	100	10	17,6	0.47
5	100	40	73,4	0.47
6	100	100	190,9	0.22
7	100	40	73,4	0.22

5 Экспериментальная часть

5.1 Выбрать R -, L -, C -элементы цепи из числа комплектующих стенда, согласно варианту, заданному преподавателем (таблица 3.1).

5.2 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.1. В качестве амперметра РА использовать мультиметр, установив режим измерения переменного тока I с диапазоном 200 мА. В качестве вольтметров PV1, PV2 использовать второй и третий мультиметр, установив на них режим измерения переменного напряжения $V-20$ В.

5.3 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (лаборанту).

5.4 Включить автоматический выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Регулятором «Частота» установить на выходе модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР частоту f_0 . Регулятором «Амплитуда» установить величину действующего значения напряжения U_T равную 7 В. Напряжение U поддерживать в работе неизменным, контролируя его значение вольтметром PV2 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.5 Изменяя частоту f_0 в меньшую и большую стороны от величины, рассчитанной аналитически в п. 4.1, определить по показаниям амперметра РА БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ её экспериментальное значение $f_{0,эксп}$ и записать в таблицу Г.2.

5.6 При значении частоты на выходе модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР равной $f_{0,эксп}$ измерить амперметром РА и вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений: тока I_0 , напряжений U_K , U_C и U_R . Измеренные значения записать в таблицу Г.2.

5.7 Уменьшая частоту, определить нижнюю граничную частоту f_1 полосы пропускания. Измерить на частоте f_1 амперметром РА и вольтметром PV1

БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений тока I , напряжений U_K , U_C и U_R , и записать в таблицу Г.2.

5.8 Увеличивая частоту, определить частоту верхнюю граничную частоту f_2 полосы пропускания. Измерить на частоте f_2 амперметром РА и вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений тока I , напряжений U_K , U_C и U_R . Измеренные значения записать в таблицу Г.2.

5.9 Изменяя частоту в пределах от $f < f_0$ до $f > f_0$ измерить амперметра РА и вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ на катушке, конденсаторе и резисторе величины действующих значений тока I , напряжений U_K , U_C и U_R . Измеренные значения занести в таблицу Г.2. Напряжение U_G на выходе генератора поддерживать неизменным, контролируя его значение вольтметром PV2 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.10 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР и автоматический выключатель QF модуля питания.

5.11 По данным таблицы Г.2 протокола измерений в относительных единицах частоты $\nu = f/f_0$ рассчитать и построить графики: $[U_R(f)/U_G] - f(\nu)$; $[U_K(f)/U_G] - f(\nu)$; $[U_C(f)/U_G] - f(\nu)$; $[I(f)/I_0] - f(\nu)$. Результаты расчёта записать в таблицу Г.3. Из графиков определить добротность Q , граничные частоты f_2 и f_1 и полосу пропускания Δf .

5.12 По данным таблицы Г.3 рассчитать и построить частотные характеристики: $Z(f) = U_G/I(f)$, $X_K(f) = U_K(f)/I(f)$, $X_C(f) = U_C(f)/I(f)$, $X(f) = X_K(f) - X_C(f)$. Результаты расчёта записать в таблицу Г.4.

5.13 Построить векторные диаграммы тока и напряжения цепи для значений частоты f_1 , f_0 и f_2 методом засечек, используя циркуль.

6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Графические зависимости $[U_R(f)/U_G] - f(\nu)$; $[U_L(f)/U_G] - f(\nu)$; $[U_C(f)/U_G] - f(\nu)$; $[I(f)/I_0] - f(\nu)$; $Z(f) = U_G/I(f)$; $X_K(f) = U_K(f)/I(f)$; $X_C(f) = U_C(f)/I(f)$; $X(f) = X_K(f) - X_C(f)$.

6.8 Векторные диаграммы тока и напряжения цепи для значений частот: f_1 , f_0 и f_2 .

6.9 Сравнение полученных экспериментальных значений со значениями, рассчитанными в п.п. 4.1-4.3.

7 Контрольные вопросы

7.1 Какие методы расчёта электрических цепей синусоидального тока Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.

7.2 Какими параметрами характеризуются синусоидальные токи и напряжения?

7.3 Как в общем случае ($X_i \neq 0$) определить активную и реактивную составляющие тока в последовательной $R-L-C$ -цепи?

7.4 Существуют ли физически в последовательной $R-L-C$ -цепи активный и реактивный токи?

7.5 В каком случае реактивное сопротивление $R-L-C$ -цепи и сдвиг фаз между током и напряжением имеют отрицательные знаки?

7.6 Как изменится векторная диаграмма, если частоту f увеличить (уменьшить) в два раза?

7.7 Как рассчитать цепь, если в ней кроме резистора последовательно включены два конденсатора и две катушки индуктивности?

7.8 Как определяется полоса пропускания последовательного резонансного контура?

7.9 Как изменить добротность последовательного резонансного контура в n раз (например, уменьшить в 3 раза)?

7.10 Как измерить активное и индуктивное сопротивления катушки, используя режим резонанса напряжений?

7.11 Какой характер имеет полное сопротивление последовательной $R-L-C$ -цепи при резонансе?

7.12 Изобразите схему электрической цепи, содержащую пять последовательно соединённых элементов, в которой при напряжении на входе $U=100$ В действующие значения напряжений на каждом из её пяти элементов также равны 100 В. Объясните данное равенство напряжений.

7.13 Цепь с последовательно соединёнными r и L находится под действием синусоидального напряжения. Изменится ли активная мощность в цепи (если да, то как) при увеличении частоты?

7.14 Объясните характер энергетических процессов в последовательном резонансном контуре.

7.15 Приведите примеры практического применения резонанса в электрических цепях.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С R -, L -, C -ЭЛЕМЕНТАМИ

1 Цель работы

Исследование резонансных явлений и частотных характеристик электрической цепи, содержащей параллельно соединенные R -, L -, C -элементы.

2 Основные положения теории

Расчёт разветвлённых цепей синусоидального тока в установившихся режимах работы ведут с помощью комплексных функций и представляют их в виде векторных диаграмм на комплексной плоскости (комплексный метод).

Методы расчёта цепей постоянного тока (посредством законов Кирхгофа, методами узловых напряжений, контурных токов, наложения, преобразования схем) справедливы и для расчёта цепей синусоидального тока. При этом синусоидально изменяющиеся величины (ЭДС, напряжение и ток) представляют в виде комплексных чисел, которые, в свою очередь, изображают в виде радиус-векторов на комплексной плоскости. При этом алгебраические действия над синусоидальными величинами заменяют действиями над комплексными числами или над радиус-векторами. Сопротивления в цепях синусоидального тока также представляют в виде комплексных чисел: полное комплексное сопротивление двухполюсника для гармонического сигнала называется *импеданс*, а полная комплексная проводимость – *адмиттанс*. Кроме того, вводятся понятия полной и комплексной мощности, тогда все законы и баланс мощности будут справедливы для цепей синусоидального тока в комплексной форме.

Если к цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора (рисунок 33,*а*) приложить переменное синусоидальное напряжение, то одно и то же напряжение будет приложено к обоим элементам цепи.

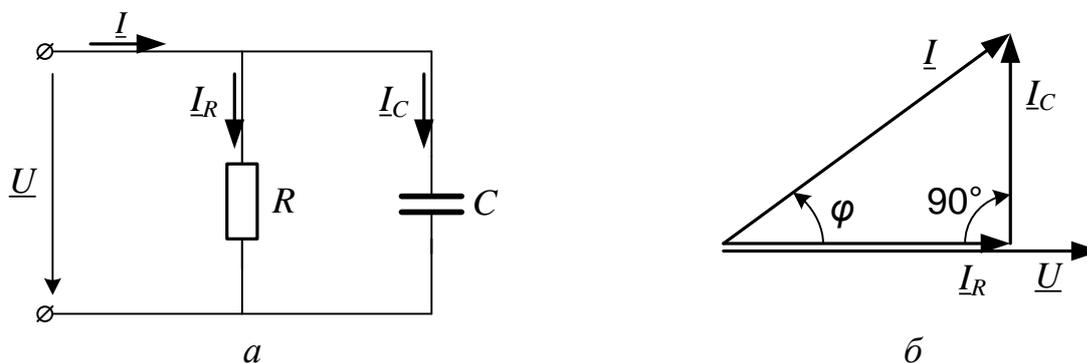


Рисунок 33 – Параллельное соединение R - и C -элементов:
а – схема цепи; *б* – векторная диаграмма токов и напряжения

Общий ток I цепи разветвляется на ток I_C через конденсатор (ёмкостная составляющая общего тока) и ток I_R – через резистор (активная составляющая).

Между токами \underline{I} , \underline{I}_C и \underline{I}_R существуют фазовые сдвиги, обусловленные ёмкостным реактивным сопротивлением X_C конденсатора. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рисунок 33, б).

Фазовый сдвиг между напряжением \underline{U} цепи и током \underline{I}_R через резистор отсутствует, тогда как между этим напряжением и током \underline{I}_C через конденсатор он равен $+90^\circ$ (т.е. ток опережает напряжение на 90°). При этом сдвиг фаз между полным током \underline{I} и напряжением \underline{U} цепи определяется соотношением между проводимостями b_C и g . Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рисунок 34).

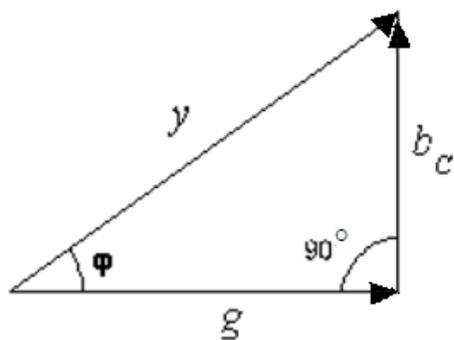


Рисунок 34 – Диаграмма проводимостей для параллельного соединения R- и C-элементов

В треугольнике проводимостей $g=1/R$, $b_C=1/X_C$, а $y=1/Z$ представляет собой так называемую полную проводимость цепи, тогда как g – активная, b_C – реактивная (ёмкостная) проводимости (измеряются в сименсах (См)).

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений токов в параллельных ветвях невозможно; оно возможно в векторной форме $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C$.

Расчет ведется по следующим формулам, вытекающим из векторной диаграммы и треугольника проводимостей.

Действующие значения полного тока цепи, активной и ёмкостной составляющих соответственно:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}; \quad I = \frac{U}{z} = Uy; \quad I_R = Ug; \quad I_C = Ub_C.$$

Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b_C^2}, \quad y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z},$$

где Z – полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз между током и напряжением определится из выражения:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{I_C}{I_R}\right) = \arctg\left(\frac{b_C}{g}\right).$$

Активная и реактивная проводимости соответственно будут равны:

$$g = y \cos \varphi; \quad b_C = y \sin \varphi.$$

Если к цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности (рисунок 4.3, *a*) приложить переменное синусоидальное напряжение, то одно и то же напряжение будет приложено к обоим элементам цепи.

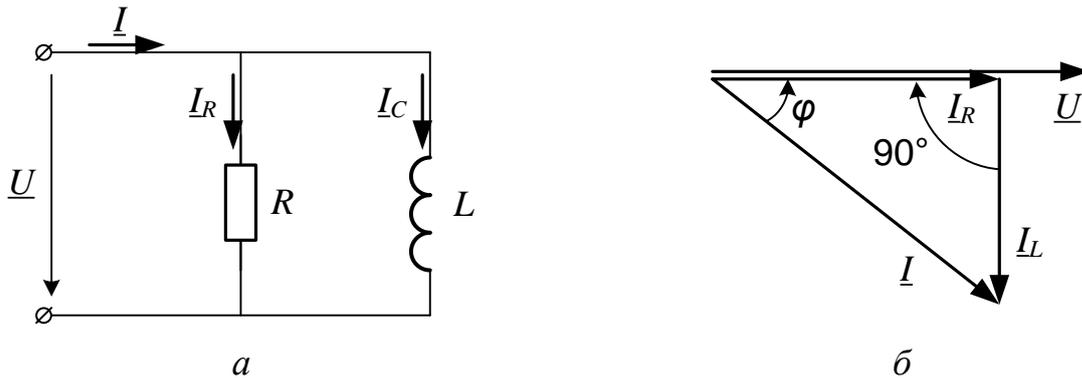


Рисунок 35 – Параллельное соединение R - и L -элементов:
a – схема цепи; *б* – векторная диаграмма напряжения и токов

Общий ток цепи разветвляется на ток через катушку (индуктивная составляющая общего тока) и ток – через резистор (активная составляющая).

Между токами I , I_L и I_R существуют фазовые сдвиги, обусловленные индуктивным реактивным сопротивлением x_L катушки. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рисунок 35, *б*). Фазовый сдвиг между напряжением цепи U и током через резистор I_R отсутствует, тогда как ток в катушке I_L всегда отстает от напряжения цепи U (или тока через резистор) на 90° . При этом сдвиг фаз между полным током I и напряжением цепи U определяется соотношением между проводимостями b_L и g (угол отрицательный).

Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рисунок 36), в котором y представляет собой так называемую полную проводимость цепи, g – активную, а b_L – реактивную индуктивную проводимости.

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений токов в параллельных ветвях, как в параллельной чисто резистивной цепи, невозможно. Оно возможно только в векторной форме:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L.$$

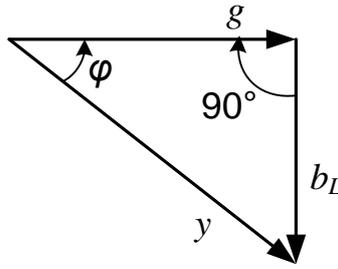


Рисунок 36 – Диаграмма проводимостей параллельного соединения R - и L -элементов

Расчёт ведется по следующим формулам.

Действующие значения полного тока цепи, активной и индуктивной составляющих соответственно:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}; \quad I = \frac{U}{z} = U \cdot y; \quad I_R = U \cdot g; \quad I_L = U \cdot b_L.$$

Полная проводимость цепи определится из выражения:

$$y = \sqrt{g^2 + b_L^2}; \quad y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi = -\arctg\left(\frac{I_L}{I_R}\right) = -\arctg\left(\frac{b_L}{g}\right).$$

Активная и реактивная проводимости $g = y \cos \varphi$, $b_L = y \sin \varphi$.

Если к цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности параллельно подключить еще и конденсатор (рисунок 37, а), то одно и то же переменное синусоидальное напряжение будет приложено к трём компонентам цепи. Токи в ветвях такой цепи будут пропорциональны проводимостям ветвей. Такая цепь получила название *параллельный резонансный контур*.

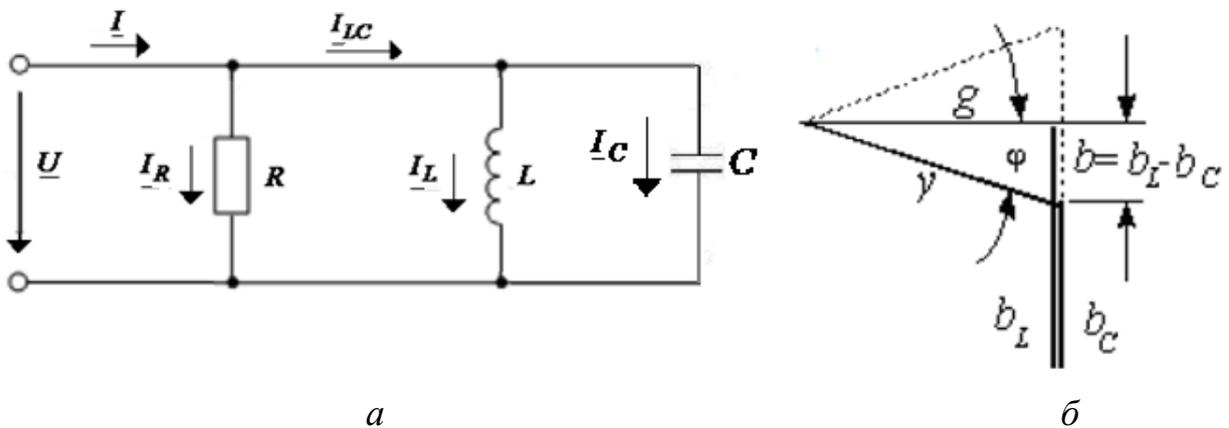


Рисунок 37 – Параллельный резонансный R -, L -, C -контур: а – схема цепи; б – векторные диаграммы проводимостей

В параллельном резонансном контуре активная проводимость не зависит от частоты, а индуктивная, ёмкостная и реактивная проводимости изменяются в соответствии со следующими выражениями (рисунок 37, б):

$$b_L(\omega) = \frac{1}{\omega L}; \quad b_C(\omega) = \omega C; \quad b(\omega) = b_L(\omega) - b_C(\omega).$$

Общий ток цепи I разветвляется на ток через конденсатор I_C (ёмкостная составляющая общего тока), ток I_L – через катушку индуктивности (индуктивная составляющая общего тока), ток I_R – через резистор (активная составляющая), причем ток I_L отстает от напряжения U на 90° , а ток I_C опережает его на 90° (рисунки 33, б и 35, б). Токи I_C и I_L имеют противоположные фазы (различаются на 180°), в зависимости от их величин уравнивают друг друга полностью или частично. Когда $I_C = I_L$, имеет место резонанс токов.

Резонансом токов называется явление совпадения начальных фаз мгновенных значений синусоидального напряжения и тока на участке электрической цепи, содержащем параллельно соединенные R -, L -, C -элементы.

В состоянии резонанса напряжений угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$.

При резонансе токов реактивная проводимость цепи $b = b_L - b_C$ равна нулю. Резонансная частота определяется из уравнения:

$$\frac{1}{\omega_0 L} - \omega_0 C = 0,$$

откуда так же, как и при резонансе напряжений следуют выражения:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Полная проводимость при резонансе токов оказывается равной активной проводимости. Поэтому ток I в неразветвленной части цепи имеет минимальное значение, тогда как токи I_L и I_C могут превышать его в несколько раз.

При резонансной частоте справедливы выражения:

$$b_L(\omega_0) = b_C(\omega_0) = \sqrt{\frac{C}{L}} = \gamma.$$

Эта проводимость называется *характеристической проводимостью* резонансного контура, а отношение

$$I_L / I = I_C / I = U\gamma / Ug = Q.$$

так же, как и в последовательном контуре, называется *добротностью*. Если $Q > 1$, то при резонансе токов $I_L(\omega_0)$ и $I_C(\omega_0)$ превышают ток I источника в Q раз.

При изменении частоты и неизменном приложенном напряжении токи изменяются пропорционально соответствующим проводимостям:

$$I(\omega) = Uy(\omega); \quad I_L(\omega) = \frac{U}{\omega L}; \quad I_C(\omega) = U\omega C; \quad I_{LC} = Ub(\omega).$$

При резонансной частоте $\omega = \omega_0$ ток I , потребляемый от источника, имеет минимальное значение и равен току I_R в активном сопротивлении, а ток на реактивном участке цепи I_{LC} равен нулю. Такая схема называется фильтр-пробка. Угол сдвига фаз изменяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = -\arctg\left[\left(\frac{1}{\omega L - \omega C}\right) / g\right].$$

При $\omega < \omega_0$ цепь носит индуктивный характер (ток отстаёт от напряжения на угол φ), при $\omega = \omega_0$ – активный, а при $\omega > \omega_0$ – ёмкостный (ток опережает напряжение на угол φ).

В лабораторной работе исследуется цепь со схемой замещения, изображенной на рисунке 38.

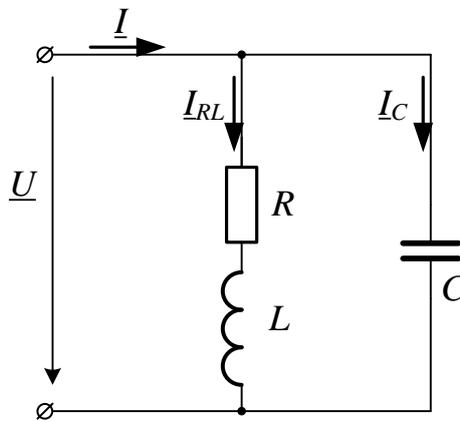


Рисунок 38 – Исследуемая цепь переменного тока, содержащая параллельный резонансный R - L - C -контур

Комплексная проводимость цепи определится из выражения:

$$\underline{Y} = \frac{1}{R_K + j\omega L} + j\omega C = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L - \omega C(R_K^2 + (\omega L)^2)}{R_K^2 + (\omega L)^2} = G - jB.$$

На частоте резонанса ω_0 эквивалентная реактивная проводимость цепи $B_0 = 0$. Отсюда следует:

$$L - C(R_K^2 + (\omega L)^2) = 0 \text{ или } (\omega_0 L)^2 = \rho^2 - R_K^2,$$

где ρ – волновое сопротивление контура, определяемое из выражения:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.1)$$

Тогда резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}} \text{ или } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}} \quad (4.2)$$

При резонансе комплексная проводимость

$$\underline{Y} = Y_0 = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2}.$$

Реактивное сопротивление контура

$$\omega_0 L = \sqrt{\rho^2 - R_K^2}.$$

Тогда, учитывая, что

$$Y_0 = G_0 = \frac{R_K}{\rho^2},$$

ток при резонансе будет равен:

$$I_0 = UG_0 = U \frac{R_K}{\rho^2}. \quad (4.3)$$

Реактивные проводимости катушки и конденсатора, определяемые соответственно выражениями:

$$b_{RL0} = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{\rho^2} \quad \text{и} \quad b_{C0} = \omega_0 C = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{\rho^2}$$

будут равны.

Тогда реактивные составляющие токов в ветвях катушки и конденсатора I_{RL0} и I_{C0} также будут равны:

$$I_{RL0} = I_{C0} = U b_{C0} = U \sqrt{\rho^2 - \frac{R_K^2}{\rho^2}}. \quad (4.4)$$

При выполнении условия $\rho > R_K$ реактивные токи могут существенно превышать ток $I_0 = UG_0$, и в цепи возникает резонанс токов.

Добротность контура определится выражением:

$$Q = \frac{I_{C0}}{I_{G0}} = \frac{b_{RL0}}{G_0} = \frac{b_{C0}}{G_0} = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{R_K}. \quad (4.5)$$

Зависимости проводимостей: $G(f)$; $b(f)$; $G_{RL}(f)$; $b_{RL}(f)$;

$$Y(f) = \sqrt{[G(f)]^2 + [b(f)]^2}; \quad Y_{RL}(f) = \sqrt{[G_{RL}(f)]^2 + [b_{RL}(f)]^2}; \quad Y_C(f) = b_C(f);$$

угол сдвига фаз $\varphi(f) = \arctg\left[\frac{b(f)}{G(f)}\right]$ называют *частотными характеристиками*

цепи.

Зависимости от частоты действующих значений токов: $I(f)$; $I_{RL}(f)$; $I_C(f)$ называют *резонансными характеристиками* цепи.

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является однофазная цепь переменного тока, состоящая из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора, подключенная к источнику синусоидального напряжения.

Источником синусоидального напряжения является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Пассивные элементы электрической цепи выбираются из комплекта элементов лабораторного стенда: резисторов, индуктивностей и ёмкостей.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 38, параметры которой заданы в таблице 4.1, определить по выражению (4.2) резонансную частоту f_0 .

4.2 Рассчитать комплексным методом, используя выражения (4.3; 4.4) действующие значения токов: в неразветвленной части цепи I_0 ; через катушку индуктивности I_{RL0} и ёмкость I_{C0} при резонансе токов, а также активную мощность цепи. Действующее значение напряжения на выходе генератора принять равным 7 В.

4.3 По формулам (4.1) и (4.5) рассчитать волновое сопротивление и добротность контура.

4.4 Результаты расчёта записать в таблицу Д.2 протокола испытаний.

Таблица 4.1 – Исходные данные

№ варианта	R_K , Ом	L , мГн	C , мкФ
1	73,4	40	1
2	190,9	100	0,22
3	190,9	100	0,1
4	73,4	40	0,47
5	73,4	40	0,1
6	17,6	10	0,22
7	17,6	10	1
8	73,4	40	0,22

5 Экспериментальная часть

5.1 Измерить мультиметром активное сопротивление R_K катушки индуктивности и записать эти значения в протокол измерений.

5.2 Выбрать L -, C -элементы цепи из числа комплекта лабораторного стен-

да, согласно варианту заданному преподавателем (таблице 4.1).

5.3 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Д.1. В качестве амперметров РА1, РА2, РА3 взять мультиметры, установив режим измерения переменного тока – I с диапазоном 200 мА. В качестве вольтметра PV1 использовать один из мультиметров, установив в нём режим измерения переменного напряжения – V-20 В.

5.4 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю.

5.5 Включить автоматический выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Регулятором «Частота» установить на выходе модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР частоту f_0 . Регулятором «Амплитуда» установить величину действующего значения напряжения $U_T = 7$ В. Напряжение U поддерживать в работе неизменным, контролируя его значение вольтметром PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.6 Убедиться, что на частотах $0,2 f_0$ и $2 f_0$ токовая защита модуля не срабатывает.

5.7 Изменяя частоту f_0 в меньшую и большую стороны от её величины аналитически рассчитанной в п. 4.1, определить по показаниям амперметра РА БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ её экспериментальное значение. Величину $f_{0,эксп}$ записать в таблицу Д.2.

5.8 Выполнить измерения для указанных в таблице Д.2 относительных частот $\nu = \frac{f_i}{f_{0,эксп}}$ ($f_{0,эксп}$ – частота резонанса в эксперименте), действующих значений тока I в неразветвленной части цепи и токов через катушку индуктивности I_{RL} и через ёмкость I_C . Измеренные значения записать в таблицу Д.2.

5.9 Протокол измерений утвердить у преподавателя.

5.10 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР и автоматический выключатель QF модуля питания.

5.11 По данным таблицы Д.2 протокола измерений в относительных единицах частоты $\nu = \frac{f_i}{f_{0,эксп}}$ рассчитать и построить графики экспериментальных значений токов в ветвях $I(\nu)$, $I_{RL}(\nu)$, $I_C(\nu)$. Зависимости строить на одном рисунке в одной плоскости.

5.12 По построенным (п. 5.11) графикам определить добротность Q контура и сравнить её значение со значением, рассчитанным аналитически по параметрам цепи.

5.13 По полученным в п. 5.11 результатам построить в выбранном масштабах векторные диаграммы токов и напряжения при резонансной частоте.

6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схема электрической цепи.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Графики зависимостей $I(v)$, $I_{RL}(v)$, $I_C(v)$.

6.8 Векторные диаграммы токов и напряжения цепи для резонансной частоты.

6.9 Сравнение полученных экспериментальных значений со значениями, рассчитанными в п. 4.1- 4.3.

7 Контрольные вопросы

7.1 Какие методы расчёта разветвленных электрических цепей синусоидального тока Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.

7.2 Запишите законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме.

7.3 При каких условиях возникает резонанс токов?

7.4 Как экспериментально определить режимы резонанса токов и напряжений?

7.5 В схеме, подключенной к синусоидальному напряжению, последовательно-параллельно включены L и RC , причем действующие значения напряжений на входе цепи и на каждом из её элементов равны. Постройте на комплексной плоскости все токи и напряжения и определите сдвиг фаз между напряжениями \underline{U}_L и \underline{U}_{RC} .

7.6 Что такое характеристическая проводимость? Каков её физический смысл?

7.7 Что такое добротность резонансного контура? Какие физические процессы она характеризует? Как её можно определить экспериментально?

7.8 Какой характер имеет полная проводимость параллельной $R-L-C$ -цепи при резонансе?

7.9 Что называется амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками резонансного контура?

7.10 Что такое коэффициент мощности ($\cos \varphi$) и коэффициент реактивной мощности?

7.11 Зачем нужно увеличивать $\cos \varphi$ в электроэнергетических цепях?

7.12 Какие процессы характеризуют активная и реактивная мощности?

7.13 Какие энергетические процессы происходят в параллельном колебательном контуре?

7.14 Могут ли быть отрицательными: активная мощность, реактивная мощность, полная мощность, комплексная мощность? Приведите примеры.

7.15 В чём заключается смысл баланса мощностей в цепях синусоидального тока?

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

1 Цели работы

1.1 Экспериментальное определение величины взаимной индуктивности M двух индуктивно связанных катушек.

1.2 Экспериментальная проверка соотношений параметров, справедливых для индуктивно связанных катушек.

2 Основные положения теории

Рассмотрим две катушки, которые намотаны в виде тонких колец большого диаметра с числом витков w_1 и w_2 . При указанной форме катушек с большой степенью точности можно считать, что витки каждой катушки сцепляются с одинаковым магнитным потоком. Пусть в первой катушке протекает ток i_1 , тогда: $\Psi_{11} = w_1\Phi_{11}$ – *собственное потокосцепление* первой катушки (Φ_{11} – магнитный поток в одном витке); Ψ_{12} – *потокосцепление взаимной индукции* – часть потокосцепления Ψ_{11} , сцепленная с витками второй катушки. Потокосцепление Ψ_{12} создано током первой катушки, в свою очередь, пронизывает витки второй катушки. Пусть во второй катушке протекает ток i_2 , тогда: $\Psi_{22} = w_2\Phi_{22}$ – *собственное потокосцепление* второй катушки; Ψ_{21} – *потокосцепление взаимной индукции* (создано током второй катушки, пронизывает витки первой катушки) (рисунок 39, а).

В таком случае катушки являются *индуктивно-связанными элементами* (рисунок 39, б).

