

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

для выполнения практических задач по дисциплине

«Инженерные системы зданий и сооружений: (Электроснабжение с основами
электротехники)

Направление подготовки 08.03.01 Строительство

Профиль «Проектирование зданий»

Ставрополь

Оглавление

Введение	5
Практическое занятие 1	6
Эквивалентные преобразования в электрических цепях	6
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	10
Практическое занятие 2	10
Анализ режимов цепей постоянного тока с использованием законов Ома и Кирхгофа	10
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	18
Практическое занятие 3	19
Анализ режимов цепей постоянного тока методами контурных токов и узловых потенциалов	19
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	27
Практическое занятие 4	28
Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока	28
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	38
Практическое занятие 5	38
Расчет однофазных цепей синусоидального тока.....	38
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	57
Практическое занятие 6	58
Расчет трехфазных цепей синусоидального тока	58
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	66

Введение

Целью дисциплины «Инженерные системы зданий и сооружений: (Электроснабжение с основами электротехники)» является формирование набора профессиональных компетенций ПК-9, (знанием нормативной базы в области инженерных изысканий, принципов проектирования зданий, сооружений, инженерных систем и оборудования, планировки и застройки населенных мест), ПК-10 (владением методами проведения инженерных изысканий, технологией проектирования деталей и конструкций в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных прикладных расчетных и графических программных пакетов), ПК-11 (способностью проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных расчетов, разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы, контролировать соответствие разрабатываемых проектов и технической документации зданию, стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам), ПК-17 (знанием научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности), ПК-19 (способностью составлять отчеты по выполненным работам, участвовать во внедрении результатов исследований и практических разработок), ПК-20 (знанием правил и технологии монтажа, наладки, испытания и сдачи в эксплуатацию конструкций, инженерных систем и оборудования строительных объектов, образцов продукции, выпускаемой предприятием), ПК-21 (владением методами опытной проверки оборудования и средств технологического обеспечения), ПК-22 (владением методами оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных объектов, оборудования) будущего бакалавра по направлению 270800.62 Строительство. Практикум направлен на развитие у студентов навыков практических расчетов согласно компетенций дисциплины по темам, изучаемым в лекционном курсе. Дисциплина относится к профессиональному циклу БЗ.Б.6 ООП ВПО. В ходе выполнения практикума у студента формируются указанные выше

компетенции, приобретаются практические навыки расчета однофазных и трехфазных электрических цепей, параметров электрических машин и электрооборудования, типовых схем строительных объектов, основ электроизмерений.

Практическое занятие 1

Тема: Эквивалентные преобразования в электрических цепях

Цель: Научиться рассчитывать эквивалентное сопротивление при различных схемах соединения резисторов: последовательном, параллельном, треугольником и звездой.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (умение проводить инженерные изыскания), ПК-17 (умение применять знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности).

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости проводить эквивалентные преобразования при расчетах электрических цепей.

Теоретическая часть

Эквивалентные преобразования в электрических цепях используют для упрощения схемы и проводимых расчетов. В разветвленных электрических цепях можно выделить *последовательное*, *параллельное* соединение сопротивлений, а также соединение *звездой* и *треугольником*.

При *последовательном* соединении сопротивлений рисунок 1.1

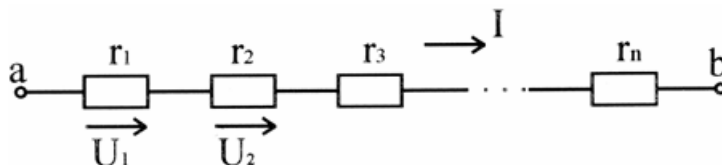


Рисунок 1.1 – Последовательное соединение сопротивлений
Сопротивление на участке цепи между точками a и b

$$r_{ab} = \sum_{i=1}^n r_i = r_1 + r_2 + \dots + r_n. \quad (1.1)$$

Напряжение на участке ab

$$U_{ab} = \sum_{i=1}^n U_i = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

Ток I одинаков во всех элементах цепи.

Параллельное соединение сопротивлений показано на рисунке 1.2.