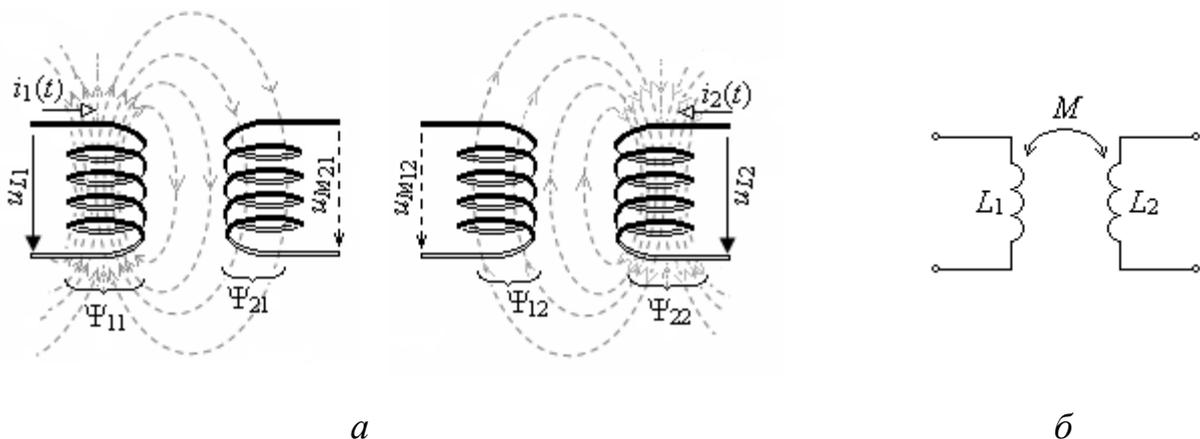


Рисунок 39 – Индуктивно связанные катушки:
а – потокосцепления катушек; б – схема замещения
индуктивно связанных катушек

Для характеристики индуктивной связи вводят параметр $M = M_{12} = M_{21}$ – *взаимная индуктивность*, измеряемая в Генри (Гн).

Знак собственной индуктивности

$$L_1 = \frac{\Psi_{11}}{i_1} = w_1 \frac{\Phi_{11}}{i_1} \text{ или } L_2 = \frac{\Psi_{22}}{i_2} = w_2 \frac{\Phi_{22}}{i_2}$$

всегда положителен, т.к. направление тока и магнитного потока самоиндукции всегда согласованы по правилу правого винта.

Взаимная индуктивность определяется выражением:

$$M = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{\Psi_{21}}{i_2},$$

где Ψ_{12} – потокосцепление второго элемента, создаваемое током i_1 ;

Ψ_{21} – потокосцепление первого элемента, создаваемое током i_2 .

Примем знак взаимной индуктивности также положительным. ЭДС взаимной индукции во второй катушке, вызванное изменением тока в первой катушке, компенсируется напряжением взаимной индукции:

$$u_{M21} = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt},$$

которое появляется на зажимах второй катушки.

Аналогично появляется напряжение взаимной индукции на зажимах первой катушки:

$$u_{M12} = \frac{d\Psi_{12}}{dt} = M_{12} \frac{di_2}{dt},$$

вызванное изменением тока в первой катушке.

Таким образом, напряжение (ЭДС) каждой катушки определяется алгебраической суммой напряжения (ЭДС) самоиндукции и напряжения (ЭДС) взаимной индукции.

Для определения направления напряжения (ЭДС) взаимной индукции, т.е. знака, с которым это напряжение будет входить в алгебраическую сумму напряжения на катушке, размечают зажимы индуктивно связанных элементов цепи значками «*» или «•»).

Направление напряжения взаимной индукции U_M связано с направлением тока, который вызывает это напряжение. Назовем зажим, через который ток входит в первую катушку L_1 «началом» этой катушки и отметим точкой «•» (рисунок 40). Тогда напряжение на второй катушке L_2 также будет направлено от её «начала» к её «концу». Чтобы найти начало первой катушки L_1 нужно сравнить направление напряжения в ней с направлением напряжения во второй катушке L_2 .

Для этого соединяют между собой два зажима катушек L_1 и L_2 и измеряют напряжения U_L , U_M , U_{LM} . Если окажется, что $U_{LM} = U_L + U_M$, то это означает, что конец первой катушки L_1 присоединен к началу второй катушки L_2 . Если же $U_{LM} = U_L - U_M$, то катушки соединены своими концами.

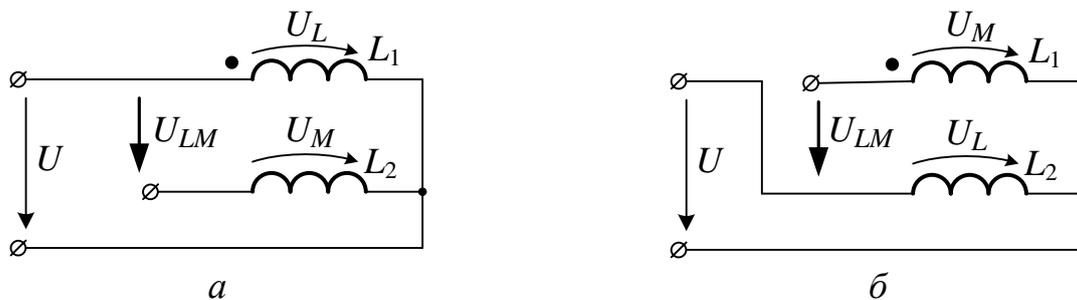


Рисунок 40 – Схема определения условных начал и концов катушек индуктивностей

Если на принципиальной электрической схеме токи ориентированы одинаково относительно одноимённых зажимов катушек, то это согласное включение катушек (рисунок 41, а), иначе – встречное (рисунок 41, б).

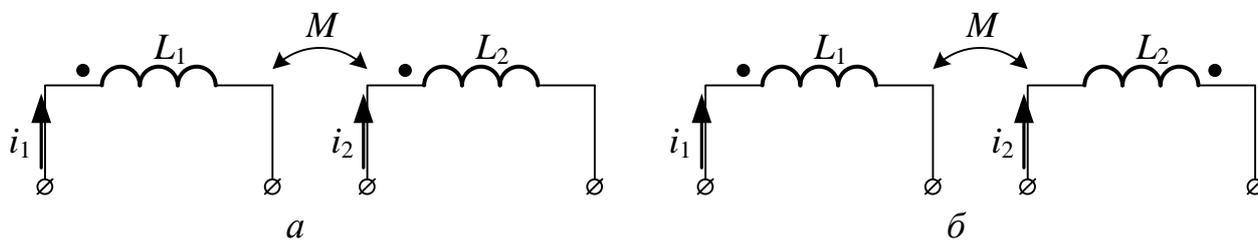


Рисунок 41 – Схемы замещения индуктивно связанных катушек:
а – согласное включение; б – встречное включение

Направление ЭДС взаимной индукции повторяет направление токов относительно одноимённых зажимов.

Используя комплексный метод расчёта, определяют *сопротивление взаимной индукции* для заданной частоты $X_M = \omega M$ и *комплексное сопротивление взаимной индукции* $jX_M = j\omega M$. Комплексное напряжение взаимной индукции на комплексной плоскости перпендикулярно комплексному току, изменение которого вызывает его появление.

Напряжение взаимной индукции в первой катушке от второго тока можно определить из выражения:

$$\underline{U}_{M12} = j\omega M_{12} \underline{I}_2 = jX_{M12} \underline{I}_2.$$

Напряжение взаимной индукции во второй катушке от первого тока аналогично определится выражением:

$$\underline{U}_{M21} = j\omega M_{21} \underline{I}_1 = jX_{M21} \underline{I}_1.$$

При этом

$$M = M_{12} = M_{21} \quad \text{и} \quad X_{M21} = X_{M12} = X_M = \omega M.$$

Коэффициент связи определяют из следующего выражения:

$$k_{св}^2 = \frac{M_{12}M_{21}}{L_1L_2} \quad \text{или} \quad k_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} = \frac{X_M}{\sqrt{X_{L1}X_{L2}}}.$$

Рассмотрим *согласное включение* последовательно соединенных индуктивно связанных неидеальных катушек. Напряжение на катушках имеет следующие составляющие (рисунок 42):

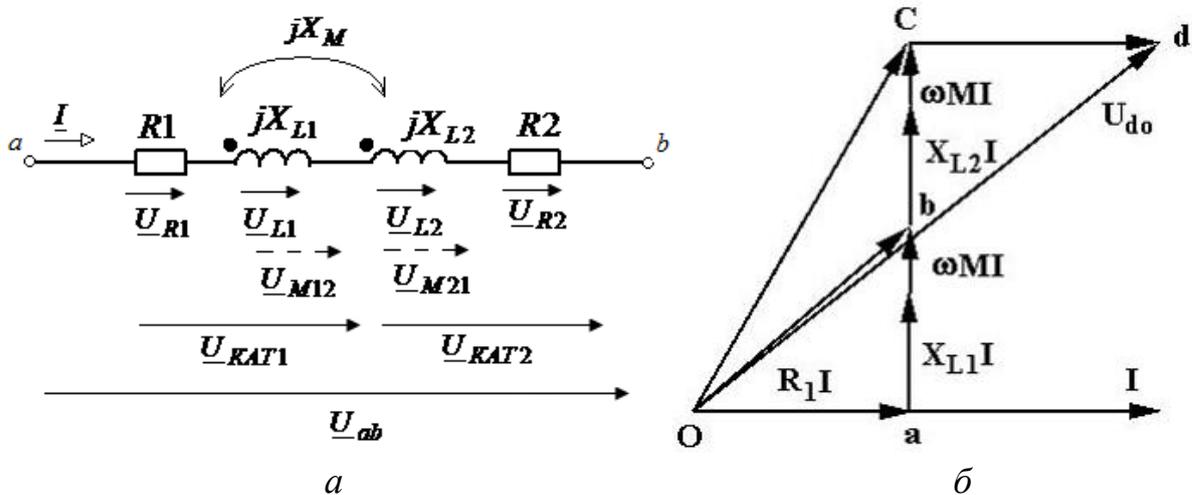


Рисунок 42 – Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при согласном включении индуктивно связанных катушек

При согласном включении:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{кам1} + \underline{U}_{кам2}.$$

В свою очередь, напряжения на катушках с учётом закона Ома:

$$\underline{U}_{кам1} = (R_1 + jX_{L1} + jX_M) \underline{I}; \quad \underline{U}_{кам2} = (R_2 + jX_{L2} + jX_M) \underline{I}.$$

Тогда выражение для напряжения на зажимах а и б вид:

$$\underline{U}_{ab} = (R_1 + jX_{L1} + jX_M) \underline{I} + (R_2 + jX_{L2} + jX_M) \underline{I}.$$

Значит, при согласном включении выражение для комплексного сопротивления участка *ab* будет иметь следующий вид:

$$\underline{Z}_{согл} = R_1 + jX_{L1} + R_2 + jX_{L2} + 2jX_M = Z_{согл} \angle \varphi_{согл}.$$

При *встречном включении* последовательно соединенных катушек (рисунок 43) напряжения само- и взаимной индукции вычитаются.

Напряжение на зажимах *ab* при встречном включении определится следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{ab} = U_{кам1} + U_{кам2} &= (R_1 + jX_{L1} - jX_M) \underline{I} + (R_2 + jX_{L2} - jX_M) \underline{I} = \\ &= (R_1 + jX_{L1} - jX_M + R_2 + jX_{L2} - jX_M) \underline{I}. \end{aligned}$$

Комплексное сопротивление участка *ab* определится из выражений:

- при согласном включении:

$$\underline{Z}_{согл} = R_1 + jX_{L1} + R_2 + jX_{L2} + 2jX_M = Z_{согл} \angle \varphi_{согл};$$

- при встречном включении:

$$\underline{Z}_{встр} = R_1 + jX_{L1} + R_2 + jX_{L2} - 2jX_M = Z_{встр} \angle \varphi_{встр}.$$

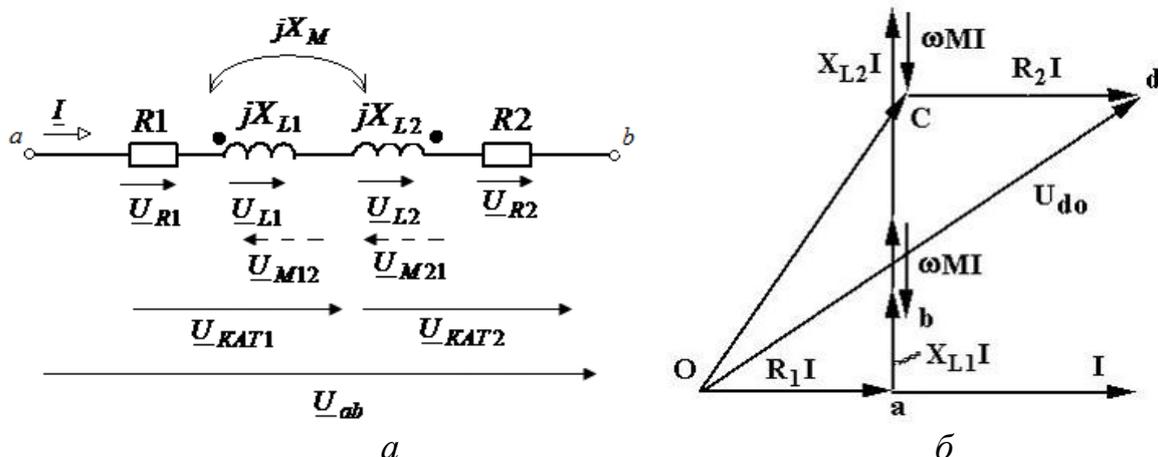


Рисунок 43 – Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при встречном включении индуктивно связанных катушек

Так как $Z_{согл} > Z_{встр}$, то при одинаковом напряжении источника ток в цепи при согласном включении катушек меньше, чем при встречном. Этот факт используют при экспериментальном определении одноименных зажимов индуктивно связанных катушек.

Проделав согласное и встречное включения при последовательном соединении элементов, можно определить взаимную индуктивность M :

$$M = \frac{X_{согл} - X_{встр}}{4\omega},$$

где $X_{согл}$ и $X_{встр}$ – реактивное сопротивление цепи при согласном и встречном включении, соответственно.

Напряжение на отдельной катушке вычисляется по формуле:

$$U_{кат} = \sqrt{(R_k^2 + (X_k \pm X_M)^2)}.$$

2.1 Расчёт цепей со смешанным соединением элементов

При параллельном согласном включении катушек рисунок 44. можно составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{U} &= \underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2; \\ \underline{U} &= \underline{I}_2 R_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

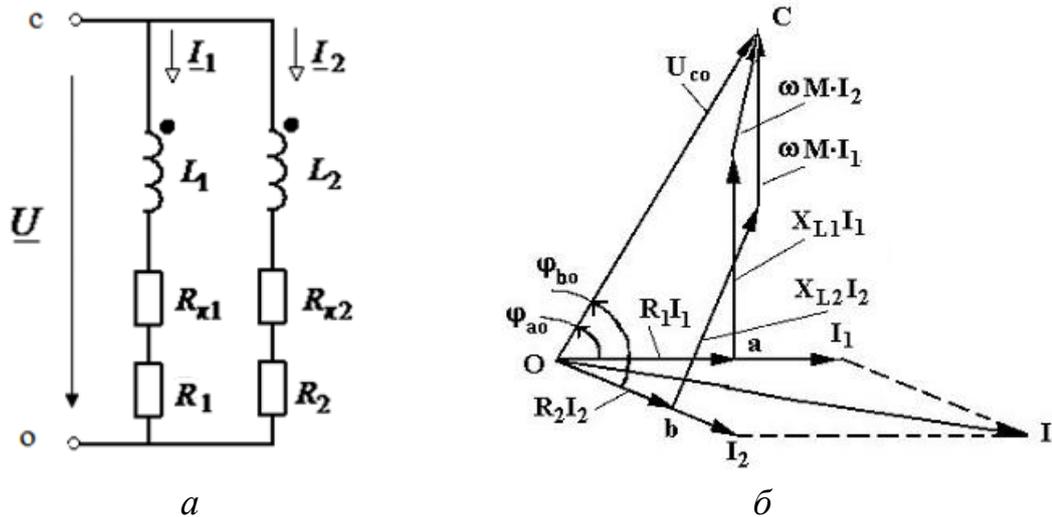


Рисунок 44 – Схема цепи (а) и векторная диаграмма (б) при согласнопараллельном включении индуктивно связанных катушек

Решая совместно систему уравнений (5.1), получим:

$$I_1 = \frac{Z_{22} - j\omega M}{Z_{11} \cdot Z_{22} - (j\omega M)^2} \cdot U; \quad I_2 = \frac{Z_{11} - j\omega M}{Z_{11} \cdot Z_{22} - (j\omega M)^2} \cdot U,$$

где $Z_{11} = R_1 + j\omega L_1$; $Z_{22} = R_2 + j\omega L_2$.

При параллельном встречном включении катушек следует в уравнениях системы (5.1) изменить знаки перед слагаемыми, содержащими M . Построение векторной диаграммы осуществляется аналогично рисунку 43, б, однако следует учесть обратное направление векторов $j\omega M_1$ и $j\omega M_2$.

Особый интерес представляет случай наличия индуктивной связи между катушками при отсутствии электрического соединения между ними, например, в линейном трансформаторе (рисунок 45).

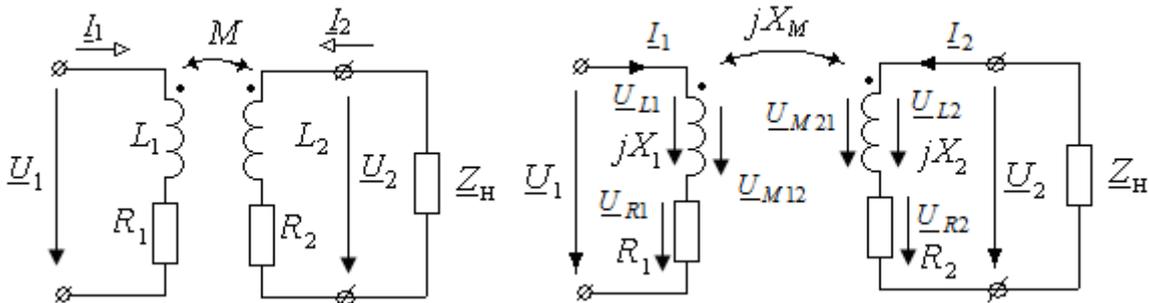


Рисунок 45 – Схема линейного трансформатора

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток линейного трансформатора:

$$U_1 = U_{L1} + U_{R1} + U_{M12} = (R_1 + jX_1)I_1 + jX_M I_2;$$

$$0 = U_{L2} + U_{R2} + U_{M21} - U_2 = (R_2 + jX_2 + Z_H)I_2 + jX_M I_1;$$

$$U_2 = -Z_H I_2.$$

В режиме холостого хода $Z_H = \infty$, ток $I_2 = 0$ и уравнения примут вид:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{R1} = (R_1 + jX_1)I_1;$$

$$\underline{U}_{M12} = \underline{U}_2 \text{ или } jX_M I_1 = \underline{U}_2.$$

Измерив действующие значения напряжения и тока первичной обмотки, угол сдвига фаз между напряжением и током, можно определить параметры первичной катушки. Измерив действующее значение напряжения вторичной обмотки можно определить сопротивление взаимной индукции.

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования являются индуктивно связанные катушки, соединенные последовательно или параллельно для случаев их согласного и встречного включения. Получаемая схема подключается к источнику синусоидального напряжения.

Источником синусоидального напряжения является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Пассивные элементы электрической схемы выбирают комплекта элементов лабораторного стенда. В качестве катушек индуктивностей используются катушки из блока трансформаторов с числом витков $W_1 = 900$. Из катушек необходимо предварительно извлечь U-образные сердечники из электротехнической стали.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Начертить схемы согласного и встречного включения двух индуктивно связанных катушек, из которых, первая катушка имеет параметры $R_{к1}, L_1$, вторая – $R_{к2}, L_2$.

4.2 При заданном напряжении питания U и частоте питающей сети f произвести расчет тока и напряжений на первой U_1 и на второй U_2 катушках при их последовательном соединении для согласного и встречного включений. Параметры цепи для выбранного варианта представлены в таблице 5.1.

4.3 Изучить порядок построения векторных диаграмм цепи при последовательном включении катушек.

4.4 Начертить схему смешанного соединения элементов (рис. Г.2) для согласного включения катушек.

4.5 Выполнить расчёт токов схемы рисунок Г.2. Напряжение источника и параметры элементов схемы принять для выбранного варианта согласно таблице 5.1. Результат записать в таблицу Г.5.

4.6 Повторить расчёт для встречного включения катушек. Результат записать в таблицу Г.5.

Таблица 5.1 – Исходные данные

№ варианта	$U_{Г}$, В	f , кГц	R , Ом	$R_{к1}$, Ом	$R_{к2}$, Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	C , мкФ
1	7	1	100	44	44	32	33	1
2	7	3	100	44	44	45	45	0,22
3	7	2	100	44	44	35	36	0,22
4	7	1,5	100	44	44	34	34	0,47
5	7	2,5	100	44	44	40	40	0,22
6	7	0,5	100	44	44	31	32	1

5 Экспериментальная часть

5.1 Определение параметров индуктивно связанных катушек

5.1.1 Подключая каждую из катушек к регулируемому источнику постоянного напряжения $U_0 = 1$ В, произвести измерения значений токов I_{L1} и I_{L2} через катушки. По измеренным величинам рассчитать значения активных сопротивлений каждой из катушек и также внести в протокол. Расчёты выполняются по формулам:

$$R_{к1} = \frac{U_0}{I_{L1}}; \quad R_{к2} = \frac{U_0}{I_{L2}}.$$

Результаты расчётов записать в протокол исследования.

5.1.2 Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке Г.1, а, приняв за начало катушки L_1 зажим, которым она присоединена к разъёму «Выход» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Приклеить к началу катушки L_1 цветную бумажку определенного цвета или кусочек изоляции. Обозначить этот зажим точкой в таблице Г.2. Для усиления магнитной связи катушек вставить сверху U-образный сердечник из электротехнической стали.

5.1.3 Представить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю.

5.1.4 Включить автоматический выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Установить регулятором «Частота» значение частоты f согласно выбранного варианта (таблица 5.1) и записать это значение в таблицу Г.2.

5.1.5 Регулятором «Амплитуда» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР установить действующее значение напряжения $U_{Г} = 7$ В (использовать вольтметр PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ).

5.1.6 Вольтметром PV2 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить и записать в

таблицу 5.3 напряжения U_M, U_L, U_{LM} .

5.1.7 По результатам измерений вычислить остальные величины, указанные в таблице Г.2, обозначить точкой начало катушки L_2 на схеме и наклеить на этот вывод катушки цветную бумажку другого цвета или листок изолянта.

5.1.8 Собрать цепь согласно схеме изображённой на рисунке Г1, б. Повторить измерения и вычисления, указанные в п.п.5.1.6 и 5.1.7. Проверить правильность определения начал катушек L_1 и L_2 .

5.1.9 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР.

5.2 Исследование последовательного соединения индуктивно-связанных катушек

5.2.1 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.2, а.

5.2.2 Включить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР.

5.2.3 Соединить катушки последовательно в произвольном порядке (например, соединение $(a-b)-(c-d)$: выводы катушки L_1 обозначены $(a-b)$; выводы катушки L_2 $(c-d)$. Начала и концы катушек L_1 и L_2 определены в п.п. 5.1.2 и 5.1.7.

Регулятором «Амплитуда» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР установить напряжение $U_G = 7$ В (использовать вольтметр PV1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ).

5.2.4 Вольтметром PV2 и амперметром РА БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить действующие значения напряжений U_1 и U_2 , тока I . Измеренные величины записать в таблицу Г.3.

5.2.5 Поменять местами выводы катушки L_2 (соединение $(a-b)-(d-c)$). Повторно выполнить измерения, указанные в п.п. 5.2.4. Измеренные величины записать в таблицу Г.3.

5.2.6 По результатам измерений определить, какое соединение соответствует согласному включению катушек. Провести разметку одноименных зажимов на катушках. По результатам опыта рассчитать величину X_M .

5.2.7 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР.

5.2.8 Сравнить полученные результаты вычислений L_1, L_2, M, K с результатами, полученным в п.п. 5.1.6; 5.1.7.

5.2.9 Построить в выбранном масштабе векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек. На диаграммах указать напряжения на всех элементах цепи (на R_{K1}, L_1 и т.д.).

5.3 Исследование разветвленной цепи с индуктивно связанными катушками

5.3.1 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.3. Использовать параметры элементов, указанные в таблице 5.1 для вы-

бранного варианта.

5.3.2 Соединить катушки так, чтобы одноименные зажимы были подключены к узлу 1.

5.3.3 Включить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР. Переключатель «Форма» установить в положение «~». Установить регулятором «Частота» значение частоты f согласно выбранному варианту (таблица 5.1). Регулятором «Амплитуда» установить на выходе модуля напряжение U_G равное 7 В (использовать РВ1 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ).

5.3.4 Амперметрами РА1, РА2, РА3, БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить действующие значения токов I_1 и I_2 и I_3 . Измеренные величины записать в таблицу Г.5.

5.3.5 Поменять местами концы одной из катушек. Повторить измерения, указанные в п.п. 5.3.4.

5.3.6 Сравнить полученные значения с результатами, рассчитанными аналитически в п.п. 4.5; 4.6.

5.3.6 Выключить тумблер «Сеть» модуля ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР и автоматический выключатель QF модуля питания.

5.3.7 Протокол измерений утвердить у преподавателя.

6 Содержание отчёта

6.1 Цель работы.

6.2 Таблица исходных данных для выбранного варианта.

6.3 Схемы электрической цепи.

6.4 Предварительный расчёт цепи для выбранного варианта.

6.5 Описание экспериментальной части проведения работы.

6.6 Таблицы измеренных и вычисленных величин.

6.7 Векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек, с указанием на них падения напряжений всех элементов цепи.

6.8 Сравнение полученных экспериментальных значений с рассчитанными значениями в п.п. 4.2; 4.5; 4.6.

7 Контрольные вопросы

7.1 Определить коэффициент связи $k_{св}$ индуктивно связанных катушек. В каких пределах он изменяется? Зависит ли коэффициент связи от частоты?

7.2 Как в результате эксперимента определить коэффициент взаимной индукции?

7.3 Как в результате эксперимента определить одноимённые концы индуктивно связанных катушек?

7.4 Как проводится «развязка» индуктивно связанных обмоток?

7.5 Изобразите схему замещения трансформатора без индуктивных связей.

7.6 Объясните порядок построения векторной диаграммы токов и напряжения трансформатора.

7.7 Что такое «вносимое сопротивление»? От чего оно зависит?

7.8 Какова физическая сущность явления взаимной индукции и как оно может быть описано математически?

7.8 Какие зажимы катушек называют одноимёнными? Какие существуют способы их определения?

7.9 Какое соединение индуктивно связанных катушек носит название согласного (встречного)?

7.10 Что такое «ёмкостный эффект»? В чём его проявление, и в каких цепях он возможен?

7.11 Постройте векторные диаграммы токов и напряжения при согласном и встречном включении двух индуктивно связанных катушек.

7.12 Какова связь между направлениями токов и напряжений взаимной индукции в индуктивно связанных катушках?

Приложение Б
Лабораторная работа № 1

Цель работы: _____

Этап Б.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Б.1 – Исходные данные для исследования

$E_1, В$	$E_2, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$
5	15	10	22	33	47	100	150

Б.1. Исследование разветвленной цепи постоянного тока

Схема исследуемой цепи для выбранного варианта

Система уравнений по законам Кирхгофа для исследуемой цепи:

Результаты решения системы:

$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 = \quad I_5 = \quad I_6 =$$

Значения напряжений в резисторах:

$$U_1 = \quad U_2 = \quad U_3 = \quad U_4 = \quad U_5 = \quad U_6 =$$

Система уравнений по методу контурных токов для исследуемой цепи:

Результаты решения системы:

$$I_I = \quad I_{II} = \quad I_{III} =$$

Значения токов в ветвях по значениям контурных токов

$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 = \quad I_5 = \quad I_6 =$$

Система уравнений по методу узловых потенциалов:

Результаты решения системы:

$$\varphi_1 = \quad \varphi_2 = \quad \varphi_3 = \quad \varphi_4 = 0$$

Значения токов в ветвях по значениям потенциалов:

$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 = \quad I_5 = \quad I_6 =$$

Этап Б.2 – Экспериментальная часть

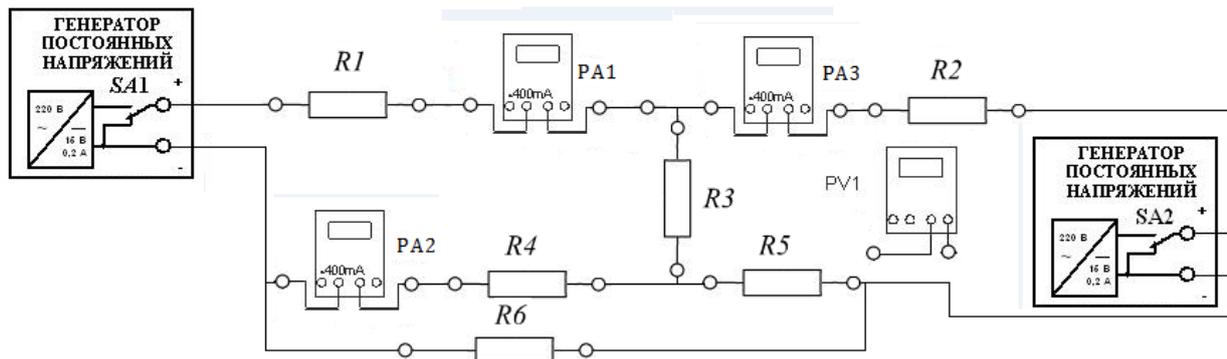


Рисунок Б.1 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Б.2.

Токи в ветвях	Номер ветви					
	1	2	3	4	5	6
Метод непосредственного применения законов Кирхгофа						
Метод контурных токов						
Метод узловых потенциалов						

Таблица Б.3.

Токи и напряжения		Номер ветви					
		1	2	3	4	5	6
Ток в ветви, мА	расчет						
	опыт						
Падение напряжения на резисторе, В	расчет						
	опыт						

Таблица Б.4

Измеряемая величина	Наименование точек					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Потенциал φ_i , В						

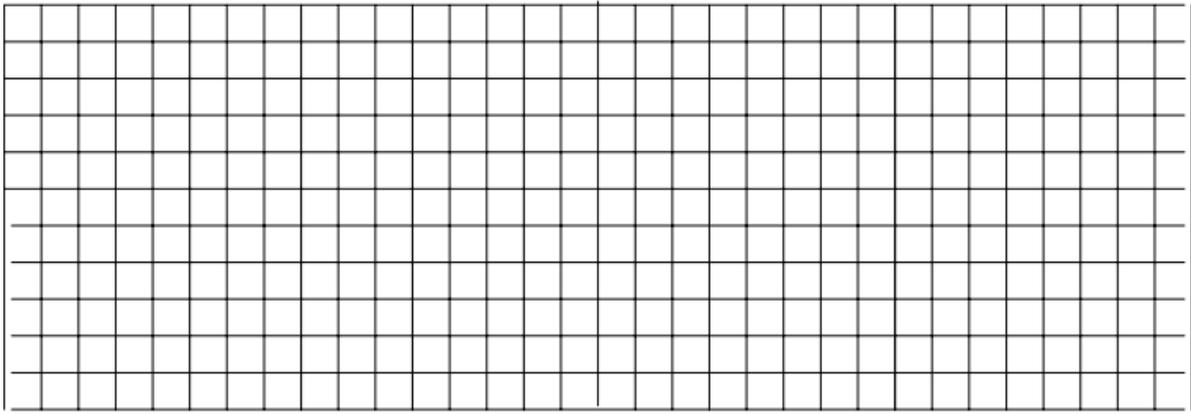


Рисунок Б.2 – Потенциальная диаграмма

Баланс мощностей

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{источн}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{приемн}}$$

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{источн}} =$$
$$\sum_{i=1}^n P_{\text{приемн}} =$$

Приложение В
Лабораторная работа № 2

Цель работы: _____

Этап В.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица В.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом	E ₃ , В	E ₅ , В

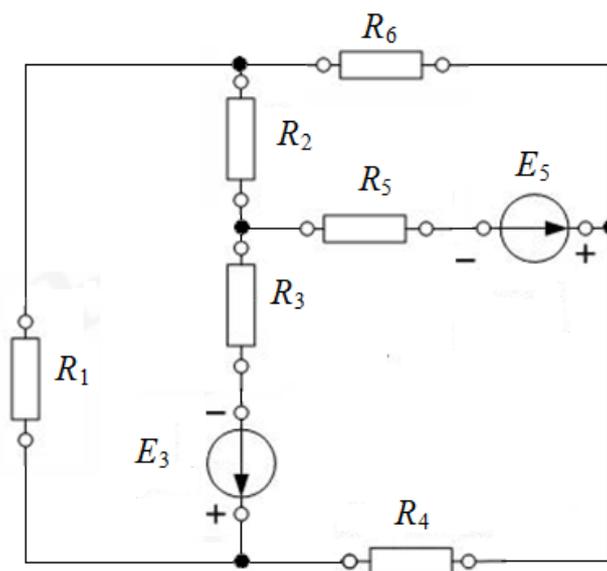


Рисунок В.1 – Расчётная схема исследуемой цепи

В.1.1 Расчёт цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора

Преобразуем исходную схему, заменив в ней источники питания их внутренними сопротивлениями и определим эквивалентное сопротивление полученной схемы относительно зажимов R₁.

Преобразуем треугольник в эквивалентную звезду

$$R_{26} = \quad R_{56} = \quad R_{25} =$$

$$R_{ЭКВ} = R_{ВХ} =$$

Преобразуем исходную схему, разомкнув ветвь с R₁. На зажимах разомкнутой ветви нанесем напряжение U_{ХХ}.

Из уравнения, составленное по 2 закону Кирхгофа, выразить U_{ХХ}

$$U_{ХХ} =$$

Неизвестные токи в полученном уравнении найдём по методу контурных токов, для чего составим систему уравнений по этому методу:

Решая данную систему, найдем токи и, подставив их в выражение для определения U_{XX} , рассчитаем его:

Вычислим ток короткого замыкания I_{K3} по формуле:

$$I_{K3} = U_{XX} / R_{BX} =$$

Найдем ток через сопротивление R_1 по формуле:

$$I_1 = U_{XX} / (R_{BX} + R_1)$$

Этап В.2 – Экспериментальная часть

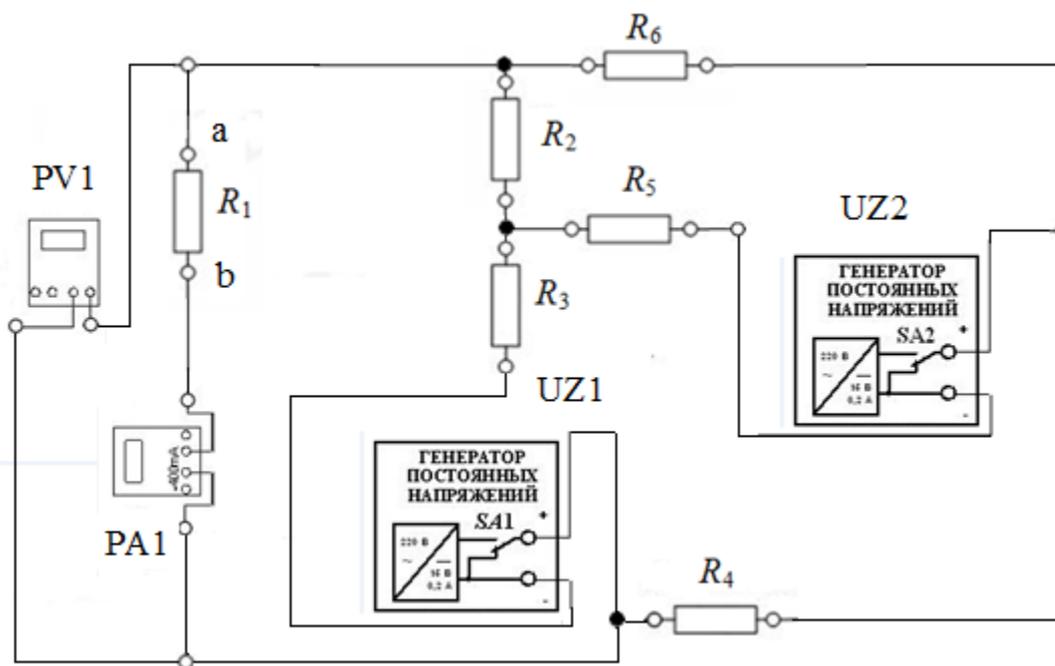


Рисунок В.2 – Монтажная схема исследуемой электроцепи

В.2.1 Определение параметров эквивалентного генератора

В режиме короткого замыкания ($R_1 = R_H = 0$) измерить ток I_{K3} .

В режиме холостого хода (ветвь с R_1 разомкнута) измерить напряжение $U_{X.X}$. Данные измерений занести в табл. В.2.

Установить R_1 равным значению согласно таблице В.1. Измерить ток I_1 , результат записать в таблицу В.2.

Сравнить экспериментальные и теоретические данные.

Таблица В.2

	$I_{кз}, \text{mA}$	$U_{XX}, \text{В}$	$R_{ВН}, \text{Ом}$	I_1, mA
Расчёт				
Опыт				

В.2.2 Определение экспериментальных зависимостей

Таблица В.3

R_1	0				$R_1 = R_{ВН}, \text{Ом}$				∞
I_1, mA									
$P_1, \text{мВт}$									

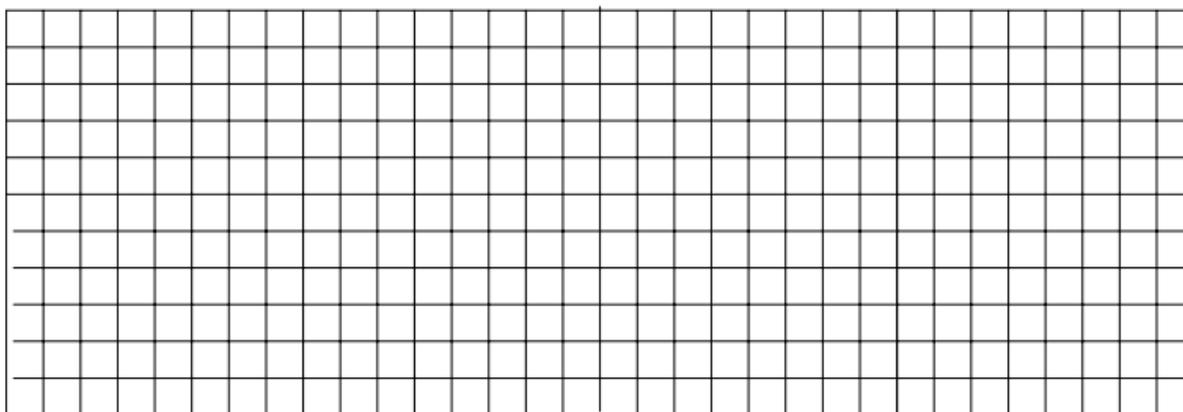


Рисунок В.3 – Вольт-амперная характеристика активного двухполюсника $U_1(I_1)$

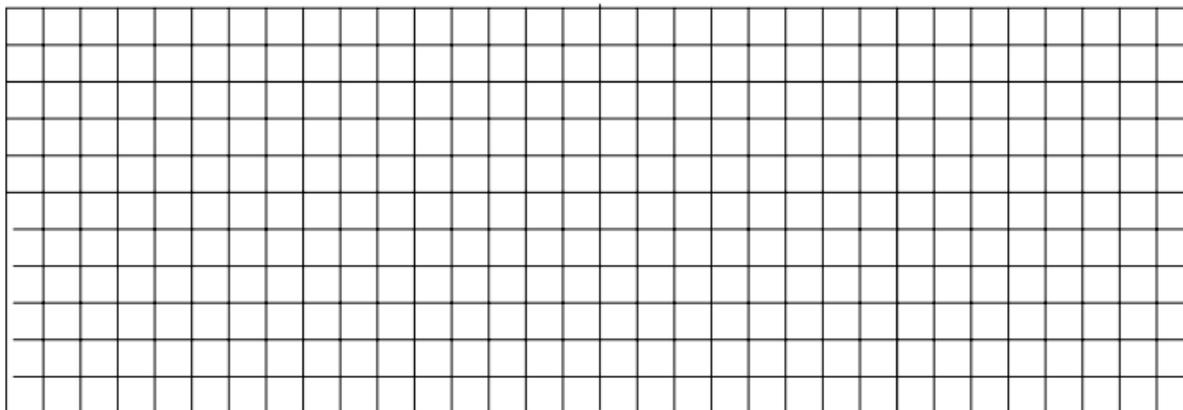


Рисунок В.4 – График зависимости $P_1(R_1)$ при изменении R_1 от 0 до ∞ .

В.3.1 Проверка метода наложения

Таблица В.3

	$I_{R1}^{E_3}, \text{mA}$	$I_{R1}^{E_5}, \text{mA}$	I_{R1}, mA
Расчёт			
Опыт			

Приложение Г
Лабораторная работа № 3

Цель работы: _____

Этап Г.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Г.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	R, Ом	R _к , Ом	L, мГн	C, мкФ

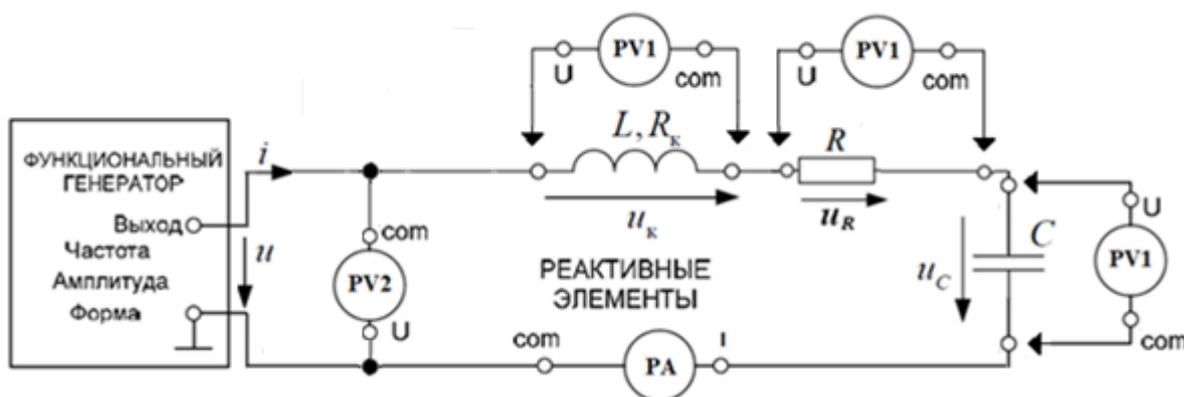


Рисунок Г.1 – Расчётная схема исследуемой цепи

Г.1.1 Предварительные расчёты:

Резонансная частота:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \quad \text{Гц}$$

Характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{L/C} = \quad \text{Ом}$$

Добротность контура:

$$Q_{теор} = \frac{\rho}{R_K + R} =$$

Ток в цепи при резонансе:

$$I_0 = \frac{U_{Г}}{R_K + R} = \quad \text{мА}$$

Падение напряжения на реальной катушке индуктивности:

$$U_K = [R_K + j(2\pi f_0 L)] I_0 =$$

ёмкости:
$$U_C = -j \frac{1}{(2\pi f_0 C)} I_0 =$$

Полоса пропускания контура:
$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q} =$$

Граничные частоты
$$f_{1,2} = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} \mp 1) =$$

Г.2.1 Определение экспериментальных зависимостей

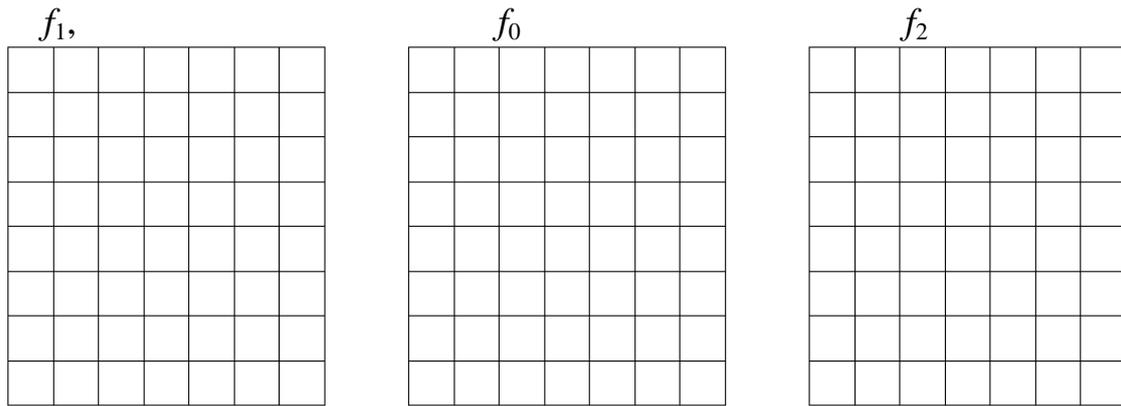
Таблица Г.2

f , Гц	$\nu = f_i / f_{0,эксп}$	I , мА	U_R , В	U_C , В	U_K , В	Примечания
						$f < f_1$
						f_1
						$f < f_0$
						теоретич.
						экспери- мент
						f_0
						$f > f_0$
						f_2
						$f > f_2$

Таблица Г.3

f , Гц	$\nu = f_i / f_{0,эксп}$	$\frac{I(f)}{I_0}$, мА	$\frac{U_K(f)}{U_\Gamma}$, В	$\frac{U_C(f)}{U_\Gamma}$, В	$\frac{U_R(f)}{U_\Gamma}$, В	Примечания
						$f < f_1$
						f_1
						$f < f_0$
						теоретич.
						экспери- мент
						f_0
						$f > f_0$
						f_2
						$f > f_2$

мы тока и напряжений в масштабах: $U =$ В/см; $I =$ мА/см.



Строим частные характеристики: $Z(f)$, $X(f)$, $X_C(f)$, $X_K(f)$ в зависимости от относительной частоты ν .

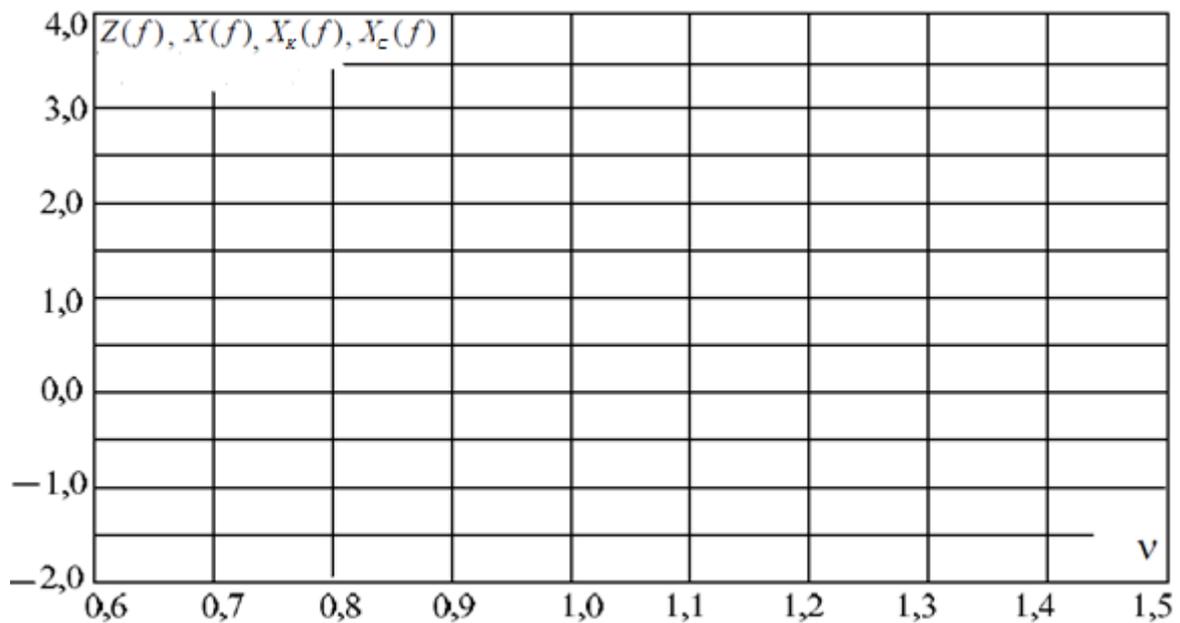


Рисунок Г.3 – Графики частотных характеристик зависимости от относительной частоты ν

Из графиков рисунок Г.3 определяем:

на частоте f_1 : $Z(f_1) =$ $X(f_1) =$

на частоте f_2 : $Z(f_2) =$ $X(f_2) =$

Приложение Д
Лабораторная работа № 4

Цель работы: _____

Этап Д.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Д.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	R_K , Ом	L , мГн	C , мкФ

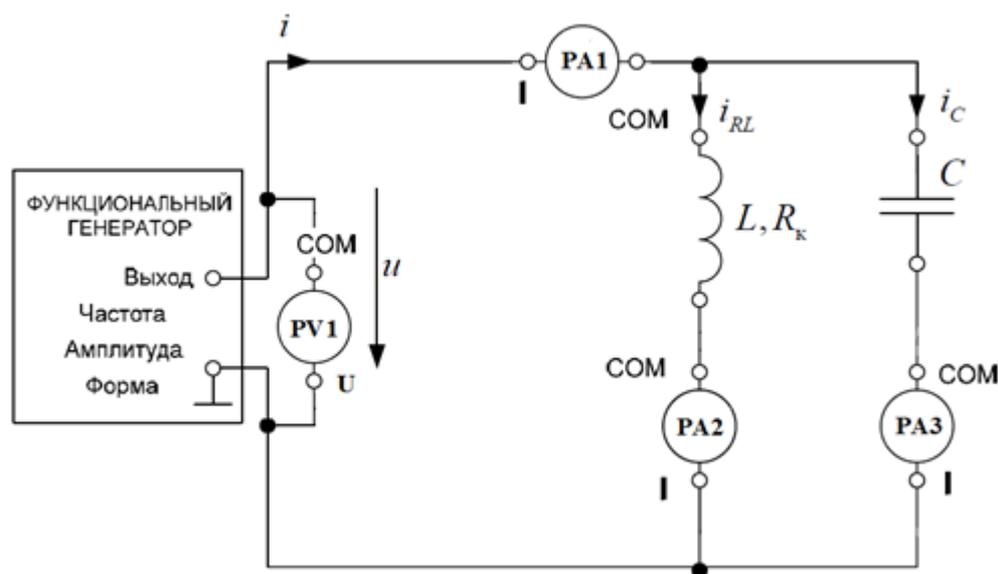


Рисунок Д.1 – Расчётная схема исследуемой цепи

Д.2.1 Предварительные расчёты:

Волновое сопротивление контура:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} =$$

Резонансная частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2}} =$$

Резонансный ток:

$$I_0 = UG_0 = U \frac{R_K}{\rho^2} =$$

Теоретическая добротность контура:

$$Q_{теор} = \frac{\sqrt{\rho^2 - R_K^2}}{R_K} =$$

Г.2.1 Определение экспериментальных зависимостей

Таблица Д.2

$f, \text{Гц}$	$\nu = \frac{f_i}{f_{0\text{экспер}}}$	$I, \text{мА}$	$I_{RL}, \text{мА}$	$I_C, \text{мА}$
	0,2			
	0,4			
	0,6			
	0,8			
$f_{0, \text{теор}} =$	1,0			
$f_{0, \text{эксп}} =$	1,0			
	1,1			
	1,2			
	1,4			
	1,6			
	1,8			
	2,0			

По данным таблицы Д.2 на рисунке Д.2 построены частные зависимости $I(\nu)$, $I_{RL}(\nu)$, $I_C(\nu)$.

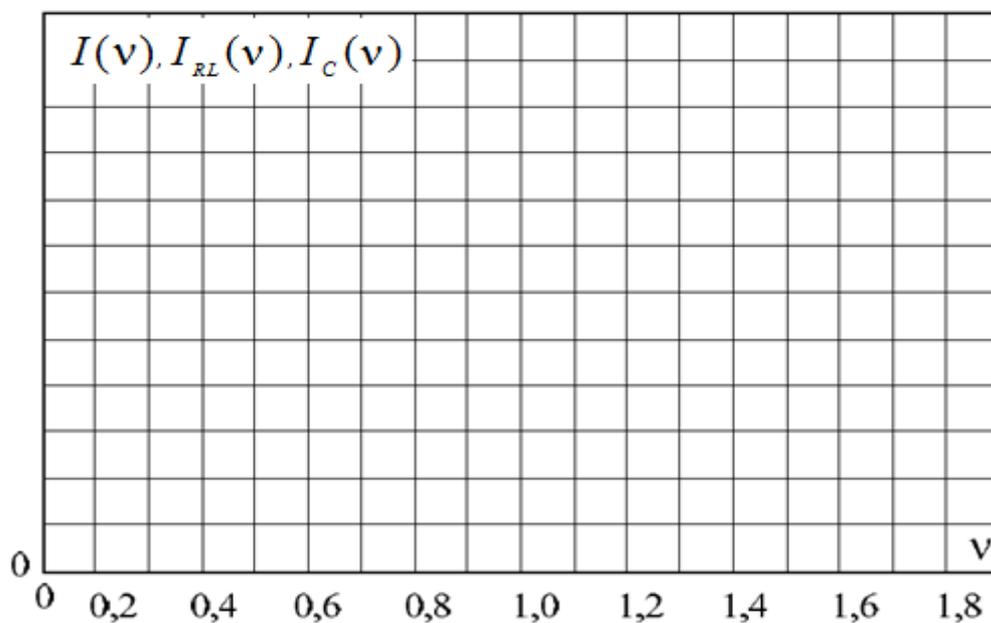


Рисунок Д.2 – Экспериментальные АЧХ параллельного R -, L -, C -контура

Экспериментальная добротность контура

$$Q_{\text{эксп}} = \frac{I_C(\nu_0)}{I_G(\nu_0)},$$

где $I_G(\nu_0) = I_0$

По данным таблицы Д.2 для частоты f_0 построена векторная диаграмма (рисунок Д.3).

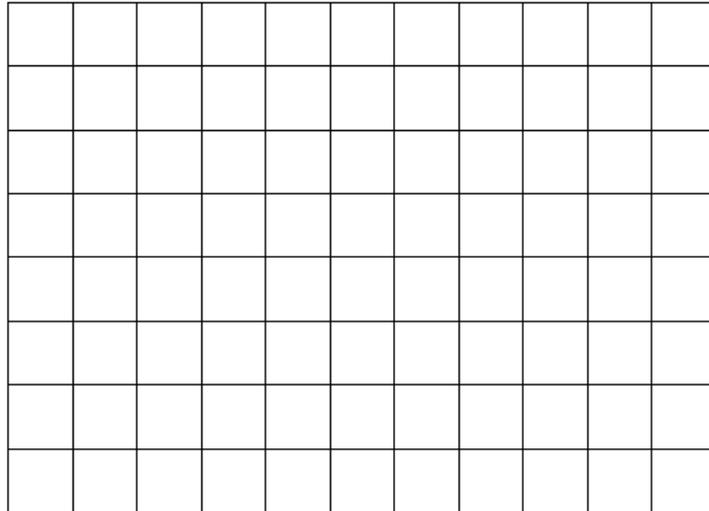


Рисунок Д.3 – Векторная диаграмма токов и напряжений в масштабах:
 $U = \underline{\hspace{2cm}}$ В/см; $I = \underline{\hspace{2cm}}$ мА/см.

Приложение Г
Лабораторная работа № 5

Цель работы: _____

Этап Г.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Г.1 – Исходные данные для исследования

№ варианта	U _Г , В	f, кГц	R _{к1} , Ом	R _{к2} , Ом	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	C, мкФ
	7						

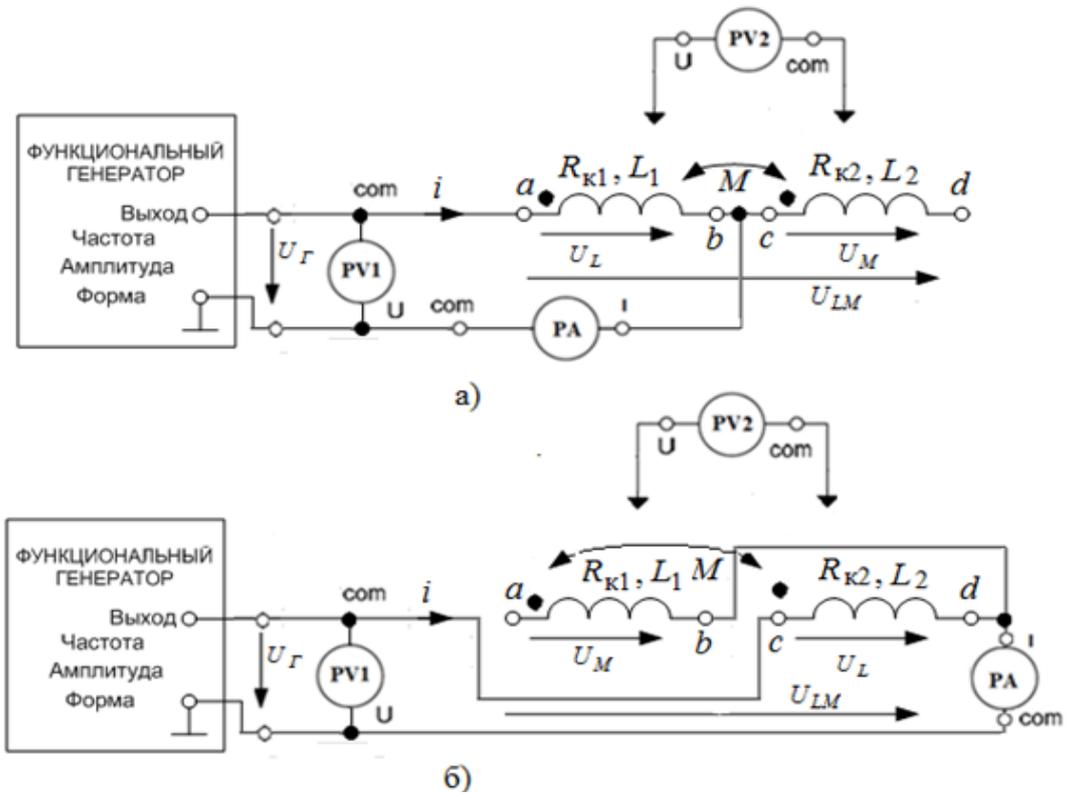


Рисунок Г.1 – Расчётная схема исследуемой цепи для определения параметров индуктивно связанных катушек

Расчёт параметров катушек

$$R_{к1} = \frac{U_0}{I_{L1}} = \quad \text{Ом}, \quad R_{к2} = \frac{U_0}{I_{L1}} = \quad \text{Ом.}$$

К выходу генератора подключена катушка L₁

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f =$$

$$Z_{L1} = U_{L1} / I =$$

$$X_{L1} = \sqrt{(Z_{L1})^2 - (R_{к1})^2} =$$

$$L_1 = X_{L1} / \omega =$$

$$M = X_M / \omega =$$

$$X_M = U_M / I =$$

К выходу генератора подключена катушка L_2

$$Z_{L2} = U_{L2} / I =$$

$$X_{L2} = \sqrt{(Z_{L2})^2 - (R_{к2})^2} =$$

$$L_2 = X_{L2} / \omega =$$

$$X_M = U_M / I =$$

$$M = X_M / \omega =$$

Если $U_{LM} = U_L + U_M$, то это означает, что конец первой катушки L_1 присоединен к началу второй катушки L_2 .

Если $U_{LM} = U_L - U_M$, то катушки соединены своими концами.

Обозначить точкой начало катушки L_2 .

Таблица Г.2 – Результаты исследований по определению параметров индуктивно связанных катушек

$f =$ кГц	U_{Γ} В	U_L В	U_M В	U_{LM} В	I мА	X_L Ом	X_M Ом	L Гн	M Гн	$k_{св}$	Одноименные зажимы
Схема Г1, а											• 
Схема Г1, б											

Последовательное соединение катушек

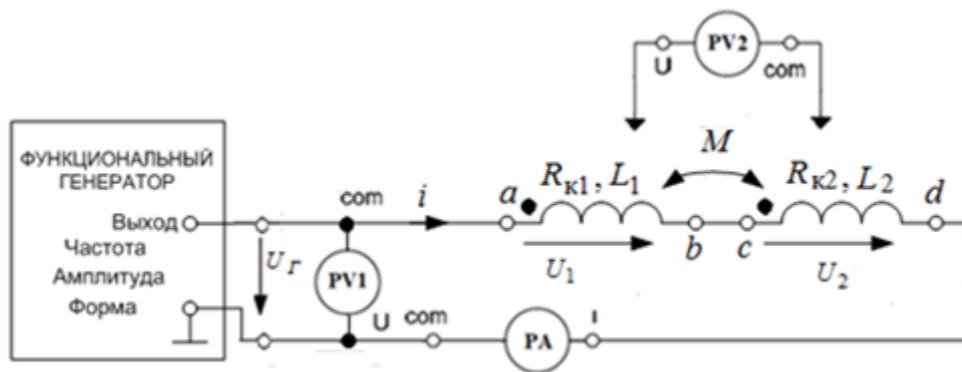
Таблица Г.3 – Результаты исследований при последовательном соединении катушек индуктивностей

$(a-b)-(d-c)$ соединение катушек							
$U_{\Gamma},$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$I,$ мА	$Z_1,$ Ом	$X_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$X_2,$ Ом
$Z_{(a-b)-(d-c)} = U_{\Gamma} / I$				= Ом			
$(a-b)-(c-d)$ соединение катушек							
$Z_{(a-b)-(c-d)} = U_{\Gamma} / I$				= Ом			

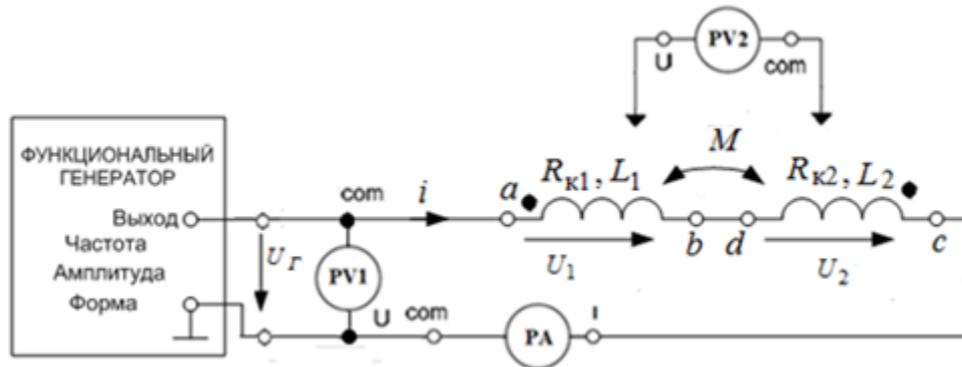
$$Z_1 = \frac{U_1}{I} = \quad ; \quad X_{L1} = \sqrt{(Z_1)^2 - (R_{к1})^2} = \quad ;$$

$$Z_2 = \frac{U_2}{I} = \quad ; \quad X_{L2} = \sqrt{(Z_2)^2 - (R_{к2})^2} = \quad ;$$

$$Z_{(a-b)-(d-c)} = \frac{U_{\Gamma}}{I} = \quad \text{Ом}, \quad Z_{(a-b)-(c-d)} = \frac{U_{\Gamma}}{I} = \quad \text{Ом}.$$



а



б

Рисунок Г.2 – Расчётная схема исследуемой цепи для анализа цепи при последовательном соединении индуктивно связанных катушек

Вывод: Соединение _____ соответствует согласному соединению катушек. Одноименные зажимы _____.

Следовательно, имеем: $Z_{согл} =$ Ом, $Z_{встр} =$ Ом.

Вычисленные значения перенесем в таблицу Г.4.

Таблица Г.4 – Результаты расчётов при последовательном соединении катушек индуктивностей

Способ включения	Значения табл. Г.3				Вычисления					
	Z_1 , Ом	X_1 , Ом	Z_2 , Ом	X_2 , Ом	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_I , Гн	L_{II} , Гн	M , Гн	$k_{св}$
согласное										
встречное										

Вычисление эквивалентных индуктивностей всей цепи и каждой катушки

$$X_{согл} = \sqrt{Z_{согл}^2 - (R_{к1} + R_{к2})^2} =$$

$$X_{встр} = \sqrt{Z_{встр}^2 - (R_{к1} + R_{к2})^2} =$$

$$\omega = 2\pi \cdot f =$$

$$L_{1согл} = \frac{X_{1согл}}{\omega} =$$

$$; L_{1встр} = \frac{X_{1встр}}{\omega} =$$

$$L_{2\text{согл}} = \frac{X_{2\text{согл}}}{\omega} = \quad ; \quad L_{2\text{встр}} = \frac{X_{2\text{встр}}}{\omega} =$$

$$L_{\text{согл}} = \frac{X_{\text{согл}}}{\omega} = \quad ; \quad L_{\text{встр}} = \frac{X_{\text{встр}}}{\omega} =$$

$$L_I = \frac{L_{1\text{согл}} + L_{1\text{встр}}}{2} =$$

$$L_{II} = \frac{L_{2\text{согл}} + L_{2\text{встр}}}{2} =$$

$$M = \frac{L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}}}{4} =$$

$$k_{\text{св}} = \frac{M}{\sqrt{L_I \cdot L_{II}}} =$$

Параллельное соединение катушек

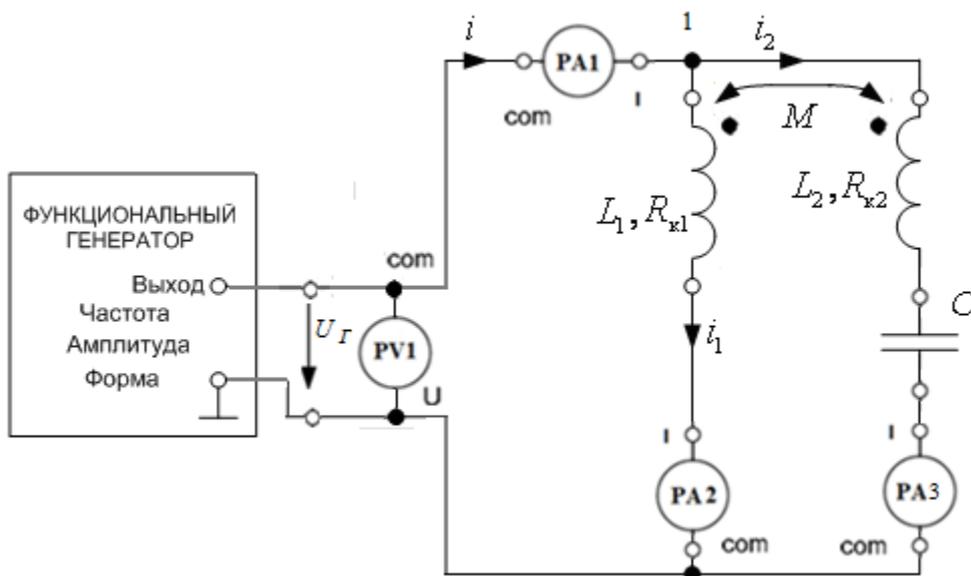


Рисунок Г.3 – Схема цепи для анализа параметров при параллельном соединении индуктивно связанных катушек

Таблица Г.5 – Результаты расчётов при параллельном соединении катушек индуктивностей

		$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$I_3, \text{ мА}$
Расчет	Включение согласное			
Эксперимент				
Расчет	Включение встречное			
Эксперимент				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
- 2 Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 2 т. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин – М.; СПб.: Питер, 2009.
- 3 Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. Д. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 4 Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей: учеб. пособие для электротехнич. и радиотехнич. спец. вузов / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М., Высшая школа, 1990. – 544 с.
- 5 Сборник задач по теоретическим основам электротехники: в 2 т. / П. А. Бутырин, Л. В. Алексейчик, С. А. Важнов и др.; под ред. чл.-корр. РАН П. А. Бутырина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Учебное издание

ШПРЕХЕР Дмитрий Маркович
ПОЛЕВОЙ Валерий Евгеньевич
ЧУМАКОВ Александр Виссарионович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Лабораторный практикум

Авторское редактирование
Компьютерная вёрстка В.Е. Полевой

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 15.05.14.
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 3,7.
Тираж 300 экз. Заказ _____

Тульский государственный университет
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

Д. М. Шпрехер, В. Е. Полевой, А. В. Чумаков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 2

**Исследование линейных и нелинейных электрических цепей
в установившемся и переходном режимах**

Лабораторный практикум

Тула

Издательство ТулГУ

2018

УДК 621.31

Шпрехер Д.М., Полевой В.Е., Чумаков А.В. Теоретические основы электротехники. Ч. 2. Исследование линейных и нелинейных электрических цепей в установившемся и переходном режимах: лабораторный практикум. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 70 с.

ISBN

В учебном издании изложены описание лабораторных работ, задания и методические рекомендации по их выполнению. Рассматриваются свойства, методы анализа и расчёта трёхфазных цепей, четырёхполюсников, линейных цепей несинусоидального тока, нелинейных электрических цепей постоянного тока, переходных процессов в линейных цепях.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину Теоретические основы электротехники в объёме общеобразовательной дисциплины.

Библиогр. 5 наим.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета
Тулльского государственного университета

Рецензент: Савельев В.В., д-р техн. наук, проф., зав.каф. «Приборы и биотехнические системы»

ISBN

© Шпрехер Д.М., Чумаков А.С., Полевой В.Е., 2018
© Издательство ТулГУ, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие требования к выполнению лабораторных работ	4
Лабораторная работа № 7 Исследование трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «звезда»	5
Лабораторная работа № 8 Исследование трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «треугольник».....	14
Лабораторная работа № 9 Исследование нелинейных элементов в цепи постоянного тока	18
Лабораторная работа № 10 Исследование пассивных линейных четырёхполюсников	23
Лабораторная работа № 11 Исследование линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока.....	33
Лабораторная работа № 12 Исследование переходных процессов в линейных цепях.....	39
Приложения	45
Библиографический список.....	17

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению цикла лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждая лабораторная работа выполняется в три этапа:

1 этап. Расчётно-графическая часть выполняется самостоятельно внеаудиторно и включает в себя изучение теоретических основ рассматриваемой темы, уяснение целей лабораторной работы и предстоящих исследований, аналитические расчёты режимов работы электрических цепей, подготовка формы протокола экспериментальной части отчёта.

2 этап. Экспериментальная часть выполняется в лаборатории кафедры под руководством преподавателя, в ходе которой осуществляется допуск к работе, сборка исследуемой электрической цепи, проведение экспериментов, согласование и утверждение полученных результатов у преподавателя.

3 этап. Самостоятельная обработка и анализ полученных в ходе экспериментов результатов, проверка их на адекватность с аналитическими расчётами 1-го этапа, формулировка выводов, оформление отчёта и его защита в объёме материала, обозначенного контрольными вопросами.

Отчёт по лабораторной работе оформляется каждым студентом самостоятельно с соблюдением требований существующих стандартов и методических указаний к оформлению отчётов. Форма и структура отчёта приведены в приложении к лабораторным работам.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

1 Цели работы

1 Получение навыков сборки электрических цепей и пользование электроизмерительными приборами.

2 Экспериментальное исследование режимов работы и расчёт параметров трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «звезда».

2 Основные положения теории

Трёхфазной цепью называется совокупность трёх электрических цепей (фаз), в которых действует система трёх синусоидальные э. д. с. одной и той же частоты, сдвинутых по фазе на определённый угол и создаваемых общим источником электрической энергии. Фазы трёхфазной цепи обозначаются буквами A, B, C . Если три э.д.с. e_A, e_B, e_C равны по амплитуде и сдвинуты по фазе одна относительно другой на угол 120° , то такую систему называют **симметричной трёхфазной системой**. Если э.д.с. фазы A принять за исходную и считать её начальную фазу равной нулю, то при вращении ротора с угловой скоростью ω против часовой стрелки выражения для мгновенных значений э.д.с. можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}e_A(t) &= E_m \sin(\omega t); \\e_B(t) &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\e_C(t) &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ).\end{aligned}$$

Такая последовательность чередования фаз называется **прямой**.

Фазы трёхфазной цепи всегда соединены (связаны). Основными видами связи являются соединения по схеме «звезда» и «треугольник».

На рисунке 7.1 изображён способ соединения фаз трёхфазного источника по схеме «звезда». Напряжения U_{AN}, U_{BN}, U_{CN} называются фазными, напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейными. В симметричном источнике фазные и линейные напряжения связаны соотношениями:

$$\begin{aligned}U_{AN} &= U_{BN} = U_{CN} = U_\Phi; \\U_{AB} &= U_{BC} = U_{CA} = U_L; \\U_L &= \sqrt{3}U_\Phi.\end{aligned}$$

На рисунке 7.1 нагрузка также соединена по схеме «звезда». Напряжения U_{an}, U_{bn}, U_{cn} называются фазными, напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – линейными. При соединении по схеме «звезда» токи I_A, I_B, I_C являются и фазными и линейными одновременно.

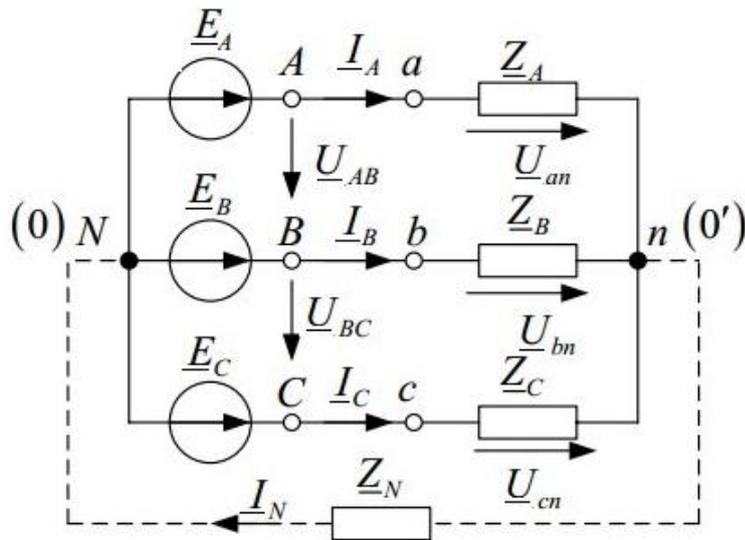


Рисунок 7.1

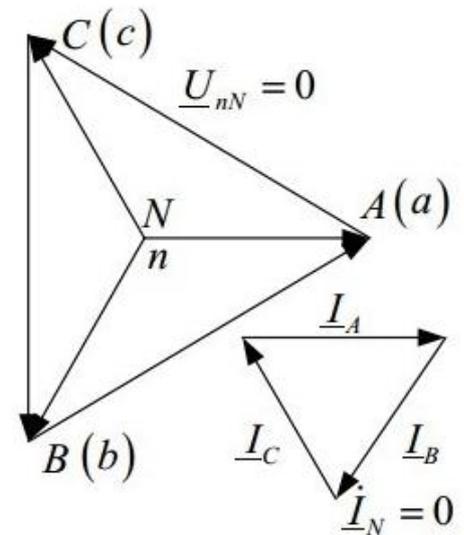


Рисунок 7.2

На рисунке 7.2 изображена топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для случая симметричной трёхфазной цепи, когда

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R. \quad (7.1)$$

При соединении нагрузки и источника по схеме «звезда» и наличии нейтрального провода выполняются соотношения:

$$\begin{cases} U_{AN} = U_{an}; \\ U_{BN} = U_{bn}; \\ U_{CN} = U_{cn}. \end{cases} \quad (7.2)$$

При этом токи в фазных проводах:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{U_a}{\underline{Z}_A} = \frac{E_A}{\underline{Z}_A} = \frac{U_A}{\underline{Z}_A} = \frac{U_A \cdot e^{j0^\circ}}{\underline{Z}_A} = I_A \cdot e^{j0^\circ}; \\ \underline{I}_B &= \frac{U_b}{\underline{Z}_B} = \frac{E_B}{\underline{Z}_B} = \frac{U_B}{\underline{Z}_B} = \frac{U_B \cdot e^{-j120^\circ}}{\underline{Z}_B} = I_B \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \underline{I}_C &= \frac{U_c}{\underline{Z}_C} = \frac{E_C}{\underline{Z}_C} = \frac{U_C}{\underline{Z}_C} = \frac{U_C \cdot e^{j120^\circ}}{\underline{Z}_C} = I_C \cdot e^{j120^\circ}. \end{aligned} \quad (7.3)$$

С учётом выражения (7.1) в симметричном режиме токи $|I_A| = |I_B| = |I_C| = |I_L| = |I_\Phi|$. Ток в нейтральном проводе $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$, напряжение \underline{U}_{Nn} , называемое напряжением смещения нейтрали, также равно нулю.

При несимметричной нагрузке $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ напряжение \underline{U}_{Nn} зависит от характера нагрузки и наличия нулевого провода. На рисунке 7.3 в качестве

примера представлены диаграммы трёхфазной цепи с 4-проводной схемой соединения ($\underline{Z}_N = 0$), а на рисунке 7.4 – с 3-проводной схемой соединения ($\underline{Z}_N = \infty$). Нагрузка фаз резистивная.

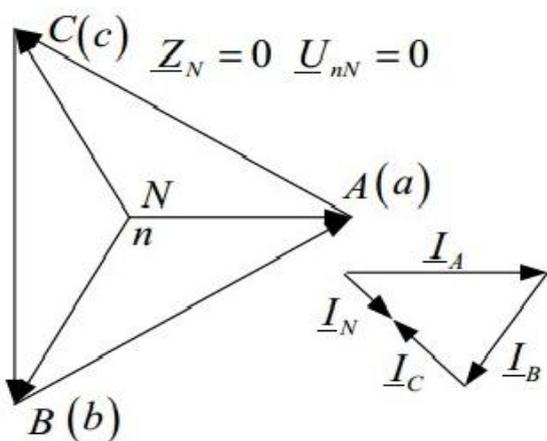


Рисунок 7.3

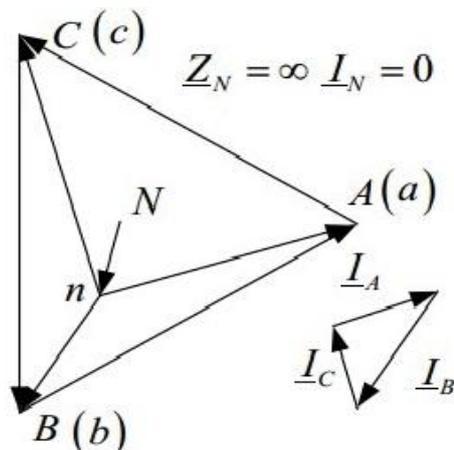


Рисунок 7.4

При несимметричной нагрузке, соединенной по схеме «звезда» равенство (7.2) не выполняется

$$\begin{cases} U_{AN} \neq U_{an}; \\ U_{BN} \neq U_{bn}; \\ U_{CN} \neq U_{cn}. \end{cases}$$

и ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \neq 0.$$

В этом случае для нахождения фазных (линейных) токов сначала определяется напряжение \underline{U}_{Nn} по методу «двух узлов»:

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{U}_A \frac{1}{\underline{Z}_A} + \underline{U}_B \frac{1}{\underline{Z}_B} + \underline{U}_C \frac{1}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}.$$

Затем находят значения фазных напряжений на нагрузке:

$$\begin{cases} \underline{U}_{an} = \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{Nn}; \\ \underline{U}_{bn} = \underline{U}_{BN} - \underline{U}_{Nn}; \\ \underline{U}_{cn} = \underline{U}_{CN} - \underline{U}_{Nn}. \end{cases}$$

и наконец, рассчитываются токи в фазах:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_C}.$$

Мгновенная мощность цепей трёхфазного тока при соединении приёмника по схеме «звезда»:

$$P = P_A + P_B + P_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Средняя мощность за период или активная мощность:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C,$$

т.е. равна сумме мощностей отдельных фаз.

При симметричной нагрузке:

$$P_A = U_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t - \varphi) = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \varphi);$$

$$P_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) I_m \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) = \\ = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - 240^\circ - \varphi);$$

$$P_C = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) I_m \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi) = \\ = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t + 240^\circ - \varphi).$$

Их сумма $P_A + P_B + P_C = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.

Таким образом, при симметричной нагрузке суммарная активная мощность:

$$P_\Sigma = 3P_\phi.$$

По аналогии суммарная реактивная мощность:

$$Q_\Sigma = Q_A + Q_B + Q_C$$

или при симметричной нагрузке:

$$Q_\Sigma = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi.$$

Полная суммарная мощность при симметричной нагрузке, соединенной по схеме «звезда»:

$$S_\Sigma = 3U_\phi I_\phi.$$

В практике инженерных расчётов часто используют выражения:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi, \quad \frac{Q}{S} = \sin \varphi, \quad \frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Активную, реактивную и полную мощность можно вычислить также в комплексной форме, при этом

$$\tilde{S}_\phi = \underline{U}_\phi \underline{I}_\phi = U_\phi e^{j\psi_U} I_\phi e^{j\psi_I} = U_\phi I_\phi e^{j(\psi_U - \psi_I)} = U_\phi I_\phi e^{j\varphi} \\ = U_\phi I_\phi [\cos \varphi + j \sin \varphi] = P_\phi + jQ_\phi.$$

Для измерения активной мощности в трёхпроводной схеме трёхфазной цепи применяется метод двух ваттметров. Один из вариантов включения ваттметров представлен на рисунке 7.5. Активная мощность трёхфазной цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров.

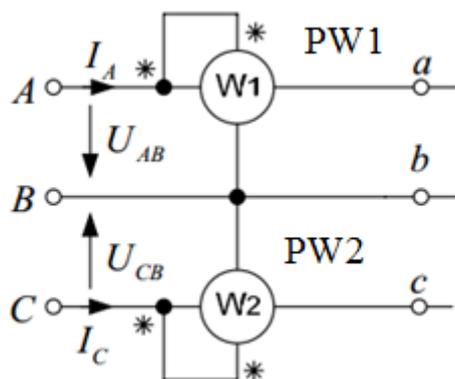


Рисунок 7.5 – Схема для измерения активной мощности в трёхпроводной цепи

3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе исследуются режимы работы трёхфазной четырёхпроводной (с нейтральным проводом) и трёхпроводной (без нейтрального провода) цепей, соединённых по схеме «звезда».

Источником симметричного трёхфазного напряжения является ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Источник создаёт систему напряжений прямого следования фаз с линейным напряжением $U_{л} = 12$ В промышленной частоты.

Трёхфазная нагрузка собирается из пассивных элементов-миниблоков – резисторов.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ, для измерения активной мощности – встроенный ваттметр.

4 Расчётно-графическая часть

Нарисовать схему соединения трёхфазной цепи «звезда-звезда с нейтральным проводом». Параметры цепи для симметричного и несимметричного режимов заданы в таблице. 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные данные исследуемых режимов

U_{ϕ} , В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1$, Ом	$R_B=R_2$, Ом	$R_C=R_3$, Ом	$R_A=R_1$, Ом	$R_B=R_2$, Ом	$R_C=R_3$, Ом
7	1000	1000	1000	680	470	1000

4.1 Анализ работы электрической цепи при симметричной нагрузке

4.1.1 Провести анализ работы электрической цепи при симметричной нагрузке. Рассчитать для данной схемы: фазные токи, ток в нейтральном проводе, суммарную активную мощность четырёхпроводной цепи. Полученные результаты занести в таблицу Б.2 (приложение Б). Построить топографическую

диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.2 Провести анализ аварийного режима при обрыве фазного провода *A*. Рассчитать для схемы данного аварийного режима фазные токи и ток в нейтральном проводе. Полученные результаты занести в таблицу Б.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.3 Провести анализ аварийного режима при обрыве нейтрального провода. Рассчитать для полученной схемы аварийного режима фазные токи и напряжение смещения нейтрали. Полученные результаты занести в таблицу Б.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2 Анализ работы электрической цепи при несимметричной нагрузке

4.2.1 Провести анализ работы электрической цепи при несимметричной нагрузке (таблица 7.1). Рассчитать для схемы с несимметричной нагрузкой: фазные токи и ток в нейтральном проводе, суммарную активную мощность четырёхпроводной цепи. Полученные результаты занести в таблицу Б.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2.2 Провести анализ аварийного режима при обрыве нейтрального провода, для чего рассчитать для полученной схемы фазные токи и напряжение смещения нейтрали. Полученные результаты занести в таблицу Б.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2.3 Провести анализ режима при обрыве фазного провода *A*. Рассчитать для полученной схемы фазные токи и напряжение смещения нейтрали. Полученные результаты занести в таблицу Б.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2.4 Провести анализ режима короткого замыкания в цепи по схеме «звезда-звезда без нейтрального провода» для несимметричной нагрузки. Короткозамкнутый провод выбрать самостоятельно. Рассчитать для полученной схемы ток в короткозамкнутом фазном проводе и токи в остальных фазных проводах. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

5 Экспериментальная часть

5.1 Исследование симметричного режима

5.1.1 Собрать электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке Б.9 (приложение Б). Установить заданные в таблице Б.1 величины R_1 , R_2 , R_3 из микроблоков резисторов. Установить на одном из мультиметров (PV1) режим измерения переменного напряжения – V-20 В. Измерение фазных токов проводим одним из мультиметров – PA1, установив режим измерения переменного тока –

I с диапазоном **200 мА**. Мультиметр РА2 в нейтральном проводе включить в режим измерения переменного тока с диапазоном **200 мА**.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Включить выключатель QF блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ТРЁХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, блока мультиметров и ваттметра. Тумблер SA модуля ВАТТМЕТР установить в положение 0,2 А. Вольтметром PV1 из блока МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} и линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} модуля ТРЁХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ1). Измеренные величины занести в таблицу Б.2 протокола испытаний. Проверить выполнения соотношений $U_{Л} = \sqrt{3}U_{Ф}$ для симметричного источника.

5.1.4 Измерить амперметром РА1 фазные токи подключая его поочередно в разрыв линий A , B , C (рисунок Б.9).

Вольтметром PV1 из БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} и линейные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} на нагрузке. Ток в нейтральном проводе измерить мультиметром РА2. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п 4.1.1.

5.1.5 Отсоединить фазный провод A в точке a на амперметре РА1. Выполнить измерения и занести результаты в таблицу Б.2. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п. 4.1.2. Восстановить цепь фазы A .

5.1.6 Переключить мультиметр РА2 в нейтральном проводе на режим измерения переменного напряжения – PV2, что соответствует режиму симметричной нагрузки без нейтрального провода. . Выполнить прибором РА1 из блока МОДУЛЬ МУЛЬТИМЕТРОВ измерения токов фаз. Вольтметром PV1 измерить фазные напряжения U_{an} , U_{bn} , U_{cn} ; мультиметром PV2 – напряжение U_{Nn} . Измеренные значения напряжений и токов занести в таблицу Б.2. Сравнить полученные данные с рассчитанными в п.п.4.1.3.

5.2 Исследование несимметричного режима

5.2.1 Установить в миниблоках резисторов сопротивление $R_1 = 680$ Ом, $R_2 = 470$ Ом, создав несимметричный режим. Переключить мультиметр PV2 в нейтральном проводе на режим измерения переменного тока – РА2, что соответствует *режиму несимметричной нагрузки с нейтральным проводом*. Выполнить измерения линейных токов I_A, I_B, I_C , тока в нейтральном проводе I_N , фазных U_{an}, U_{bn}, U_{cn} и линейных напряжений U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} . Данные занести в таблицу Б.3.

5.2.2 Переключить мультиметра РА2 в нейтральном проводе на режим измерения переменного напряжения – PV2, что соответствует *режиму несимметричной нагрузки без нейтрального провода*. . Отсоединить фазный провод A в точке a на амперметре РА1. Выполнить измерения и занести результаты в

таблицу Б.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п. 4.2.3. Восстановить цепь фазы A .

5.2.3 Выполнить измерения фазных токов, фазных и линейных напряжений, напряжения смещения нейтрали U_{Nn} и мощностей для режима несимметричной нагрузки без нейтрального провода. Измеренные значения занести в таблицу Б.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п. 4.2.2.

5.2.4 Закоротить фазу A , соединив проводом точки a и n . Измерения токов и напряжений выполнить согласно данным выше рекомендациям. Измеренные значения занести в таблицу Б.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п. 4.2.4.

5.2.5 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ТРЁХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ блока мультиметров и ваттметра и выключатель QF.

6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, а также векторные диаграммы токов и напряжений, исследуемых режимов, с указанием масштабов, выводы по лабораторной работе.

7 Контрольные вопросы

1 Каким образом три однофазных электроприёмника соединить по схеме «звезда»? Изобразите схему соединения.

2 Покажите на схеме «звезда» условно-положительные направления фазных и линейных токов и напряжений.

3 Какой режим работы трёхфазной цепи называется симметричным?

4 Какие существуют зависимости между линейными и фазными значениями напряжений и токов при симметричной нагрузке?

5 Каково назначение нейтрального провода?

6 Какими уравнениями связаны линейные и фазные напряжения при отсутствии нейтрального провода и несимметричной нагрузке?

7 Необходим ли нейтральный провод при работе трёхфазной цепи в различных режимах?

8 Можно ли устанавливать предохранитель в цепь нейтрального провода?

9 Что представляет собой источник трёхфазной ЭДС?

10 Напишите выражения для мгновенных и комплексных значений э.д.с. фаз трёхфазного источника.

11 Как осуществляется соединение фаз источника и приёмника в трёхфазной цепи?

12 Дайте определения фазного и линейного напряжений и токов.

13 При каких условиях в цепи наблюдается симметричный режим работы?

14 Что произойдет с системой фазных напряжений несимметричного электроприёмника при отключении нейтрального провода? Поясните на диа-

грамме.

15 Что называется напряжением смещения нейтрали и при каких условиях оно равно нулю?

16 Как определяется ток в нейтральном проводе при несимметричной нагрузке?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЁННОЙ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

1 Цели работы

Исследовать режимы работы 3-фазной цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник», провести анализ методом векторных диаграмм.

2 Основные положения теории

Общие сведения о трехфазной цепи и симметричном источнике изложены в предыдущей лабораторной работе. На рисунке 8.1 показан способ соединения фаз нагрузки треугольником. Токи I_A, I_B, I_C называются линейными, токи I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} – фазными. Напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} являются одновременно фазными и линейными.

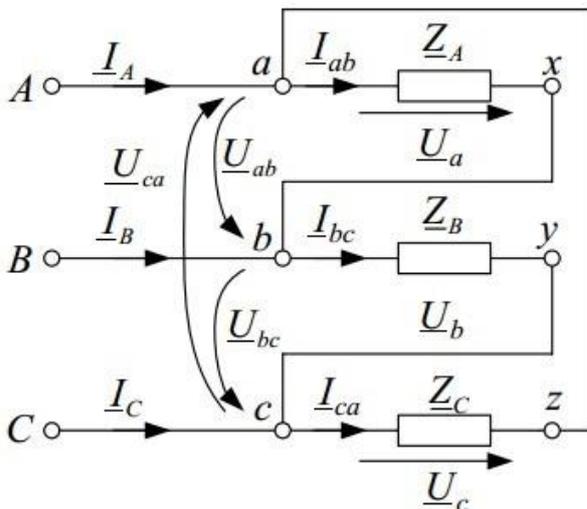


Рисунок 8.1

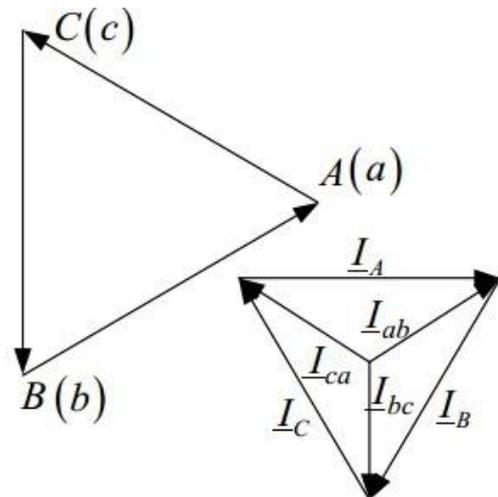


Рисунок 8.2

На рисунке 8.2 показана топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для случая симметричной трёхфазной цепи, когда

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R.$$

В симметричном режиме ток $I_L = \sqrt{3}I_\Phi$, напряжение $U_L = U_\Phi$

В случае несимметричной нагрузки фазные токи вычисляют по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_C}.$$

Линейные токи определяют по закону Кирхгофа для узлов:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

3 Объекты исследования и оборудование

В лабораторной работе исследуются режимы работы 3-проводной трёхфазной цепи со схемой соединения «звезда-треугольник».

Источником симметричного трёхфазного напряжения является ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Источник создаёт систему напряжений прямого следования фаз с линейным напряжением $U_{л} = 12$ В промышленной частоты.

Трёхфазная нагрузка собирается из пассивных элементов-миниблоков – резисторов.

В качестве электроизмерительных приборов для измерения напряжения и токов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ, для измерения активной мощности – встроенный ваттметр.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Анализ работы электрической цепи при симметричной нагрузке

4.1.1 Нарисовать схему соединения трёхфазной цепи по схеме «звезда-треугольник». Параметры цепи для симметричного режима заданы в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Исходные данные исследуемых режимов

U_{ϕ} , В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1$, Ом	$R_B=R_2$, Ом	$R_C=R_3$, Ом	$R_A=R_1$, Ом	$R_B=R_2$, Ом	$R_C=R_3$, Ом
7	1000	1000	1000	680	1000	1000

Рассчитать для данной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Рассчитать суммарную активную мощность цепи для симметричного режима. Полученные результаты занести в таблицу В.2 (приложение В). Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.2 Провести анализ аварийного режима при обрыве фазного провода ab . Рассчитать для полученной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Полученные результаты занести в таблицу В.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.1.3 В схеме п.4.1.1 произвести обрыв линейного провода A . Рассчитать для полученной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Полученные результаты занести в таблицу В.2. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

4.2 Анализ работы электрической цепи при несимметричной нагрузке

4.2.1 Для исходной схемы создать *несимметричный режим*, для чего за-

менить сопротивления в фазе «*ab*». Параметры цепи для несимметричного режима заданы в таблице 8.1. Рассчитать для данной схемы фазные и линейные токи, фазные и линейные напряжения на источнике и на нагрузке. Рассчитать суммарную активную мощность цепи для несимметричного режима. Полученные результаты занести в таблицу В.3. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для данного режима.

5 Экспериментальная часть

5.1 Исследование симметричного режима

5.1.1 Собрать электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке В.1 Установить заданные в таблице 8.1 величины R_1, R_2, R_3 из миниблоков резисторов. Установить на одном из мультиметров (PV1) режим измерения переменного напряжения – **V-20 В**. Измерение фазных токов проводится одним из мультиметром – PA1, установив режим измерения переменного тока – I с диапазоном **200 мА**. Измерение линейных токов проводится мультиметром PA2, включив его в режим измерения переменного тока с диапазоном **200 мА**.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Включить выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ модулей ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Тумблер SA блока ВАТТМЕТР установить в положение **0,2 А**. Вольтметром PV1 из блока МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения U_A, U_B, U_C и линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} модуля ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ1). Измеренные значения занести в таблицу В.2 протокола измерений (приложение В).

5.1.4 Измерить амперметром PA1 фазные токи подключая его поочередно в разрыв линий $x1-x2, x3-x4, x5-x6$ (рисунок В.6).

5.1.5 Измерить амперметром PA2 линейные токи подключая его поочередно в разрыв линий $x7-x8, x9-x10, x11-x12$.

5.1.6 Вольтметром PV1 из блока МУЛЬТИМЕТРОВ измерить фазные напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} на нагрузке. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.п.4.1.1.

5.1.7 Отсоединить фазный провод ab точке $x2$ на амперметре PA1. Выполнить измерения фазных и линейных токов, фазных напряжений на нагрузке. Занести полученные результаты в таблицу В.2 и сравнить их с рассчитанными в п.4.1.2. Восстановить цепь фазы ab .

5.1.8 Отсоединить линейный провод A точке $x8$. Выполнить измерения фазных и линейных токов, фазных напряжений на нагрузке. Занести полученные результаты в таблицу В.2 и сравнить их с рассчитанными в п.п.4.1.3. Восстановить цепь линии A .

5.2 Исследование несимметричного режима

5.2.1 Установить в миниблоках резисторов сопротивление $R_1 = 680 \text{ Ом}$,

создав *несимметричный режим*. Выполнить измерения фазных токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , линейных токов I_A, I_B, I_C , фазных напряжений U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} . Результаты занести в таблицу В.3. Сравнить полученные результаты с рассчитанными в п.4.2.1.

5.2.2 Выключить тумблеры СЕТЬ модуля ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ и выключатель QF.

6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, а также векторные диаграммы токов и напряжений, исследуемых режимов, с указанием масштабов, выводы по лабораторной работе.

7 Контрольные вопросы

1 Как осуществляется соединение трёхфазного приёмника по схеме «треугольник»?

2 Какой приёмник называется симметричным?

3 Дайте определение фазного и линейного токов.

4 Каково соотношение величин линейного напряжения и фазного напряжения приёмника, соединенного по схеме «треугольник»?

5 Каково соотношение действующих значений фазного и линейного токов симметричного приёмника, соединенного по схеме «треугольник»?

6 В какой взаимосвязи находятся комплексные значения фазных и линейных токов при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?

7 Как строится векторная диаграмма напряжений и токов трёхфазной электрической цепи при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?

8 Определите действующее значение линейного тока в симметричной трёхфазной цепи, соединенной по схеме «треугольник», если действующее значение фазного тока равно 1,73 А.

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1 Цель работы

Экспериментальное подтверждение теоретических методов линеаризации и аппроксимации вольтамперных характеристик нелинейных элементов, а также методов расчета цепей постоянного тока при наличии нелинейных элементов.

2 Основные положения теории

Нелинейными элементами (НЭ) электрической цепи постоянного тока называются такие элементы, у которых зависимость тока от приложенного напряжения является нелинейной, т.е. выражается графиком, отличающимся от прямой линии. Графики $U(I)$ или $I(U)$ называют вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

Если измерения проводились при постоянном токе и напряжении, то характеристика нелинейного элемента называется *статической*.

Для получения статических характеристик нелинейных элементов необходимо измерить ряд значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи со схемой замещения (рисунок 9.1).

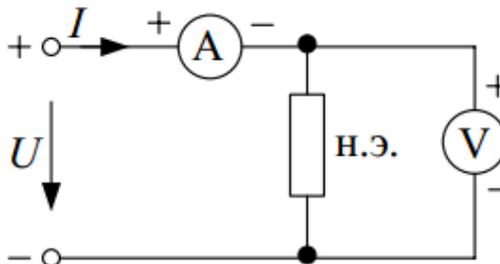


Рисунок 9.1 – Электрическая схема замещения для определения вольт-амперной характеристики нелинейного элемента

В зависимости от вида этих характеристик различают НЭ с *симметричной* и *несимметричной* вольт-амперными характеристиками. Нелинейные элементы, у которых ВАХ не зависит от направления тока (или напряжения), называются симметричными. Примером могут служить электрические лампы накаливания. У несимметричных нелинейных элементов ВАХ зависит от направления тока. Примером последних могут служить различные диоды (полупроводниковые). На рисунке 9.2 приведены ВАХ лампы накаливания (симметричная характеристика) и диода (несимметричная характеристика).

Наиболее общим методом расчёта электрических цепей с НЭ является графический. При последовательном соединении двух НЭ через них проходит один и тот же ток, а сумма напряжений на них равна приложенному напряжению. Поэтому суммарную результирующую ВАХ последовательного соедине-

ния НЭ можно построить, суммируя напряжения ВАХ обоих НЭ для одного и того же значения тока.

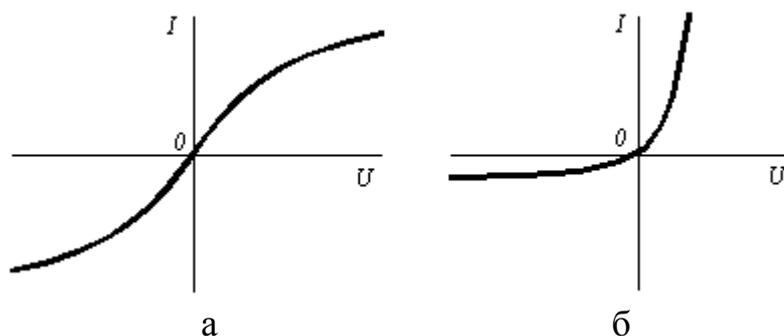


Рисунок 9.2 – ВАХ нелинейных элементов: а – лампы накаливания; б – диода

При параллельном соединении двух НЭ напряжение на них одно и то же, а ток источника равен сумме токов обоих НЭ. Суммарная ВАХ может быть построена путём сложения токов обоих НЭ при одном и том же значении напряжения.

При анализе смешанного соединения сначала находят ВАХ параллельного соединения R и $HЭ2$ (на рисунке 9.3, б эта характеристика построена суммированием ординат характеристик R и $HЭ2$ и обозначается $R, HЭ2$). Затем строят общую ВАХ цепи, складывая абсциссы ВАХ параллельного соединения $R, HЭ2$ и ВАХ $HЭ1$.

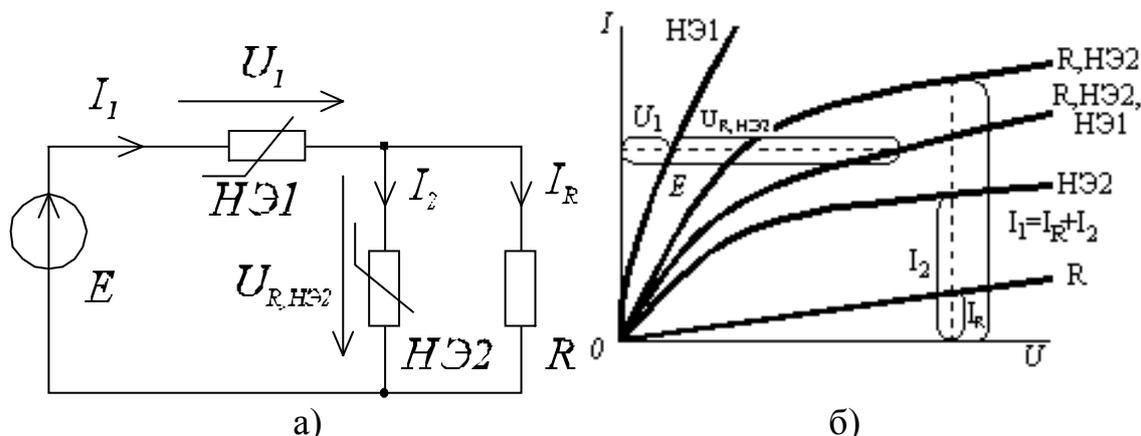


Рисунок 9.3 – Расчёт цепи с НЭ при смешанном соединении:
а – смешанное соединение НЭ; б – графическое решение

По полученным характеристикам можно легко определить токи и напряжения всех элементов цепи. Например, по обозначенному на рисунке 9.3, б значению E и характеристикам $HЭ1$ и $R, HЭ2$ можно найти напряжение U_1 и $U_{R,HЭ2}$ и т.д.

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования являются цепи постоянного тока, содержащие нелинейные элементы: лампа сигнальная, диод и стабилитрон.

В лабораторной работе источником постоянного тока служат два генератора постоянных напряжений из БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ: регулируемый генератор (0...15 В) и нерегулируемый (15 В). Для получения на-

пряжения до 30 В их следует соединять последовательно. Для получения напряжения от 0 до 15 В следует установить тумблер SA1 на источнике 15 В в нижнее положение, а тумблер SA2 на источнике 0...15 В установить в верхнее положение. Для получения напряжения выше 15 В, оба тумблера установить в верхнее положение (рисунок Г.1).

В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры для измерения напряжений и токов.

4 Расчётно-графическая часть

Входное напряжение для исследуемой цепи (рисунок 9.3) представлено в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Исходные данные

№ бригады	1	2	3	4	5	6
$U_{ex}, В$	10	8	6	12	9	7

4.1 Нарисовать качественно вольтамперные характеристики нелинейных двухполюсников, содержащих нелинейные элементы $HЭ1$ и $HЭ2$ при $R = 470$ Ом. Напряжение на входе двухполюсников меняется от 0 до ± 20 В. ВАХ нелинейных элементов представлены на рисунке 9.4, а и б. (1 клетка соответствует 1 В и 1 мА соответственно).

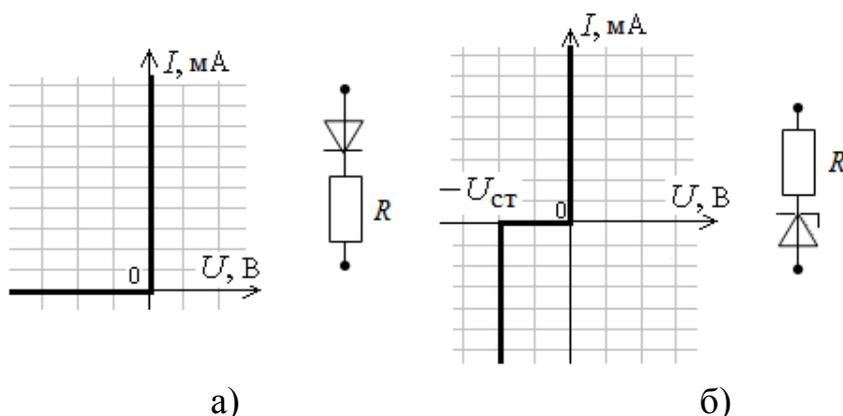


Рисунок 9.4 – Вольтамперные характеристики нелинейных элементов $HЭ1$ и $HЭ2$ и их схемы включения

5 Экспериментальная часть

5.1 Определение ВАХ лампы накаливания

5.1.1 Собрать схему цепи согласно рисунку Г.1 (приложение Г). В качестве $HЭ1$ выбрать лампу сигнальную, обозначенную в модуле НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ как HL . Установить величину сопротивления $R1 = 10$ Ом в блоке МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ,

тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.4 Тумблер SA1 на источнике напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ (рисунок Г.1, приложение Г) установить в нижнее положение, а тумблер SA2 на источнике напряжения 0...15 В установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений $U_{ex} = 0$. Плавно изменяя регулятором напряжения от 0 до 15 В с шагом 1 В экспериментально получить статическую характеристику НЭ1. Все измеренные величины занести в таблицу Г.2 протокола испытаний. Построить на миллиметровой бумаге зависимость $U_{НЭ1}(I)$ лампы накаливания.

5.2 Определение ВАХ полупроводникового диода

5.2.1 Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рисунке Г.2 (приложение Г). Установить величину сопротивления $R2 = 1$ кОм в блоке МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ

5.2.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.2.3 Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ, тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.2.4 Тумблер SA1 на источнике напряжения 15 В ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ установить в нижнее положение, а тумблер SA2 на источнике 0...15 В установить в верхнее положение. Установить напряжение на регулируемом генераторе постоянных напряжений $U_{ex} = 0$. Плавно изменяя регулятором напряжения от 0 до 15 В с шагом 1 В экспериментально получить статическую характеристику НЭ2. Измеренные величины занести в таблицу Г.3 протокола испытаний. Построить на миллиметровой бумаге зависимость $U_{НЭ2}(I)$.

5.2.5 На миллиметровой бумаге в одной системе координат I, U построить три графические зависимости $U_{НЭ1}(I)$, $U_{НЭ2}(I)$ и $U_{R3}(I)$. Величину $R3$ принять равной 470 Ом.

5.2.6 Рассчитать графо-аналитическим методом токи в ветвях схемы и падения напряжений на каждом элементе, если НЭ1 соединен последовательно с параллельно соединенными НЭ2 и $R3$ при входном напряжении U_{ex} принятом согласно таблице Г.1. Полученные результаты занести в таблицу Г.4 протокола испытаний.

5.3 Определение результирующей ВАХ смешанной цепи

5.3.1 Собрать электрическую цепь согласно схемы представленной на рисунке Г.3 (приложение Г).

5.3.2 Рукояткой регулируемого источника напряжения (рисунок Г.3) по мультиметру PV1, включённому в режим измерения постоянного напряжения, установить величину U_{ex} согласно таблице Г.1.

5.3.3 Измерить токи в ветвях схемы и падения напряжений между точка-

ми ac и cd (рисунок Г.3). Для измерения токов использовать мультиметр РА1 включенный в режим измерения постоянного тока, поочередно подключая его в разрыв соответствующих ветвей, и мультиметр PV2, включенный в режим измерения постоянного напряжения, подключая его к точкам ac и cd . Полученные результаты занести в таблицу Г.5 протокола испытаний.

5.4 Определение ВАХ параметрического стабилизатора напряжений

5.4.1 Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения, представленную на рисунке Г.4, подключив входные зажимы цепи к регулируемому источнику постоянного напряжения. Установить величину балластного сопротивления $R_{\sigma} = 220 \text{ Ом}$.

5.4.2 Плавно изменяя регулятором входное напряжение $U_{\text{вх}}$ от 0 до 20 В с шагом 1,0 В (по мультиметру PV1), измерить величину тока i (по мультиметру РА1) и соответствующее ему выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ (по мультиметру PV2) при $R_{\text{н}} = \infty$. Результаты измерений занести в таблицу Г.6.

5.4.3 Установить величину сопротивления нагрузки $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ и повторить измерения согласно п.5.4.2. Результаты измерений занести в таблицу Г.7.

5.4.4 Согласовать полученные результаты измерений с преподавателем и утвердить протокол испытаний. Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

5.4.5 По результатам таблиц Г.6 и Г.7 построить:

- ВАХ стабилизатора $U_{\text{вых}}(I)$ при $R_{\text{н}} = \infty$;
- в одной системе координат графические зависимости $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ в режиме холостого хода (при $R_{\text{н}} = \infty$) и в режиме нагрузки (при $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$).

6 Содержание отчёта

Отчет должен содержать титульный лист установленного образца (приложение А), цель работы, схемы исследуемых электрических цепей, таблицы результатов полученных измерений и выполненных расчётов, ВАХ элементов в соответствующих координатных осях, выводы по работе.

7 Контрольные вопросы

1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?
2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.
3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?
4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?
5. Как построить ВАХу последовательного соединения нелинейных элементов?
6. Как построить ВАХ характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

1 Цель работы

1 Экспериментальное подтверждение свойств симметричных и несимметричных пассивных четырехполюсников.

2 Овладение экспериментальными методами определения параметров – коэффициентов четырехполюсников и их основных характеристик

2 Основные положения теории

2.1 Основные уравнения четырехполюсника

Связь между входными и выходными напряжениями и токами \underline{U}_1 и \underline{I}_1 , \underline{U}_2 и \underline{I}_2 линейного пассивного четырехполюсника (при положительных направлениях напряжений и токов, указанных на рисунке 10.1) может быть выражена одной из следующих шести форм основных уравнений:

Форма \underline{Y} :

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

Форма \underline{Z} :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.2)$$

Форма \underline{H} :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.3)$$

Форма \underline{F} :

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{F}_{11}\underline{U}_1 + \underline{F}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{F}_{21}\underline{I}_1 + \underline{F}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.4)$$

Форма \underline{A} :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.5)$$

Форма \underline{B} :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{B}_{11}\underline{U}_1 + \underline{B}_{12}\underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 &= \underline{B}_{21}\underline{U}_1 + \underline{B}_{22}\underline{I}_1 \end{aligned} \right\} \quad (10.6)$$

Вместо коэффициентов $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}, \underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}$ используется часто их запись в виде $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$.

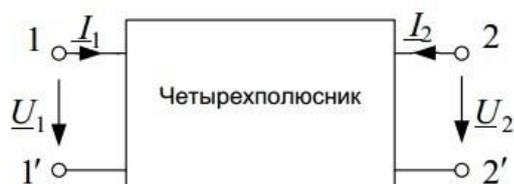


Рисунок 10.1 – Пассивный четырехполюсник

При выбранных положительных направлениях напряжений и токов, согласно рисунку 10.1, при нагрузке четырехполюсника со стороны вторичных зажимов на сопротивление \underline{Z}_f , последнее связано с выходным напряжением и током соотношением:

$$\underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_H. \quad (10.7)$$

Коэффициенты основных уравнений четырехполюсника (10.1-10.6) называются *параметрами четырехполюсника*. Они определяются только схемой самого четырехполюсника. В общем случае все коэффициенты четырехполюсника комплексны.

2.2 Способы определения коэффициентов четырехполюсника

Коэффициенты четырехполюсника могут быть определены различными способами:

1) составлением уравнений по законам Кирхгофа (либо методом контурных токов или узловых потенциалов) и представлением их решения в виде одной из форм уравнений (10.1-10.6);

2) по значениям напряжений и токов в режимах холостого хода и короткого замыкания (см. формулы (10.8-10.13));

3) разбивкой сложного четырёхполюсника на более простые четырёхполюсники, параметры которых известны;

4) способом эквивалентных преобразований (например, путём преобразования треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду).

Коэффициенты четырёхполюсника могут быть определены по известным напряжениям и токам в режимах холостого хода и короткого замыкания по формулам, которые получаются из формул (10.1-10.6):

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \left(\frac{i_1}{\dot{U}_1} \right)_{U_2=0}; \quad \underline{Y}_{12} = \left(\frac{i_1}{\dot{U}_2} \right)_{U_1=0}; \\ \underline{Y}_{21} &= \left(\frac{i_2}{\dot{U}_1} \right)_{U_2=0}; \quad \underline{Y}_{22} = \left(\frac{i_2}{\dot{U}_2} \right)_{U_1=0}. \end{aligned} \quad (10.8)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} &= \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{Z}_{12} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right)_{I_1=0}; \\ \underline{Z}_{21} &= \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{Z}_{22} = \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right)_{I_1=0}. \end{aligned} \quad (10.9)$$

$$\begin{aligned} \underline{H}_{11} &= \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right)_{U_2=0}; \underline{H}_{12} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_1=0}; \\ \underline{H}_{21} &= \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right)_{U_2=0}; \underline{H}_{22} = \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right)_{I_1=0}. \end{aligned} \quad (10.10)$$

$$\begin{aligned} \underline{F}_{11} &= \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{F}_{12} = \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right)_{U_1=0}; \\ \underline{F}_{21} &= \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right)_{I_2=0}; \underline{F}_{22} = \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right)_{U_1=0}. \end{aligned} \quad (10.11)$$

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_2=0}; \underline{B} = \left(\frac{\dot{U}_1}{-\dot{I}_1} \right)_{U_2=0}; \\ \underline{C} &= \left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_2=0}; \underline{D} = \left(\frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2} \right)_{U_2=0}. \end{aligned} \quad (10.12)$$

$$\begin{aligned} \underline{B}_{11} &= \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right)_{I_1=0}; \underline{B}_{12} = \left(\frac{\dot{U}_2}{-\dot{I}_1} \right)_{U_1=0}; \\ \underline{B}_{21} &= \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right)_{I_1=0}; \underline{B}_{22} = \left(\frac{\dot{I}_2}{-\dot{I}_1} \right)_{U_1=0}. \end{aligned} \quad (10.13)$$

2.3 Виды соединения четырехполюсников

Несколько четырёхполюсников могут быть соединены между собой различными способами: параллельно, последовательно, последовательно-параллельно, параллельно-последовательно а также каскадно (в виде цепочки). На рисунке 10.2 приведён пример каскадного соединения двух четырёхполюсников, коэффициенты которых выражены в форме \underline{A} . При этом матричное уравнение параметров полученного сложного четырёхполюсника будет иметь вид:

$$[\underline{A}] = [\underline{A}'] + [\underline{A}''].$$

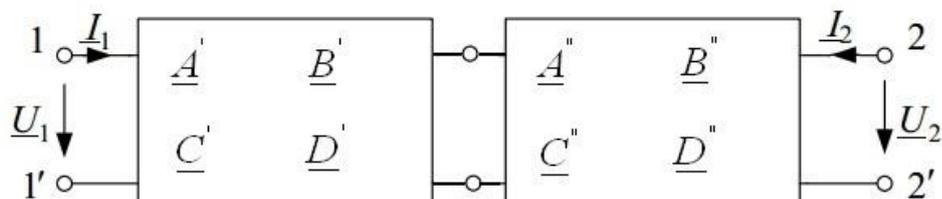


Рисунок 10.2 – Каскадное соединение четырёхполюсников

Откуда следует матричная форма записи основных уравнений четырёх-полюсника:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} = [\underline{A}] \times \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix}.$$

Аналогичные формулы справедливы при соединении любого числа четырёхполюсников.

Следует иметь в виду, что указанные формулы нахождения матриц сложных четырёхполюсников справедливы лишь при выполнении условий регулярности их соединения. Соединение четырёхполюсника регулярно в случае, когда токи, протекающие через оба первичных зажима каждого их четырёхполюсников, равны по величине и обратны по направлению.

2.4 Характеристические параметры четырёхполюсника

Помимо параметров, указанных в п. 2.1, применяются характеристические параметры четырёхполюсника: характеристические сопротивления \underline{Z}_{1c} , \underline{Z}_{2c} , и характеристическая постоянная передачи g , которые также полностью характеризуют четырёхполюсник.

Характеристическими называются два сопротивления \underline{Z}_{1c} и \underline{Z}_{2c} , обладающие следующим свойством: входное сопротивление четырёхполюсника со стороны зажимов 1–1' при подключении к зажимам 2–2' сопротивления \underline{Z}_{2c} , равно \underline{Z}_{1c} , и наоборот, при подключении к зажимам 1–1' сопротивления \underline{Z}_{1c} входное сопротивление четырёхполюсника со стороны зажимов 2–2' равно \underline{Z}_{2c} .

Режим работы четырёхполюсника, нагруженного соответствующим характеристическим сопротивлением, называется согласованным.

Постоянная передачи:

$$g = a + jb \quad (10.14)$$

где a – характеристическое (собственное) затухание, Нп или dB ,
 b – характеристический (собственный) коэффициент фазы, рад или град.

$$e^g = (\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}}). \quad (10.15)$$

Для вычисления g согласно (10.15), следует вычислить комплекс

$$\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}} = Ae^\varphi,$$

представив его в показательной форме. С учётом (10.14), (10.15) получаем

$$e^a e^{jb} = Ae^\varphi \quad (10.16)$$

откуда $b = \varphi$; $a = \ln(A)$, Нп.

Характеристические параметры можно определить через параметры формы \underline{A} :

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{AB}{CD}}, \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{DB}{CA}}; \quad (10.17)$$

$$th(g) = \sqrt{\frac{BC}{AD}}, \quad g = \ln(\sqrt{AD} + \sqrt{BC}) \quad (10.18)$$

и наоборот коэффициенты формы \underline{A} могут быть выражены через характеристические параметры:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} ch(g); \underline{B} = \sqrt{\underline{Z}_{1C} \underline{Z}_{2C}} sh(g) \\ \underline{C} &= \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_{1C} \underline{Z}_{2C}}} sh(g); \underline{D} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{2C}}{\underline{Z}_{1C}}} ch(g). \end{aligned} \right\} \quad (10.19)$$

2.5 Согласованный режим работы четырехполюсника

В этом случае связь между комплексами токов и напряжений на входе и выходе задается соотношениями:

$$\underline{U}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} \underline{U}_2 \cdot e^g; \quad \underline{I}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1C}}{\underline{Z}_{2C}}} \underline{I}_2 e^g, \quad (10.20)$$

а для модулей действующих значений

$$U_1 = \sqrt{\frac{z_{1C}}{z_{2C}}} U_2 \cdot e^a \quad I_1 = \sqrt{\frac{z_{1C}}{z_{2C}}} I_2 e^a. \quad (10.21)$$

Все входящие в формулу (10.21) величины чисто вещественные.

Для симметричных четырёхполюсников $\underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_{2C}$, поэтому выражение (10.21) переписется в виде:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot e^g, \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cdot e^g. \quad (10.23)$$

Обозначив

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{\varphi_{U_1}}, \dot{U}_2 = U_2 e^{\varphi_{U_2}}, \dot{I}_1 = I_1 e^{\varphi_{I_1}}, \dot{I}_2 = I_2 e^{\varphi_{I_2}}, \dot{I}_2 = I_2 e^{\varphi_{I_2}}$$

на основе выражения (10.23), получим:

$$\frac{U_1}{U_2} e^{(\varphi_{U_1} - \varphi_{U_2})} = e^a e^{jb}; \quad \frac{I_1}{I_2} e^{(\varphi_{I_1} - \varphi_{I_2})} = e^a e^{jb}$$

откуда для симметричного четырёхполюсника

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = e^a;$$

$$\varphi_{U_1} - \varphi_{U_2} = \varphi_{I_1} - \varphi_{I_2} = b. \quad (10.24)$$

Выражения (10.24) раскрывают физический смысл коэффициентов a и b ; величина e^a показывает, во сколько раз величины тока и напряжения на выходе четырёхполосника меньше, чем соответствующие значения на входе, т.е. во сколько раз затухает сигнал, проходя через четырёхполосник, работающий в согласованном режиме. Коэффициент фазы показывает, каков фазовый сдвиг между напряжением на входе и выходе, или между током на входе и выходе в согласованном режиме (не путать с фазовым сдвигом между напряжением и током).

2.6 Параметры холостого хода и короткого замыкания

В расчётах используются также параметры холостого хода \underline{Z}_{1XX} , \underline{Z}_{2XX} и короткого замыкания \underline{Z}_{1K3} , \underline{Z}_{2K3} , измеренные соответственно со стороны первичных и вторичных зажимов, которые связаны между собой соотношением:

$$\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX}} = \frac{\underline{Z}_{1K3}}{\underline{Z}_{2K3}}. \quad (10.25)$$

Характеристические параметры выражаются через параметры холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\underline{Z}_{1XX}\underline{Z}_{1KK}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\underline{Z}_{2XX}\underline{Z}_{2KK}}; \quad (10.26)$$

$$th(g) = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1K3}}{\underline{Z}_{1XX}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{2K3}}{\underline{Z}_{2XX}}}. \quad (10.27)$$

Сопротивления холостого хода и короткого замыкания определяются через характеристические параметры или коэффициенты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} .

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{1XX} &= \underline{Z}_{1C}cth(g) = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}; \\ \underline{Z}_{1K3} &= \underline{Z}_{1C}th(g) = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}; \\ \underline{Z}_{2XX} &= \underline{Z}_{2C}cth(g) = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}; \\ \underline{Z}_{2K3} &= \underline{Z}_{2C}th(g) = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.28)$$

Коэффициенты \underline{A} четырёхполосника вычисляются по сопротивлениям холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{A} = \pm \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1XX}}{(\underline{Z}_{2XX} - \underline{Z}_{2K3})}};$$

$$\underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2K3};$$

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

$$\underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1K3}} . \quad (10.29)$$

Пассивный линейный четырехполюсник можно заменить Т- или П-образной схемой замещения. На рисунке 10.3 приведена Т-образная схема замещения.

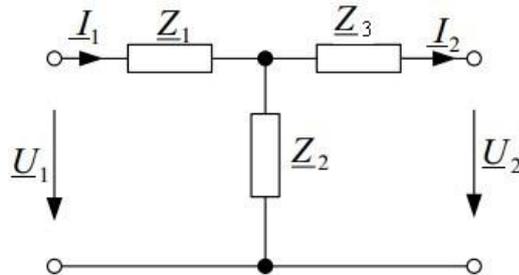


Рисунок 10.3 – Т-образная схема замещения четырехполюсника

Параметры – коэффициенты $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ Т-образного четырехполюсника определяются согласно выражениям [2]:

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} ; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} ; \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_2} ; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} . \quad (10.30)$$

На рисунке 10.4 представлена П-образная схема замещения четырёхполюсника

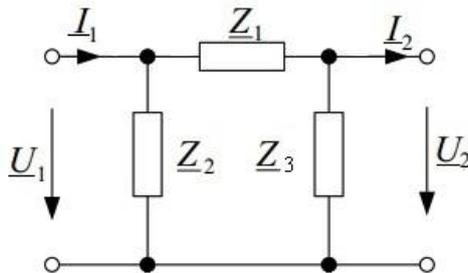


Рисунок 10.4 – П-образная схема замещения четырёхполюсника

Параметры – коэффициенты $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ П-образного четырёхполюсника определяются по следующим формулам [2]:

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} ; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 ; \quad \underline{C} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3} ; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} . \quad (10.31)$$

2.7 Симметричные четырёхполюсники

В частном случае при наличии симметричного четырёхполюсника, все приведенные выше формулы упрощаются, если учесть, что при этом имеются равенства:

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} = \underline{D}; \underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_{2C} = \underline{Z}_C \\ \underline{Z}_{1XX} = \underline{Z}_{2XX} = \underline{Z}_{XX}; \underline{Z}_{1K3} = \underline{Z}_{2K3} = \underline{Z}_{K3} \end{aligned} \right\}$$

2.8 Эквивалентность четырёхполюсников

Четырёхполюсники эквивалентны, если они имеют одинаковые:

- параметры коэффициентов одной из форм основных уравнений ($\underline{Y}, \underline{Z}, \underline{H}, \underline{A}, \underline{B}$);
- характеристические параметры;
- параметры холостого хода и короткого замыкания.

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования являются несимметричный и симметричный четырёхполюсники подключаемые к сети переменного тока. Четырёхполюсник собирают из элементов миниблоков резисторов, индуктивностей и емкостей в соответствии с рисунков Д.3-Д.4, приведенными в протоколе испытаний (приложение Д).

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является БЛОК ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 для измерения напряжений и токов и встроенный ваттметр для измерения активной мощности.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Определить параметры-коэффициенты $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ Т-образного четырёхполюсника (рисунок Д.1), используя формулы (10.30). Параметры R, L, C заданы в таблице 10.1 (X_L и X_C рассчитать при частоте f).

Проверить правильность расчёта по формуле $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$.

Таблица 10.1

№ бригады	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	f , кГц	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм
1	10	10	0,22	2,0	4,7	1	1
2	33	10	0,47	1,0	10	4,7	4,7
3	22	100	0,47	0,5	22	10	10
4	22	40	0,1	1,5	2,2	1	1

4.2 По рассчитанным в п. 4.1 коэффициентам определить сопротивление холостого хода и короткого замыкания со стороны первичных и вторичных зажимов четырёхполюсника по формуле (10.28).

Правильность расчёта проверить по формуле:

$$\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX}} = \frac{\underline{Z}_{1K3}}{\underline{Z}_{2K3}}$$

4.3 Начертить П-образную схему симметричного четырёхполюсника, со-

ставленного из сопротивлений R_1, R_2, R_3 , значения которых приведены в таблице 10.1. Рассчитать для этого четырёхполюсника коэффициенты A, B, C, D по формуле (10.31), а также характеристическое сопротивление Z_c и коэффициент передачи $g = a + jb$ по формулам (10.17), (10.18). Полученные результаты занести в таблицу . 3 протокола измерений.

5 Экспериментальная часть

5.1 Исследование Т-образного четырёхполюсника

5.1.1 Собрать схему цепи несимметричного пассивного четырёхполюсника рисунок Д.3.

Установить заданные в таблице 10.1 величины R, L, C , из миниблоков резисторов и реактивных элементов. Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Переключатель ФОРМА модуля ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ установить в положение «~». Настроить генератор на частоту f согласно таблице Д.1 и действующее значение напряжения $U_1 = 6-10$ В. Записать данные в таблицу Д.2 протокола испытаний.

5.1.2 Подключив ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ к первичным зажимам 1 и 1' четырёхполюсника (рисунок Д3) выполнить опыт прямого холостого хода, для чего разомкнуть зажимы 2 и 2'. Экспериментально определить модуль комплексного сопротивления Z_{1XX} .

$$Z_{1XX} = \frac{U_{1XX}}{I_{1XX}}.$$

Для измерения действующих значений напряжения U_1 и тока I_1 использовать мультиметры. Полученные результаты занести в таблицу Д.2 протокола испытаний.

5.1.3 Произвести опыт короткого замыкания, для чего замкнуть зажимы 2 и 2' проводником, и повторить все измерения п. 5.1.2. Экспериментально определить модуль комплексного сопротивления Z_{1K3} . Полученные результаты занести в таблицу Д.2 протокола испытаний.

$$Z_{1K3} = \frac{U_{1K3}}{I_{1K3}}.$$

5.1.4 Поменять местами входные 1-1' и выходные 2-2' зажимы (рисунок Д.3). Выполнить опыты обратного холостого хода и короткого замыкания. Экспериментально определить модули комплексных сопротивлений Z_{2XX} и Z_{2K3} . Измеренные величины занести в таблицу Д.2.

$$Z_{2XX} = \frac{U_{2XX}}{I_{2XX}}; \quad Z_{2K3} = \frac{U_{2K3}}{I_{2K3}}.$$

5.1.5 Сравнить полученные значения $Z_{1XX}, Z_{1K3}, Z_{2XX}, Z_{2K3}$, с полученными

ми в п. 4.2. Проверить выполнение соотношения (10.25).

5.1.6 Собрать схему симметричного четырёхполюсника по п. 4.3 (рисунок Д.4). Опытным путём (из опытов ХХ и КЗ) определить сопротивления Z_{1XX} , $Z_{1KЗ}$, Z_{2XX} , $Z_{2KЗ}$ этого четырёхполюсника, а по ним, используя выражение (10.29), коэффициенты A , B , C , D . Полученные результаты занести в таблицу Д.4, сравнить их с расчётными значениями в таблице Д.3.

5.1.7 Из миниблоков резисторов взять потенциометр (переменное сопротивление), подключить к нему мультиметр, включенный на измерение сопротивления (рисунок Д.7). Установить по мультиметру сопротивление потенциометра равное характеристическому, рассчитанному в п. 4.3. Подключить его к зажимам 2-2' (рисунок Д.6). Экспериментальным путём убедиться в правильности расчёта Z_C (см. п. 2.4). Результаты занести в таблицу Д.5.

5.1.8 Опытным путём определить для рассматриваемого в предыдущем пункте четырёхполюсника его коэффициент передачи, используя выражение (10.24), и сравнить полученное значение с расчётным в п. 4.3. Результаты занести в таблицу Д.5.

5.1.9 Согласовать с преподавателем полученные результаты и утвердить протокол к лабораторной работе.

5.1.10. Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, выводы по лабораторной работе.

7 Контрольные вопросы

- 1 Что такое пассивный четырёхполюсник?
- 2 Какой четырёхполюсник называется симметричным?
- 3 Как проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания? Что при этом должно быть измерено?
- 4 Как проводится измерение сдвига по фазе между током и напряжением?
- 5 Сколькими независимыми параметрами (коэффициентами) характеризуется пассивный четырёхполюсник?
- 6 Изложите суть характеристического сопротивления и коэффициента передачи симметричного четырёхполюсника.
- 7 Какие бывают соединения четырёхполюсников?
- 8 Может ли в активном четырёхполюснике активная мощность на выходе быть больше активной мощности на его входе?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

1 Цель работы

Экспериментальное подтверждение метода расчёта цепи несинусоидального периодического тока и овладение экспериментальными методами исследования параметров цепей на форму несинусоидальных периодических кривых напряжений и тока.

2 Основные положения теории

Любую периодическую несинусоидальную функцию, например, напряжения

$$u(t) = u(t + T),$$

где T – период,

можно представить тригонометрическим рядом Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_0^{\infty} (B_K \sin k\omega t + C_K \cos k\omega t), \quad (11.1)$$

где U_0 – постоянная составляющие;

$B_K \sin k\omega t$, $C_K \cos k\omega t$ – гармонические составляющие.

Гармоническая составляющая, период T которой равен периоду $u(t)$, называется основной. Остальные гармоники называются высшими. Расчёт линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока основан на принципе наложения. Расчёт цепи ведут отдельно для постоянной составляющей, основной и двух-трёх высших гармоник.

Для расчёта токов и напряжений гармонических составляющих используют комплексный метод расчёта. При этом следует иметь в виду, что комплексные сопротивления индуктивности и ёмкости

$$\underline{Z}_L(k\omega) = j\omega L = jx_L(k\omega) \text{ и } \underline{Z}_C(k\omega) = \frac{1}{j\omega C} = -jx_C(k\omega)$$

зависят от номера k гармоники. Принцип наложения справедлив только для мгновенных значений несинусоидальных токов и напряжений. Ток и напряжение ветви:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n i_k k\omega t; \quad u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n u_k k\omega t, \quad (11.2)$$

где n – номер последней высшей гармоники, принятой в расчёте.

Действующее значение (например, тока $i(t)$) рассчитывается по формуле:

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}, \quad (11.3)$$

где I_0 – постоянная составляющая;

I_k – действующее значение k -й гармоники.

Активная мощность цепи равна сумме активных мощностей постоянной и гармонических составляющих

$$\begin{aligned} P &= P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k = \\ &= U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n \end{aligned} \quad (11.4)$$

Реактивная и полная мощность определяется по формулам:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{k=1}^n U_k I_k \sin \varphi_k = \\ &= U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_n I_n \sin \varphi_n; \end{aligned} \quad (11.5)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{(U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots)(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)}, \quad (11.6)$$

где $I = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_k^2}$, $U = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2}$ – соответственно действующие значения тока и напряжения.

Для оценки степени отличия несинусоидальной кривой от синусоиды используют коэффициенты:

- формы

$$k_\phi = \frac{I}{I_{cp}}, \quad (11.7)$$

где $I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$ – средне выпрямленное значение тока;

- амплитуды

$$k_a = \frac{I_m}{I}, \quad (11.8)$$

где I_m – максимальное значение несинусоидального тока;

- искажения синусоидальности формы кривой функции

$$k_{ucI} = \frac{I}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2}}{I_1}, \quad (11.9)$$

где I_1 – действующее значение тока основной гармоники.

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является электрическая цепь, состоящая из, последовательно соединенных резистора, индуктивности и конденсатора, подключенная к источнику несинусоидального периодического напряжения. В лабораторной работе экспериментально подтверждается метод расчёта цепи несинусоидального тока, основанный на принципе наложения. Проводится два опыта.

Источником несинусоидального и синусоидального напряжения в лабораторной работе является ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ в БЛОКЕ ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. В качестве электроизмерительных приборов используются мультиметры типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ и встроенный ВАТТМЕТР для измерения активной мощности. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из миниблоков резисторов, индуктивностей и ёмкостей.

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для напряжения прямоугольной формы без постоянной составляющей (меандр) (рисунок 11.1) записать ряд Фурье, ограничиваясь пятью слагаемыми [1]. Построить в масштабе спектр амплитуд, полагая амплитуду основной гармоники равной единице.

4.2 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 11.2, рассчитать методом наложения мгновенные и действующие значения тока и напряжений на выходе генератора и на ёмкости, а также активную мощность, если на выходе генератора напряжение в форме меандра. Расчёт выполнить в комплексной форме для 1-й, 3-й и 5-й гармоник используя выражения (11.3) и (11.4). Параметры цепи представлены в таблице 11.1. Амплитудное значение напряжения на выходе генератора принять равным 8 В. Результаты расчёта записать в таблицу Е.2 протокола испытаний.

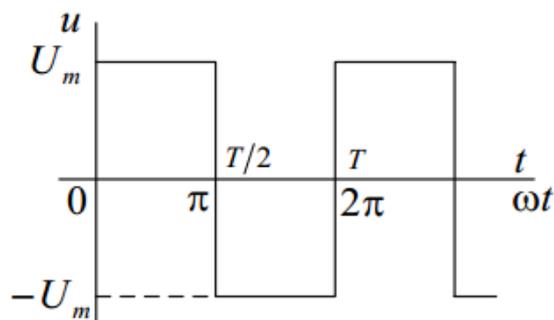


Рисунок 11.1 – График $u(t)$ типа меандр

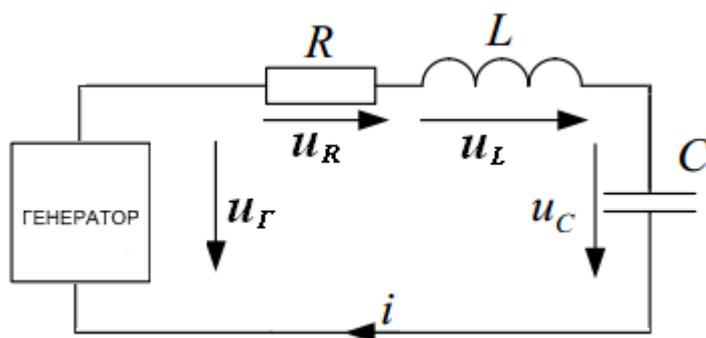


Рисунок 11.2 – Схем замещения исследуемой цепи

Таблица 11.1 – Исходные данные

№ бригады	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	$f_{\text{зад}}$, Гц
1	470	100	1	200
2	220	40	1	300
3	680	10	1	400
4	330	100	1	350

4.3. Нарисовать зависимости:

$$i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(3)}(t), \quad u_c(t) = i_{c(1)}(t) + i_{c(3)}(t).$$

5 Экспериментальная часть

5.1 Собрать схему электрической цепи, изображенную на рисунке Е.2. (приложение Е). Установить заданные в таблице Е.1 величины R , L , C , из микроблоков резисторов и реактивных элементов. Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ, ВАТТМЕТР и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

Переключатель ФОРМА модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ (БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ) установить в положение \square . Регулятором ЧАСТОТА установить частоту $f_{\text{зад}}$ согласно таблице Е.1.

5.2 Включить осциллограф PG (рисунок Е.2). Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки. Подключить ВХОД 1 осциллографа к источнику.

Ручкой настройки горизонтальной развёртки осциллографа установить изображение сигнала на экране таким образом, чтобы полностью был виден один период колебаний. Переключателем усиления сигнала по напряжению установить максимально возможную амплитуду по площади экрана.

Регулятором АМПЛИТУДА модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕ-

ЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ установить по осциллографу величину амплитудного значения входного напряжения $u_m = 8$ В.

В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.

Записать данные в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.3 Подключить ВХОД 1 осциллографа к резистору R . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости $u_R(t)$. На рисунке написать масштаб m_U .

5.4 Подключить ВХОД 1 осциллографа к конденсатору C . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости $u_C(t)$.

5.5 Измерить амперметром РА и вольтметром РВ БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ действующие значения напряжения U_C на конденсаторе C и тока I , а прибором ВАТТМЕТР – активную мощность P . Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.6 Переключатель ФОРМА модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ установить в положение « \sim ». Рассчитать действующие значения гармонических составляющих входного напряжения.

Подключить ВХОД 1 осциллографа к источнику. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения основной гармоники входного напряжения равную

$$U_{(1)} = \frac{4U_m}{\pi}.$$

5.7 Измерить амперметром РА и вольтметром РВ БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ действующие значения напряжения U_C на конденсаторе C и тока i , а прибором ВАТТМЕТР активную мощность P . Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.8 Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ частоту $f = 3f_{\text{зад}}$ Гц. Регулятором АМПЛИТУДА установить на экране осциллографа величину амплитудного значения третьей гармоники входного напряжения равную

$$U_{(3)} = \frac{4U_m}{3\pi}.$$

Выполнить измерения аналогичные п. 5.7. Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.9 Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ частоту $f = 5f_{\text{зад}}$ Гц. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения пятой гармоники входного напряжения равную

$$U_{(5)} = \frac{4U_m}{5\pi}.$$

Выполнить измерения аналогичные п. 5.7. Измеренные значения занести в таблицу Е.2 протокола испытаний.

5.10 Рассчитать по полученным измерениям в п.п. 5.6-5.9 действующие значения тока в цепи, напряжений на выходе генератора и на ёмкости, а также активную мощность по формулам (11.3), (11.4). Полученные результаты занести в таблицу Е.3 протокола испытаний и сравнить их с рассчитанными в п. 4.2 значениями.

5.11 Рассчитать значения коэффициентов искажения k_{ucI} , k_{ucU} по выражению (11.9) и коэффициент амплитуды k_{aU} по выражению (11.8).

5.12 Приложить осциллограммы сигналов к протоколу испытаний и утвердить его у преподавателя.

5.13 Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ, а также тумблеры СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ, БЛОКА ВАТТМЕТР и БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ. Выключить осциллограф.

6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, выводы по лабораторной работе.

7 Контрольные вопросы

1 Что называется действующим значением несинусоидальной периодической величины?

2 Какая особенность ряда Фурье для периодических кривых симметричных относительно оси абсцисс?

3 Изложите порядок расчета линейных цепей при несинусоидальных напряжениях и токах.

4 Какими коэффициентами характеризуется форма периодической несинусоидальной кривой?

5 В каком случае периодическая несинусоидальная кривая не будет содержать постоянной составляющей?

6 Почему формы кривых напряжений на различных участках цепи несинусоидального периодического тока отличаются друг от друга?

7 Как определить частоту периодического напряжения по его осциллограмме?

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

1 Цели работы

1 Экспериментальное подтверждение свойств и режимных параметров линейных цепей при наличии в них переходных процессов.

2 Овладение экспериментальными методами исследования параметров цепей на характер протекания в них переходных процессов.

2 Основные положения теории

Переходным процессом называется переход одного режима работы электрической цепи к другому. Например, включение или выключение лампочки. В общем случае в электротехнике принято, что возникновение переходного процесса связано с явлением коммутации. Принимается допущение, что коммутация начинается в момент времени $t = 0$ и совершается мгновенно: $\Delta t_K = 0$. При этом различают два момента времени: момент времени непосредственно предшествующий коммутации $t(-0)$, или $t(0-)$ и момент времени непосредственно после коммутации $t(0+)$, или $t(+0)$. Предположение $\Delta t_K = 0$ приводит к законам коммутации.

В момент коммутации ток в ветви с индуктивностью не изменяется, т. е.

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

Напряжение на емкости в момент коммутации не изменяется, т. е.

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

Значения $u_C(0)$ и $i_L(0)$ называются независимыми начальными условиями. Для идеальных элементов R , C ток в момент коммутации может меняться скачком, т.е.

$$i_R(+0) \neq i_R(-0); i_C(+0) \neq i_C(-0).$$

Для идеальных элементов R и L в момент коммутации скачком могут меняться напряжения, т.е.

$$u_R(+0) \neq u_R(-0); u_L(+0) \neq u_L(-0).$$

Значения $i_R(+0)$; $i_C(+0)$; $u_R(+0)$; $u_L(+0)$ называются зависимыми начальными условиями.

В переходном процесса мгновенные значения напряжений и токов не являются периодическими функциями времени. Если положительные направления напряжения и тока на элементе одинаковы, то уравнения идеальных элементов имеют вид:

$$u_R(t) = Ri_R(t), \quad u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}, \quad i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}.$$

Переходный процесс в цепи с одним реактивным элементом и источни-

ком постоянного напряжения (тока) описывают линейным неоднородным ($F \neq 0$) дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dx(t)}{dt} + ax(t) = bF.$$

В этом уравнение $x(t) = u_C(t)$ для R - C цепи, $x(t) = i_L(t)$ для R - L цепи. F – постоянная, зависящая от величин напряжения или тока источников, a и b не зависящие от времени коэффициенты.

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$x(t) = x_{CB}(t) + X_{ПП}.$$

Свободная составляющая решения $x_{CB}(t)$ определяется как общее решение однородного дифференциального уравнения.

$$\frac{dx_{CB}(t)}{dt} + ax_{CB}(t) = 0$$

и имеет вид:

$$x_{CB}(t) = Ae^{pt},$$

где A – постоянная интегрирования;

$p = -a$ – корень характеристического уравнения $p + a = 0$.

Величина $\tau = 1/|p|$ имеет размерность времени и называется *постоянной времени*. За интервал времени $\Delta t = \tau$ свободная составляющая решения уменьшается в e раз. Выражение

$$x_{CB}(t) = Ae^{-t/\tau}$$

позволяет оценить длительность $T_{ПП}$ переходного процесса. Можно принять $T_{ПП}$ от 4τ до 5τ .

Величина $X_{ПП}$ является частным решением уравнения

$$\frac{dX_{ПП}}{dt} + aX_{ПП} = bF.$$

Величина $X_{ПП} = \frac{b}{a}F$ не зависит от времени и может быть рассчитана в установленном режиме после коммутации. Общее решение приобретает вид $x(t) = u_C(t)$. Постоянная интегрирования A определяется из независимых начальных условий. При $t = 0$

$$A + X_{ПП} = x(0) \text{ и } A = x(0) - X_{ПП}.$$

3 Объекты исследования и оборудование

Объектом исследования является электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных резистора и индуктивности или резистора и конденсатора, подключенная к источнику постоянного напряжения.

В лабораторной работе источником напряжения является модуль ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Для наблюдения зависимостей от времени используют осциллограф. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из миниблоков резисторов и реактивных элементов. Активное сопротивление R_k катушки измеряют мультиметром типа МУ60 БЛОКА МУЛЬТИМЕТРОВ.

Важно! В работе используются электролитические конденсаторы, поэтому при сборке схемы следует обратить внимание на полярность «+» конденсатора.

Электронный осциллограф позволяет наблюдать периодические процессы. Поэтому в работе исследуется переходный процесс при включении цепи на напряжение в форме однополярных импульсов прямоугольной формы (рисунок 12.1). Если интервал времени $0,5T = T_{III}$ и принять $T_{III} = 5\tau$, то частота следования импульсов

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\tau}. \quad (12.1)$$

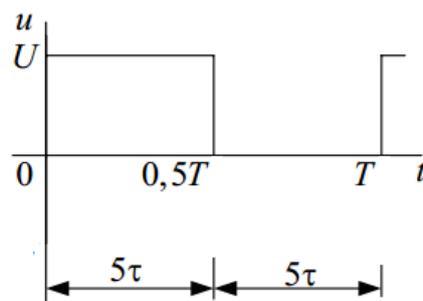


Рисунок 12.1 – Вид напряжения на выходе источника

4 Расчётно-графическая часть

4.1 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 12.2, рассчитать классическим методом в переходном режиме ток, протекающий в схеме и напряжение на реактивном элементе. Параметры цепи представлены в таблице 12.1.

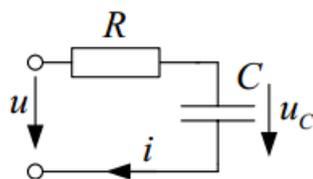


Рисунок 12.2 – Схема замещения исследуемой цепи

4.2 Построить графики переходных процессов рассчитанных тока и напряжения.

Таблица 12.1

№ бригады	R , Ом	C , мкФ	L , мГн	R_1 , Ом	R_2 , Ом
1	330	1	10	17,3	10
2	4700	0,1	40	72,8	10
3	33	10	100	180	10
4	470	1	40	72,8	10

4.3 Рассчитать постоянную времени цепи $\tau_{RC} = RC$ и частоту следования знакопеременных импульсов по выражению (12.1).

4.4 Для электрической цепи, изображенной на рисунке 12.3, рассчитать классическим методом в переходном режиме ток, протекающий в схеме и напряжение на реактивном элементе. Параметры цепи представлены в таблице 12.1.

4.5 Построить графики переходных процессов рассчитанных тока и напряжения.

4.6 Рассчитать постоянную времени цепи

$$\tau_{RL} = \frac{L}{(R_1 + R_2)},$$

а также частоту следования знакопеременных импульсов по формуле (12.1).

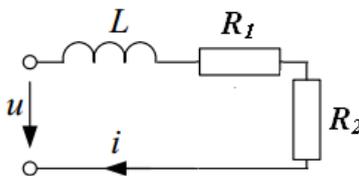


Рисунок 12.3 – Схема замещения исследуемой цепи

5 Экспериментальная часть

5.1 Исследование электрической цепи с R-C элементами

5.1.1 Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке Ж.5 протокола испытаний (приложение Ж). Подключить к выходу модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ цепь R-C.

5.1.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.1.3 Установить заданные по таблице Ж.1 параметры элементов.

5.1.4 Включить автоматический выключатель QF БЛОКА ПИТАНИЯ и тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ. Переключатель ФОРМА включить в положение «П». Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ частоту f , рассчитанную в п. 4.3. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения напряжения $U_m = 5$ В.

5.1.5 Включить осциллограф. Настроить линию нуля. Ручку регулятора вертикальной развертки повернуть по ходу часовой стрелке до упора.

5.1.6 Подключить ВХОД 1 осциллографа к источнику. Настроить переключатель усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб m_U на переключателе усиления по напряжению убедиться, что амплитуда входного напряжения $U_m = 5$ В. В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.

5.1.7 Подключить ВХОД 1 осциллографа к конденсатору C . Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости $u_C(t)$. На рисунке указать выбранный масштаб m_U .

5.2 Исследование электрической цепи с R - L элементами

5.2.1 Подключить к выходу модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ цепь R - L . Измерить мультиметром сопротивление R_K катушки. Резистор $R_{ин} = 10$ Ом взять из микроблоков резисторов.

5.2.2 Предоставить собранную электрическую цепь для проверки преподавателю (или лаборанту).

5.2.3 Установить заданные в таблице Ж.1 параметры элементов.

5.2.4 Регулятором ЧАСТОТА установить на выходе модуля ГЕНЕРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ частоту, рассчитанную в п. 4.6. Регулятором АМПЛИТУДА установить величину амплитудного значения напряжения $U_m = 5$ В.

5.2.5 Подключить ВХОД 1 осциллографа к резистору $R_{ин}$. Срисовать на кальку с экрана осциллографа кривую зависимости $u_{ин}(t)$. На рисунке указать масштаб m_U .

5.2.6 Приложить осциллограммы сигналов к протоколу испытаний.

5.2.7 Согласовать с преподавателем полученные результаты и утвердить протокол к лабораторной работе.

5.2.8 Выключить автоматический выключатель QF БЛОКА МОДУЛЬ ПИТАНИЯ, тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ и осциллограф.

6 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать титульный лист установленного образца, цель работы, схему исследуемой электрической цепи, таблицы результатов полученных измерений и произведённых расчётов, осциллограммы с указанием выбранных масштабов по осям координат, выводы по лабораторной работе.

7 Контрольные вопросы

1 Как составить характеристическое уравнение для заданной цепи?

2 Какова теоретически и практически продолжительность переходных процессов в электрических цепях ?

3 Как формулируется закон коммутации для индуктивности, для ёмкости?

4 Может ли скачкообразно изменяться напряжение на индуктивности?

Обоснуйте теоретически свой ответ.

6.5 Как определяется постоянная времени цепи расчётным и экспериментальным путём?

6 Как определяются зависимые начальные условия ?

7 Как определить принужденные величины ?

8 Почему свободный процесс является затухающим?

9 Какие цепи называют цепями первого порядка?

Приложение Б
Лабораторная работа № 7

Цель работы: _____

Этап Б.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Б.1 – Исходные данные для исследования

$U_\phi,$ В	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1,$ Ом	$R_B=R_2,$ Ом	$R_C=R_3,$ Ом	$R_A=R_1,$ Ом	$R_B=R_2,$ Ом	$R_C=R_3,$ Ом

Напряжения источника: $U_{AN} = \underline{\quad}$ В; $U_{BN} = \underline{\quad}$ В; $U_{CN} = \underline{\quad}$ В.

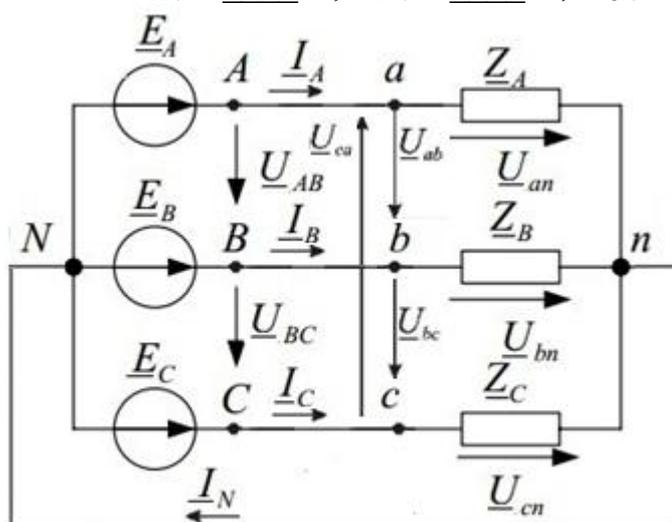


Рисунок Б.1 – Схема замещения исследуемой цепи

Б.1.1 Исследование симметричного режима

Расчёт токов I_A, I_B, I_C, I_N :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_Σ :

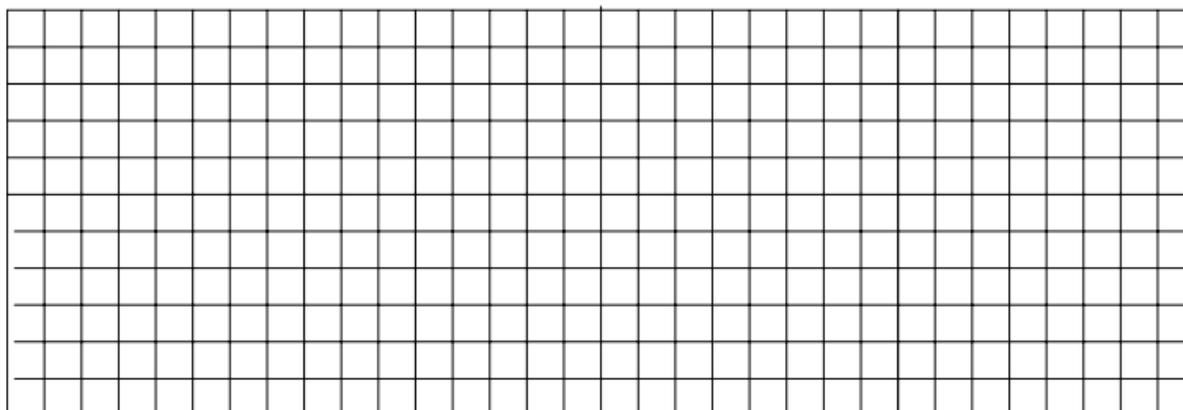


Рисунок Б.2 – Векторная диаграмма симметричного режима

Б.1.2 Исследование режима работы при обрыве фазы «А»

Расчёт токов I_A , I_B , I_C , I_N :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_Σ :

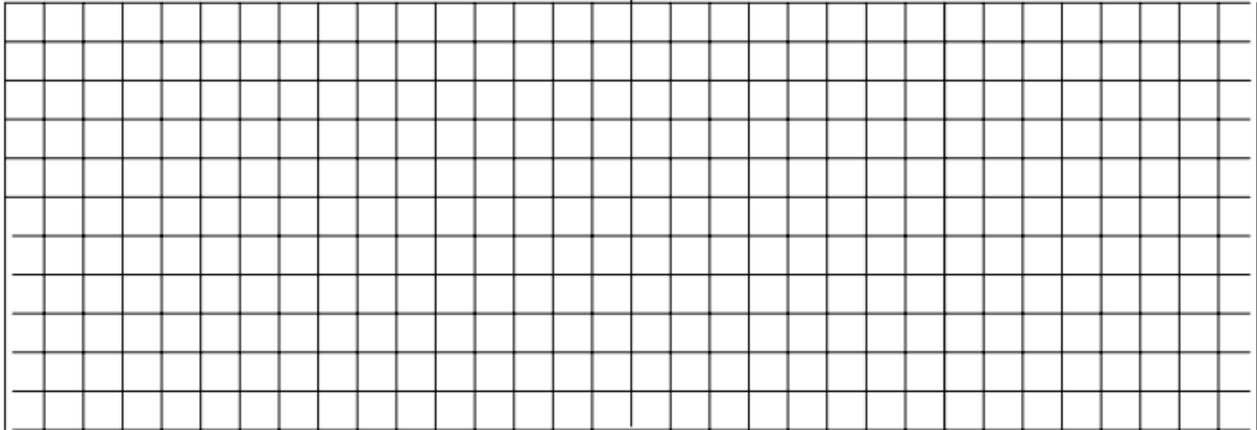


Рисунок Б.3 – Векторная диаграмма при обрыве фазы «А»

Б.1.3 Исследование режима работы без нейтрального провода

Расчёт токов I_A , I_B , I_C , I_N :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_Σ :

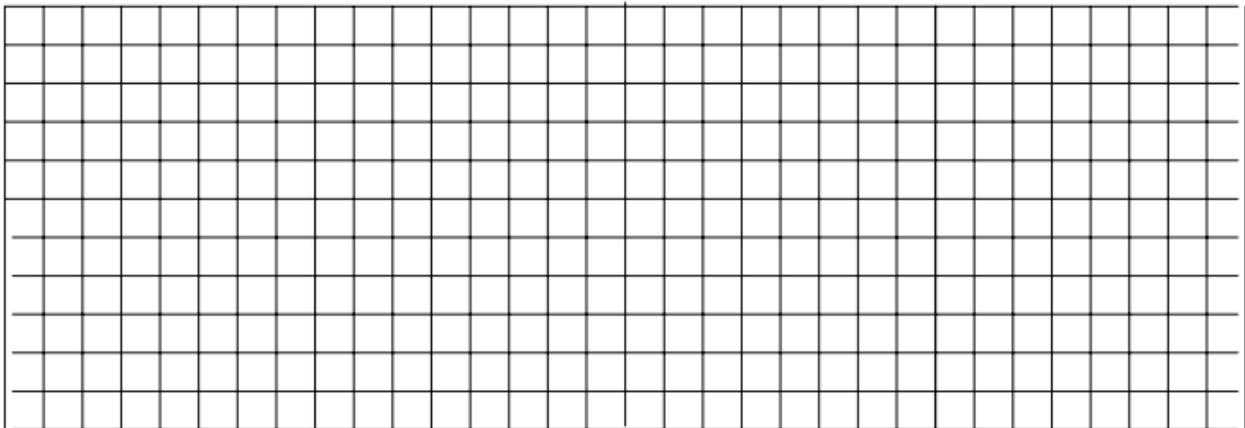


Рисунок Б.4 – Векторная диаграмма симметричной нагрузки без нейтрали

Б.1.4 Исследование несимметричного режима работы с нейтральным проводом

Расчёт токов I_A , I_B , I_C , I_N :

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_{Σ} :

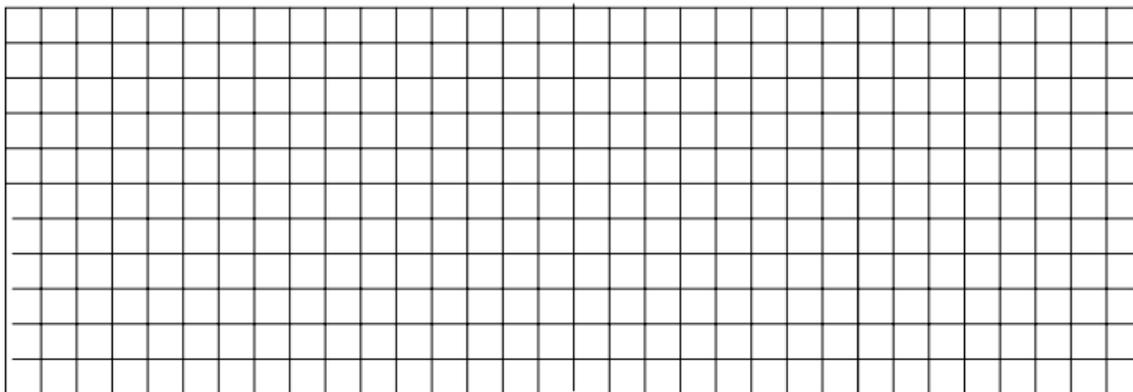


Рисунок Б.5 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки с нейтралью

Б.1.5 Исследование несимметричного режима без нейтрального провода

Расчёт напряжения смещения нейтрали \underline{U}_N :

Расчёт токов в цепи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$:

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_{Σ} :

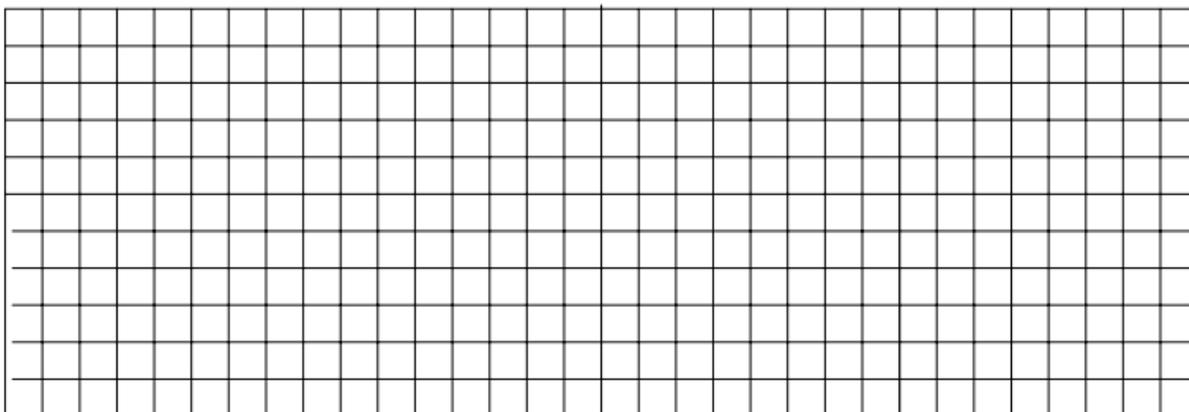


Рисунок Б.6 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки без нейтрали

Б.1.6 Исследование несимметричного режима при обрыве фазы «А»

Расчёт напряжения смещения нейтрали \underline{U}_N :

Расчёт токов в цепи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$:

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_Σ :

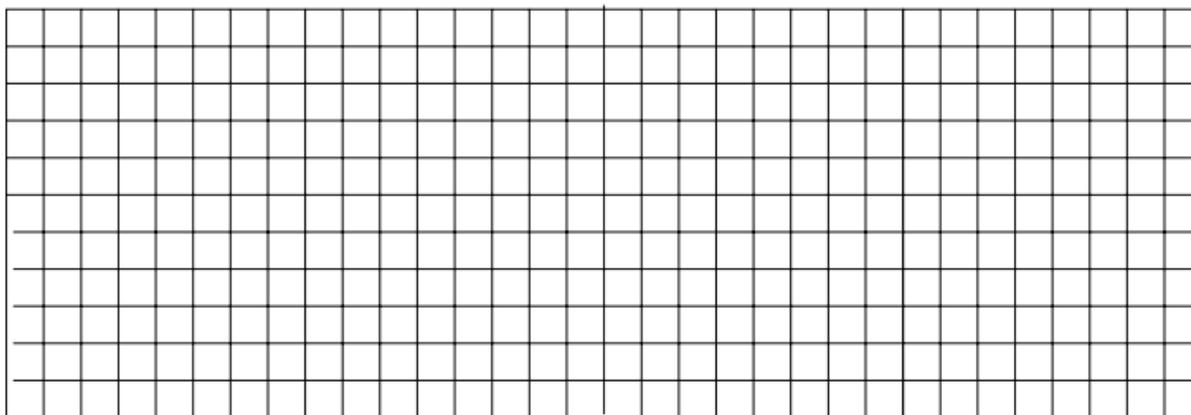


Рисунок Б.7 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки при обрыве фазы «А»

Б.1.7 Исследование несимметричного режима при КЗ

Расчёт напряжения смещения нейтрали $\underline{U}_{Nn} = \underline{U}_A$:

Расчёт токов в цепи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$:

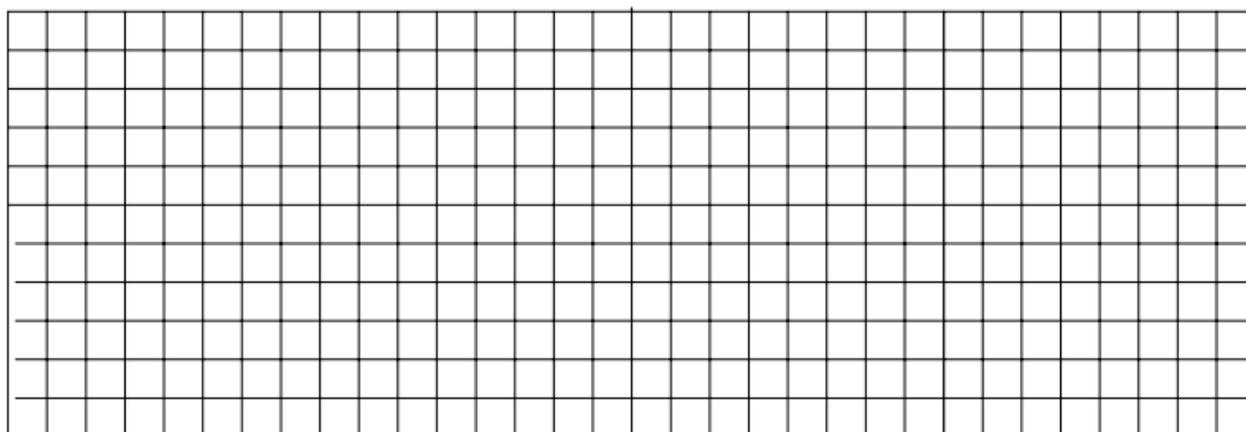


Рисунок Б.8 – Векторная диаграмма несимметричной нагрузки при КЗ фазы «А» ($\underline{Z}_A = 0$)

Этап Б.2 – Экспериментальная часть

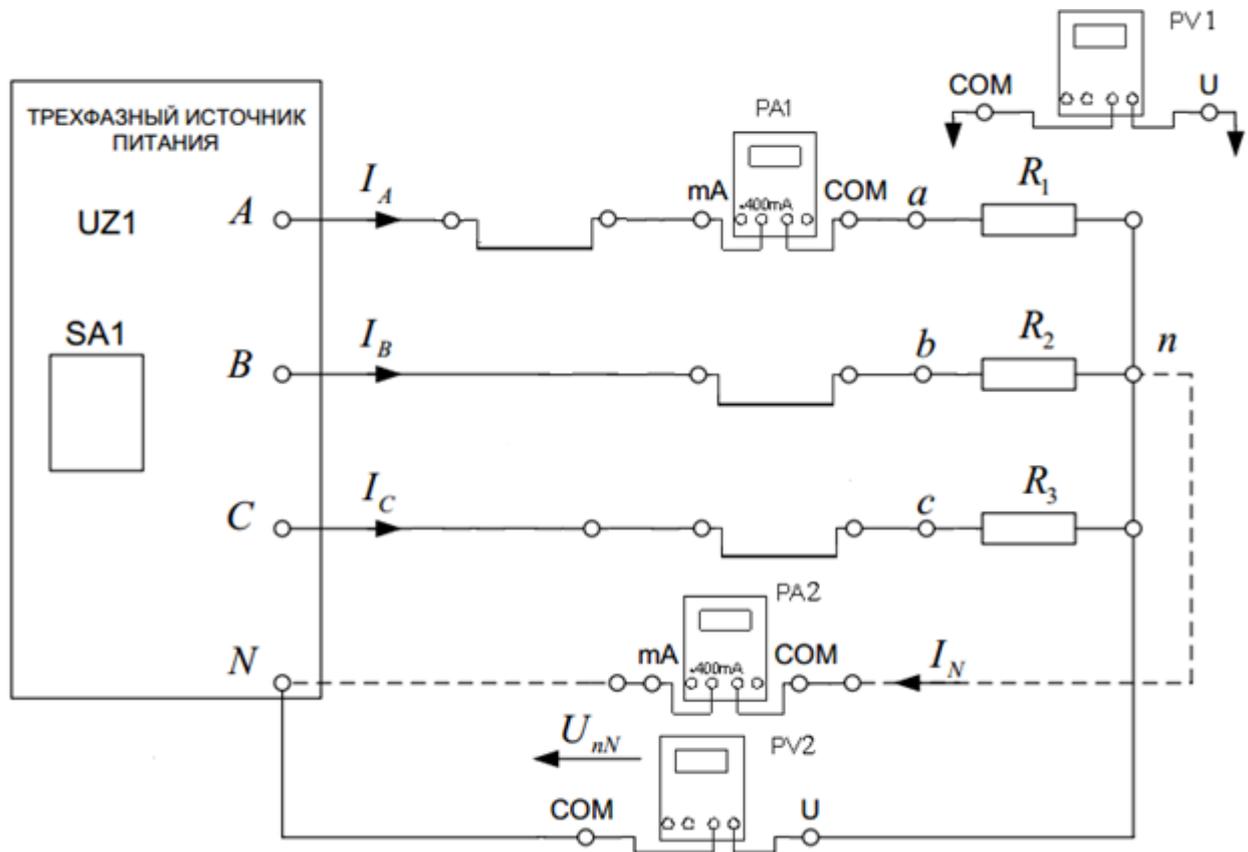


Рисунок Б.9 – Монтажная схема исследуемой электроцепи

Приложение В
Лабораторная работа № 8

Цель работы: _____

Этап В.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица В.1 – Исходные данные для исследования

$U_\phi, \text{В}$	Симметричная нагрузка			Несимметричная нагрузка		
	$R_A=R_1, \text{Ом}$	$R_B=R_2, \text{Ом}$	$R_C=R_3, \text{Ом}$	$R_A=R_1, \text{Ом}$	$R_B=R_2, \text{Ом}$	$R_C=R_3, \text{Ом}$

Напряжения источника: $\underline{U}_{AB} = \underline{\quad}$ В; $\underline{U}_{BC} = \underline{\quad}$ В; $\underline{U}_{CA} = \underline{\quad}$ В.

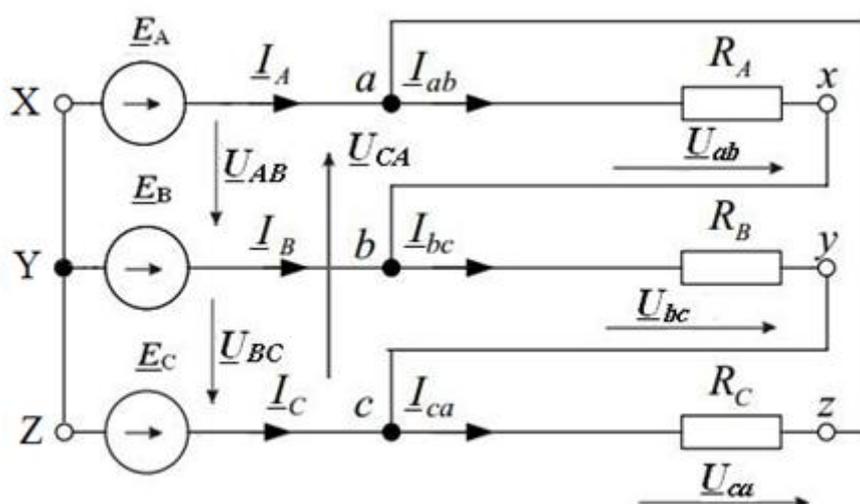


Рисунок В.1 –Схема замещения исследуемой цепи

В.1.1 Исследование симметричного режима

Расчёт фазных токов $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$:

Расчёт линейных токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$:

Расчёт суммарной мощности трёхфазной цепи P_Σ :

В.1.2 Исследование режима работы при обрыве фазного провода ab

Расчёт фазных токов $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$:

Расчёт линейных токов I_A, I_B, I_C :

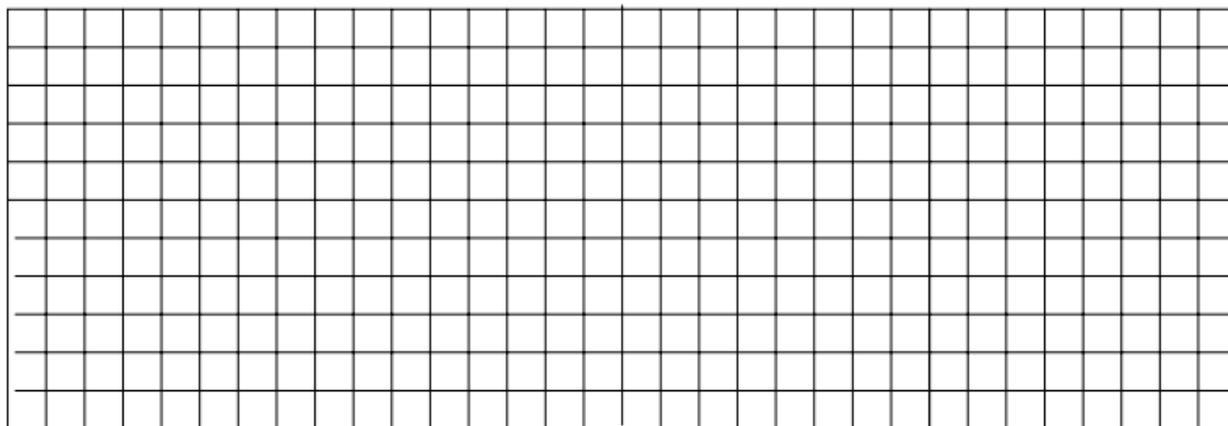


Рисунок В.2 – Векторные диаграммы симметричного режима

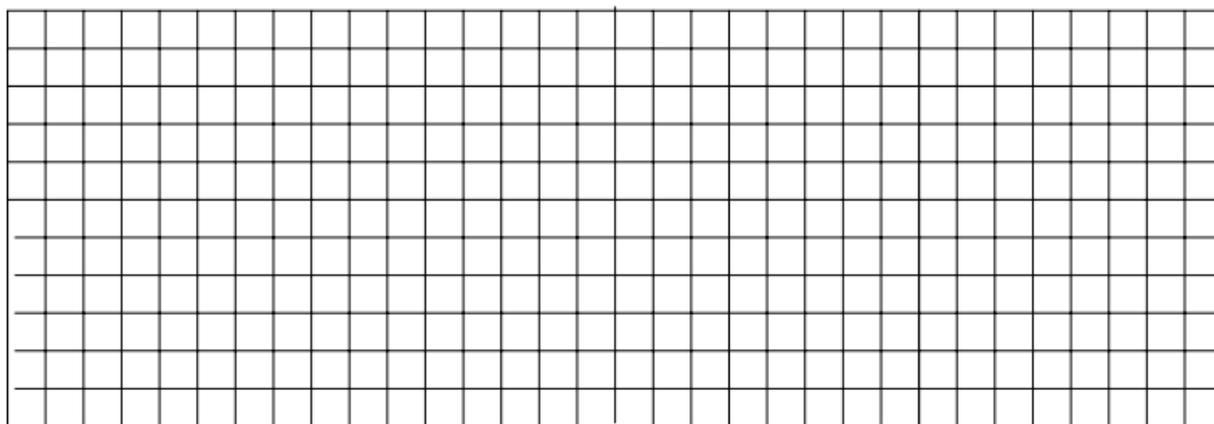


Рисунок В.3 – Векторные диаграммы при обрыве фазного провода ab

В.1.3 Исследование режима при обрыве линейного провода A

Расчёт фазных токов I_{ab}, I_{ca}, I_{bc} :

Расчёт линейных токов I_A, I_B, I_C :

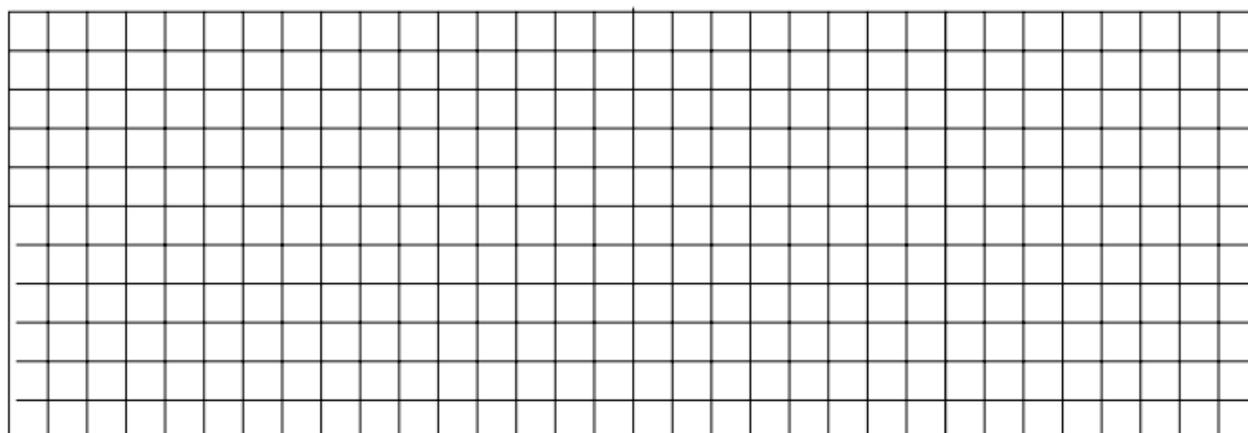


Рисунок В.4 – Векторные диаграммы при обрыве линейного провода A

В.1.4 Исследование несимметричного режима

Расчёт фазных токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} :

Расчёт линейных токов I_A , I_B , I_C :

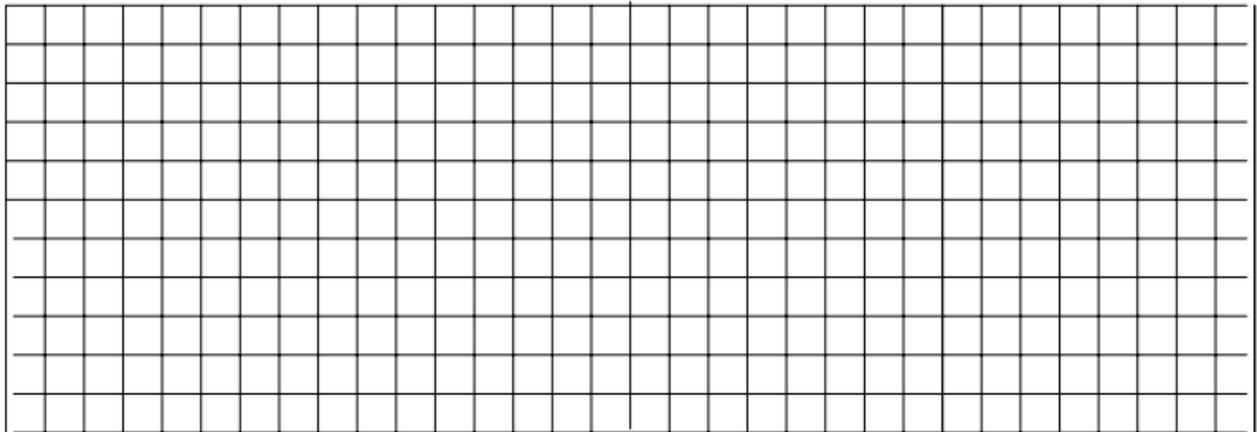
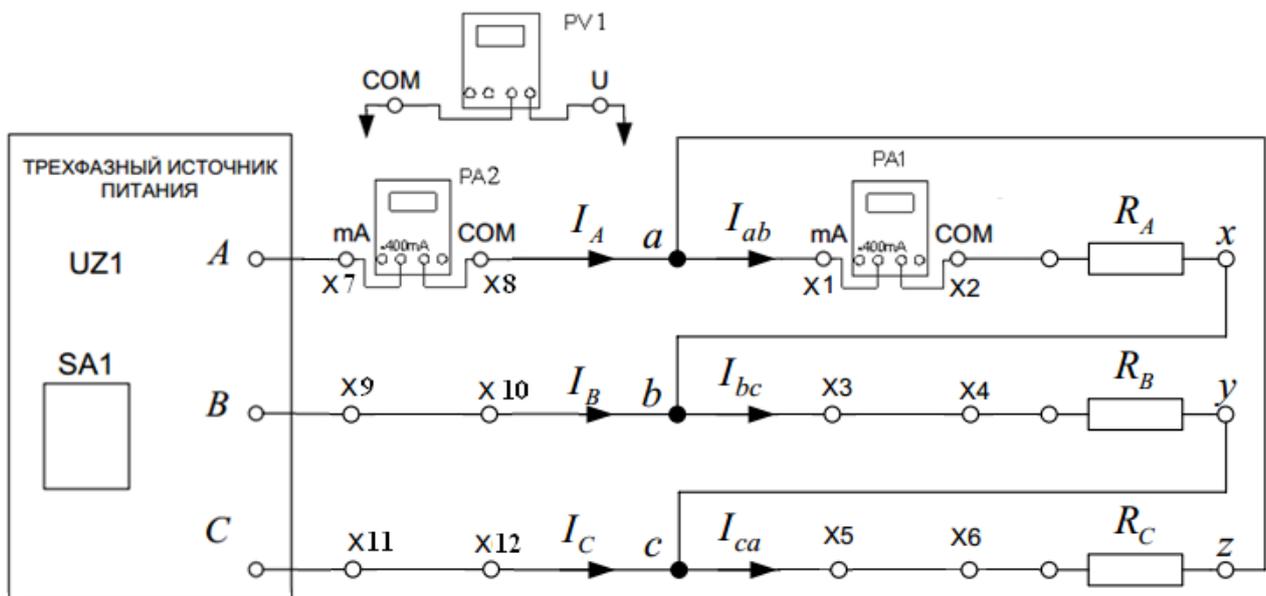


Рисунок В.5 – Векторные диаграммы несимметричного режима

Этап В.2 – Экспериментальная часть

Линейные напряжения источника $U_{AB} = \text{___}$ В; $U_{BC} = \text{___}$ В; $U_{CA} = \text{___}$ В.



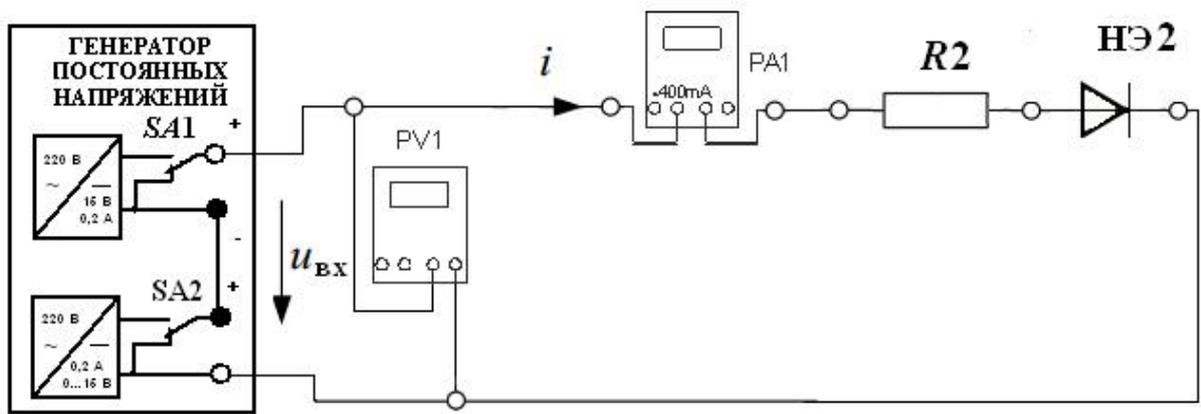


Рисунок Г.2 – Монтажная схема для определения вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Таблица Г.4 – Результаты графо-аналитического расчёта

U_{BX}	U_{ac}	U_{cd}	I_1	I_2	I_3

Г.2.3 Определение результирующей ВАХ смешанной цепи

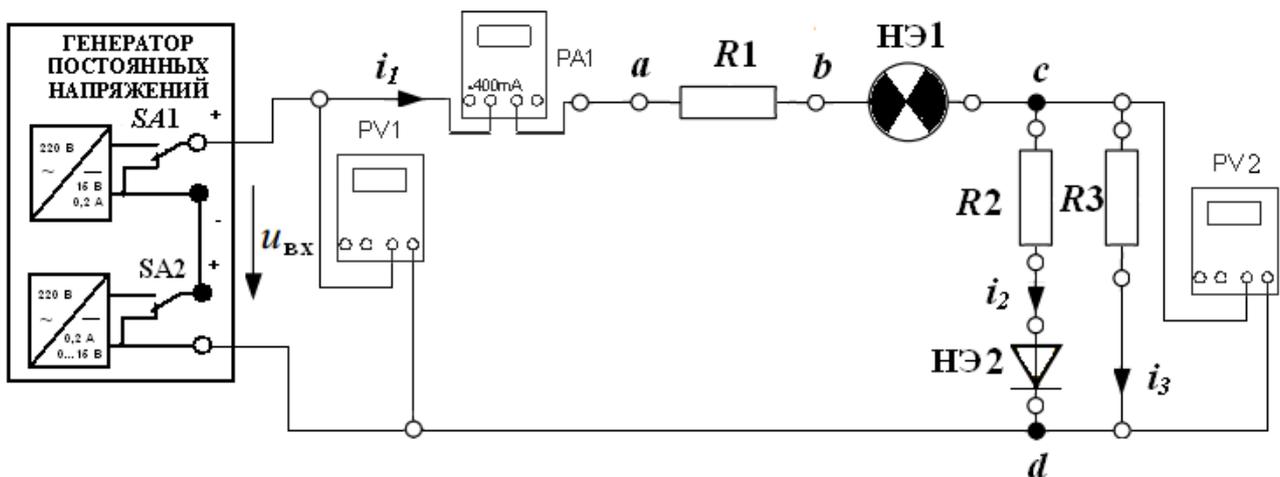


Рисунок Г.3 – Монтажная схема для исследования электрической цепи со смешанным соединением элементов

Таблица Г.5 – Результаты измерений параметров смешанной цепи(рисунок Г.3)

U_{BX}	U_{ac}	U_{cd}	I_1	I_2	I_3

Приложение Д
Лабораторная работа № 10

Цель работы: _____

Этап Д.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Д.1 – Исходные данные для расчётов

№ бригады	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	f, кГц	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R ₃ , кОм

Д.1.1 Исследование Т-образного четырёхполюсника

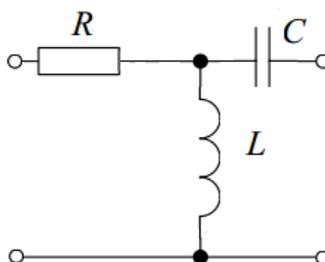


Рисунок Д.1 – Т-образный четырёхполюсник

Предварительный расчёт коэффициентов Т-образного 4-полюсника:

$$\underline{A} = \qquad \qquad \qquad \underline{B} =$$

$$\underline{C} = \qquad \qquad \qquad \underline{D} = .$$

Проверка правильность расчёта: $\underline{AD} - \underline{BC} =$

Определение сопротивлений холостого хода и короткого замыкания со стороны первичных и вторичных зажимов четырехполюсника:

$$\underline{Z}_{1XX} = \qquad \underline{Z}_{1KЗ} = \qquad \underline{Z}_{2XX} = \qquad \underline{Z}_{2KЗ} =$$

Проверка правильность расчёта:

$$\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX}} = \frac{\underline{Z}_{1KЗ}}{\underline{Z}_{2KЗ}} =$$

Д.1.2 Исследование П-образного четырёхполюсника

Предварительный расчёт коэффициентов П-образного 4-полюсника:

$$\underline{A} = \qquad \qquad \qquad \underline{B} =$$

$$\underline{C} = \qquad \qquad \qquad \underline{D} =$$

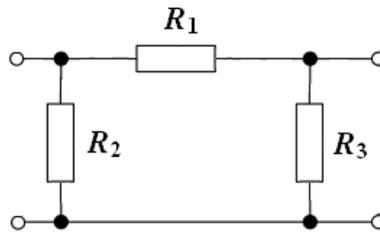


Рисунок Д.2 – П-образный 4-полюсник

Определение характеристического сопротивления и коэффициента передачи четырехполюсника

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{B}}{\underline{C}}}, \quad g = \ln(\sqrt{\underline{AD}} + \sqrt{\underline{BC}})$$

Этап Д.2 – Экспериментальная часть ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

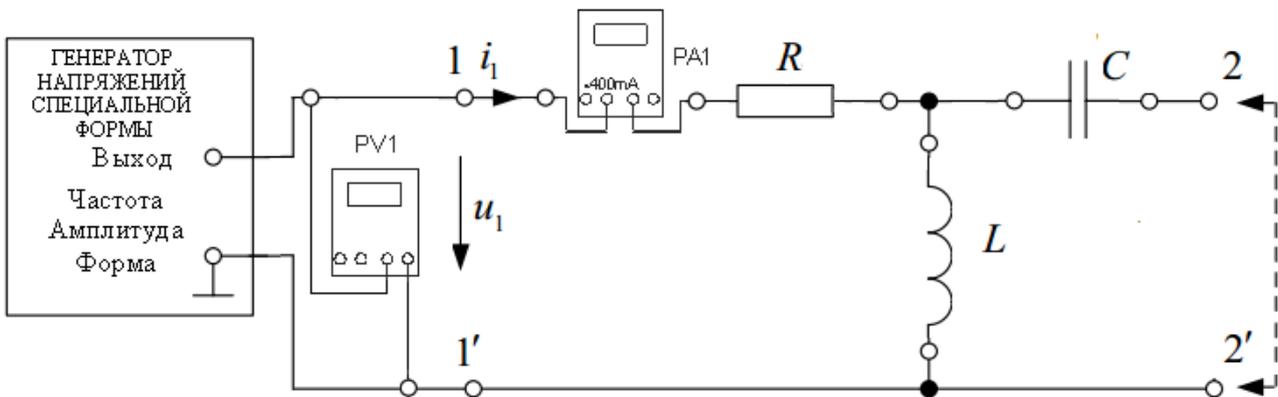


Рисунок Д.3 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Д.2

Опытные данные при $U_1 =$ В и $f =$ Гц		Расчётные данные	
Режим	$U, В$	$I, А$	$Z, Ом$
Прямое включение	ХХ		
	КЗ		
Обратное включение	ХХ		
	КЗ		

Примечание: индексы ХХ – обозначают режим холостого хода, КЗ – режим короткого замыкания

Расчёт комплексных сопротивлений:

$$Z_{1XX} = \quad Z_{2XX} =$$

$$Z_{1K3} = \quad Z_{2K3} =$$

Проверка соотношений:

$$\frac{Z_{1XX}}{Z_{2XX}} = \frac{Z_{1K3}}{Z_{2K3}} =$$

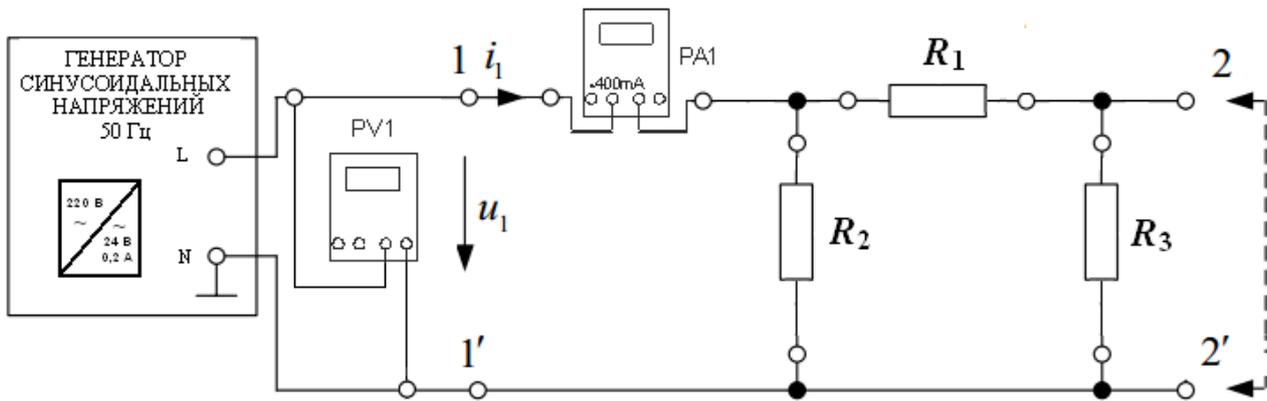


Рисунок Д.4 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Д.3

Расчётные данные					
A	$B, \text{ Ом}$	$C, \text{ См}$	D	Z_C	g

Таблица Д.4

Режим		$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$Z, \text{ Ом}$	A	$B, \text{ Ом}$	$C, \text{ См}$	D
Прямое включение	ХХ							
	КЗ							
Обратное включение	ХХ							
	КЗ							

Расчёт комплексных сопротивлений из протокола измерений:

$$Z_{1XX} =$$

$$Z_{2XX} =$$

$$Z_{1K3} =$$

$$Z_{2K3} =$$

Определение коэффициентов $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ для П-образного четырёхполюсника:

$$\underline{A} =$$

$$\underline{B} =$$

$$\underline{C} =$$

$$\underline{D} =$$

Таблица Д.5

Опытные данные при $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ В, $Z_C = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом						
Режим		$U_{ВХ},$ В	$I_{ВХ},$ А	$Z_{ВХ} = U_{ВХ}/I_{ВХ},$ Ом	$U_{ВЫХ},$ В	$g = \ln(U_{ВХ}/U_{ВЫХ})$
Прямое включение						
Обратное включение						

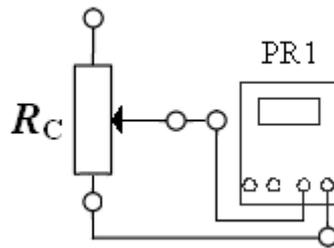


Рисунок Д.5 – Схема подключение мультиметра для определения сопротивления

Приложение Е
Лабораторная работа № 11

Цель работы: _____

Этап Е.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Е.1 – Исходные данные для исследования

№ бригады	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	f, Гц

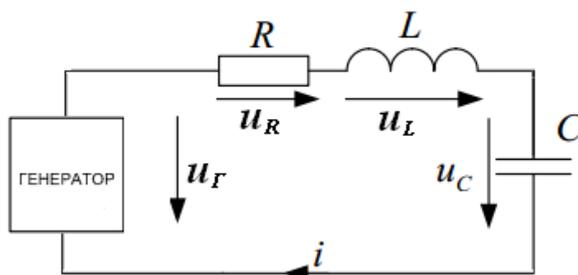


Рисунок Е.1 – Схема замещения исследуемой цепи

Расчёт цепи комплексным методом:

Расчёт на 1-й гармонике:

- комплексная амплитуда

$$\underline{U}_{m(1)} =$$

- реактивное сопротивление цепи

$$j(x_{L(1)} - x_{C(1)}) =$$

- комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\Sigma(1)} =$$

- комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_{m(1)} = \frac{\underline{U}_{m(1)}}{\underline{Z}_{\Sigma(1)}} =$$

- действующее значение тока

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{I}_{m(1)}}{\sqrt{2}} =$$

- комплексная амплитуда напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{mC(1)} =$$

- действующее значение напряжения на ёмкости $\underline{U}_{C(1)} = \frac{\underline{U}_{mC(1)}}{\sqrt{2}} =$

- активная мощность:

$$P_{(1)} =$$

Расчёт на 3-й гармонике:

- комплексная амплитуда

$$\underline{U}_{m(3)} =$$

- реактивное сопротивление цепи

$$j(x_{L(3)} - x_{C(3)}) =$$

- комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\Sigma(3)} =$$

- комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_{m(3)} = \frac{\underline{U}_{m(3)}}{\underline{Z}_{\Sigma 3}} =$$

- действующее значение тока

$$I_{(3)} = \frac{I_{m(3)}}{\sqrt{2}} =$$

- комплексная амплитуда напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{mC(3)} =$$

- действующее значение напряжения на ёмкости

$$U_{C(3)} = \frac{U_{mC(3)}}{\sqrt{2}} =$$

- активная мощность:

$$P_{(3)} =$$

Расчёт на 5-й гармонике:

- комплексная амплитуда

$$\underline{U}_{m(5)} =$$

- реактивное сопротивление цепи

$$j(x_{L(5)} - x_{C(5)}) =$$

- комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\Sigma(5)} =$$

- комплексная амплитуда тока

$$\underline{I}_{m(5)} = \frac{\underline{U}_{m(5)}}{\underline{Z}_{\Sigma 5}} =$$

- действующее значение тока

$$I_{(5)} = \frac{I_{m(5)}}{\sqrt{2}} =$$

- комплексная амплитуда напряжения на ёмкости

$$\underline{U}_{mC(5)} =$$

- действующее значение напряжения на ёмкости

$$U_{C(5)} = \frac{U_m C(5)}{\sqrt{2}} =$$

- активная мощность:

$$P_{(5)} =$$

Действующие значения:

- ток в цепи $I =$

- напряжение на выходе генератора $U =$

- напряжение на конденсаторе $U_C =$

- активная мощность $P = P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)} =$

Этап Е.2 – Экспериментальная часть

Амплитуды гармоник напряжения:

$$U_{m(1)} = \frac{4U_m}{\pi} = \text{_____ В}, \quad U_{m(3)} = \frac{4U_m}{3\pi} = \text{_____ В}, \quad U_{m(5)} = \frac{4U_m}{5\pi} = \text{_____ В}$$

По данным эксперимента:

- ток $I = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2 + I_{(5)}^2} =$

- напряжение $U_c = \sqrt{U_{C(1)}^2 + U_{C(3)}^2 + U_{C(5)}^2} =$

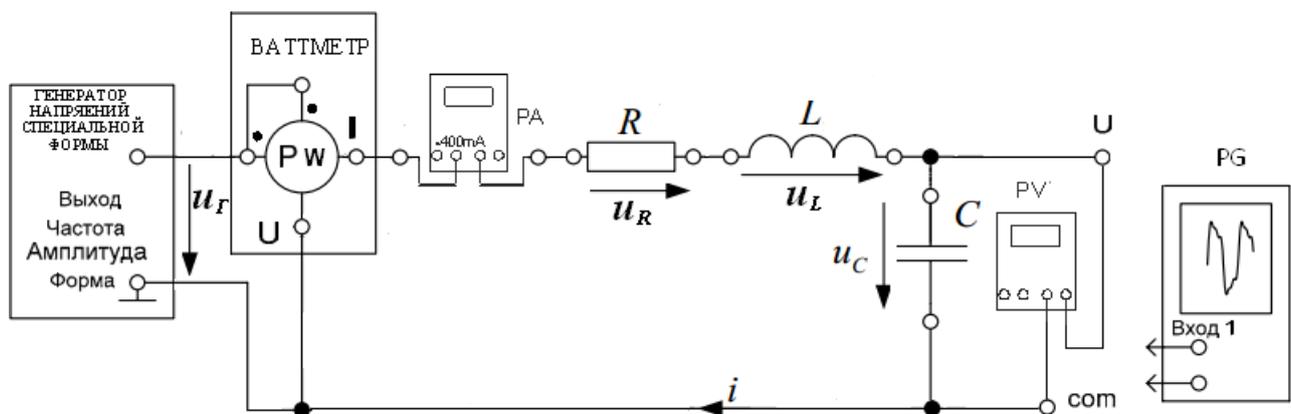


Рисунок Е.2 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Е.2

Результаты измерений	$U_{Гм},$ В	Расчёт			Опыт		
		$I,$ mA	$U_C,$ В	$P,$ Вт	$I,$ mA	$U_C,$ В	$P,$ Вт
Несинусоидальное напряжение							
Синусоидальное напряжение $U_{(1)}$							
Синусоидальное напряжение $U_{(3)}$							
Синусоидальное напряжение $U_{(5)}$							

Мощность: $P = P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)} =$

Приложение Ж
Лабораторная работа № 12

Цель работы: _____

Этап Ж.1 – Расчётно-графическая часть

Таблица Ж.1 – Исходные данные для исследования

№ бригады	R, Ом	C, мкФ	L, мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом

Ж.1.1 Исследование переходного процесса в цепи R-C элементов

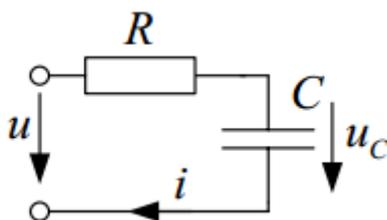


Рисунок Ж.1 – Схема замещения исследуемой цепи R-C элементов

Уравнения переходного процесса для тока, протекающего в цепи и напряжения на ёмкости, представлены ниже

Напряжение на ёмкости изменяется по закону:

$$u_C(t) =$$

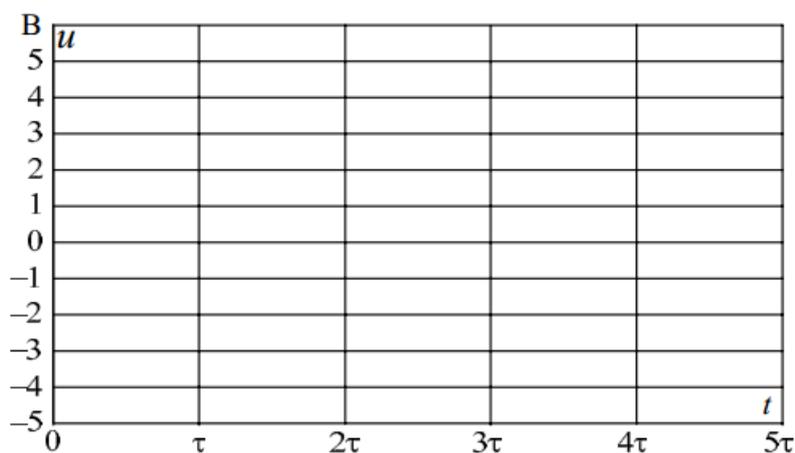


Рисунок Ж.2 – Осциллограммы напряжения $u_C(t)$

Постоянная времени цепи $\tau_{RC} =$

Частота следования однополярных импульсов $f =$

Ж.1.2 Исследование переходного процесса в цепи $R-L$ элементов

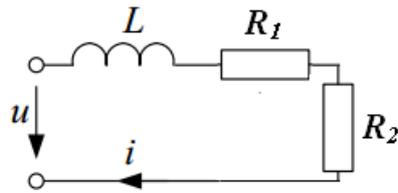


Рисунок Ж.3 – Схема замещения исследуемой цепи $R-L$ элементов

Уравнения переходного процесса для тока, протекающего в цепи и напряжения на индуктивности, представлены ниже

Ток в цепи изменяется по закону:

$$i_L(t) =$$

$$\text{Постоянная времени цепи } \tau_{RL} =$$

$$\text{Частота следования однополярных импульсов } f =$$

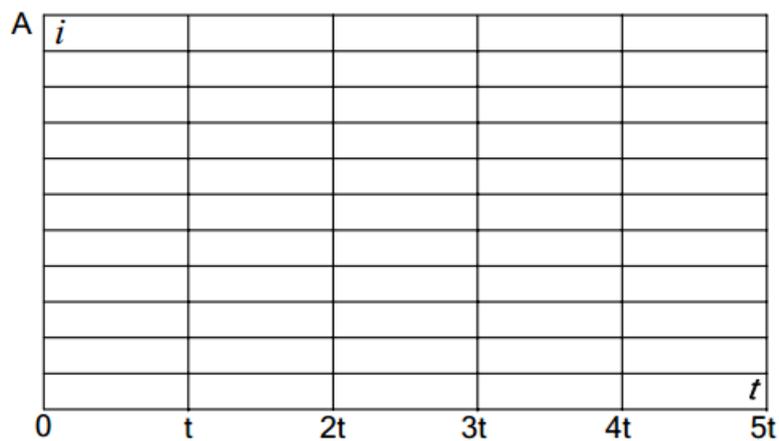


Рисунок Ж.4 – Осциллограмма тока $i(t)$

Этап Ж.2 – Экспериментальная часть

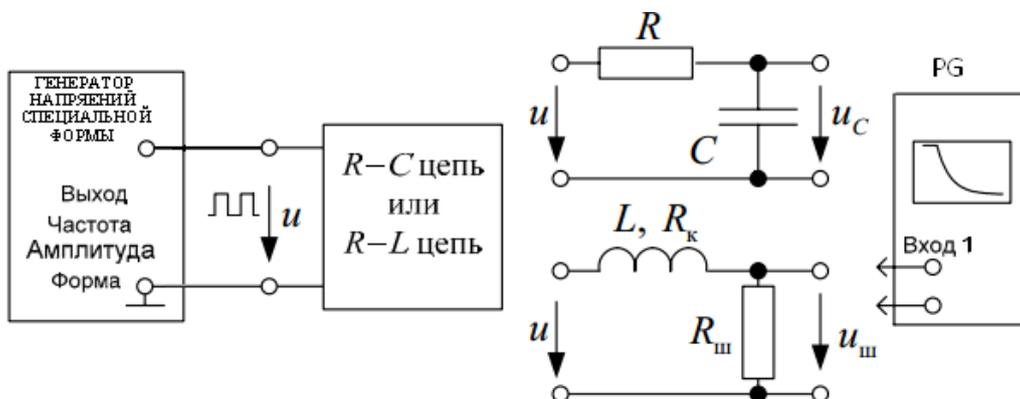


Рисунок Ж.5 – Монтажная схема исследуемой цепи

Таблица Ж.2

$t, \text{мс}$	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$u_C, \text{В (расчёт)}$						
$u_C, \text{В (опыт)}$						

Таблица Ж.3

$t, \text{мс}$	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$i_L, \text{А (расчёт)}$						
$i_L, \text{А (опыт)}$						

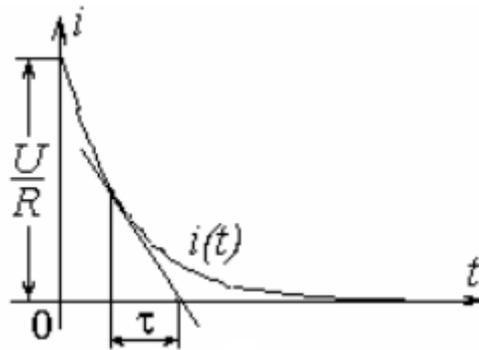


Рисунок Ж.6

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники /Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
- 2 Демирчян К.С Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 2 т. /К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин – М.; СПб.: Питер, 2009.
- 3 Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.Д. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 4 Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей: учеб. пособие для электротехнич. и радиотехнич. спец. вузов/М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М., Высшая школа, 1990. – 544 с.
- 5 Сборник задач по теоретическим основам электротехники: в 2 т. / П.А. Бутырин, Л.В. Алексейчик, С.А. Важнов и др.; под ред. чл.-корр. РАН П.А. Бутырина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

Учебное издание

ШПРЕХЕР Дмитрий Маркович
ПОЛЕВОЙ Валерий Евгеньевич
ЧУМАКОВ Александр Виссарионович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕ-
ПЕЙ В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ

Лабораторный практикум

Авторское редактирование
Компьютерная вёрстка В.Е. Полевой

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 15.05.14.
Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 3,7.
Тираж 300 экз. Заказ _____

Тульский государственный университет
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95