Проводимость $g_{ab} = \frac{1}{r_{ab}}$ на участке цепи между точками a и b

$$g_{ab} = \sum_{i=1}^n g_i = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}. \quad (1.2)$$

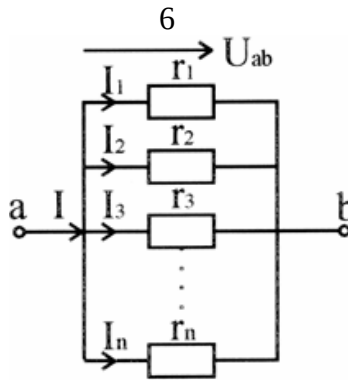


Рисунок 1.2 – Параллельное соединение сопротивлений

Напряжение U_{ab} одинаково во всех элементах цепи.

Ток I в неразветвленной части электрической цепи равен сумме токов ветвей

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Пример. При параллельном соединении двух сопротивлений r_1 и r_2 между точками а и b, общее сопротивление

$$R_{ab} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (1.3).$$

Ток I_1 через сопротивление r_1 при известном токе в неразветвленной части электрической цепи I

$$I_1 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}.$$

Ток I_2 через сопротивление r_2 при известном токе в неразветвленной части электрической цепи I

$$I_2 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

Не всегда можно упростить разветвленную электрическую цепь до требуемого уровня, используя преобразования для последовательного и параллельного соединения сопротивлений.

В таком случае необходимо использовать взаимные преобразования соединения сопротивлений *звезда* в соединение сопротивлений *треугольник* (рисунок 1.3).

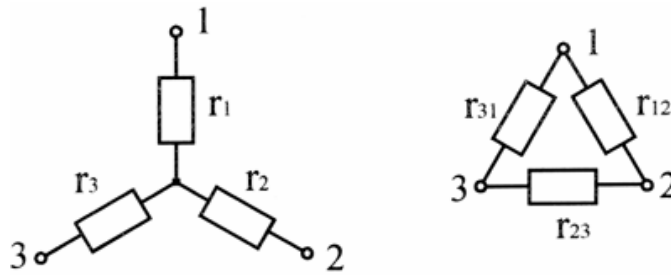


Рисунок 1.3 – Соединение сопротивлений r_1 , r_2 и r_3 звездой; соединение сопротивлений r_{12} , r_{23} и r_{31} треугольником

При взаимном преобразовании *треугольника* сопротивлений в *звезду* имеем:

$$r_1 = \frac{r_{12} \cdot r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}, \quad r_2 = \frac{r_{12} \cdot r_{23}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}, \quad r_3 = \frac{r_{23} \cdot r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}. \quad (1.4)$$

При взаимном преобразовании *звезды* сопротивлений в *треугольник* имеем:

$$r_{12} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_3} + r_1 + r_2, \quad r_{23} = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1} + r_2 + r_3, \quad r_{31} = \frac{r_3 \cdot r_1}{r_2} + r_1 + r_3. \quad (1.5)$$

Примечание. При вычислении входного (эквивалентного) сопротивления необходимо помнить, что источники энергии заменяются внутренними сопротивлениями. Внутреннее сопротивление идеального источника ЭДС равно нулю. Внутреннее сопротивление идеального источника тока равно бесконечности.

Задания

1. Для цепи, изображенной на рисунке 1.4, найти эквивалентные сопротивления между зажимами a и b , c и d , d и f . Значения сопротивлений представлены на схеме в Омах. ($r_{ab} = 12$ Ом, $r_{cd} = 4$ Ом, $r_{df} = 4$ Ом)

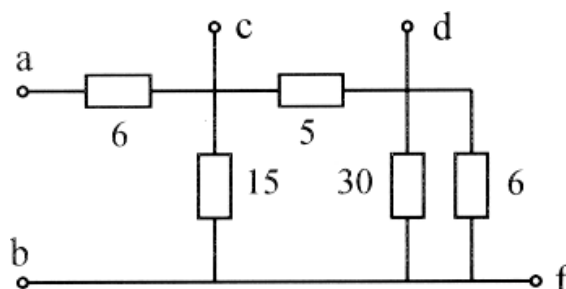


Рисунок 1.4

2. Для цепи, изображенной на рисунке 1.5, определить эквивалентное сопротивление цепи между точками a и b при разомкнутом и замкнутом ключе k . Если $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = r_7 = 10 \text{ Ом}$. ($r_{ab} = 12 \text{ Ом}$, $r_{ab} = 8,33 \text{ Ом}$)

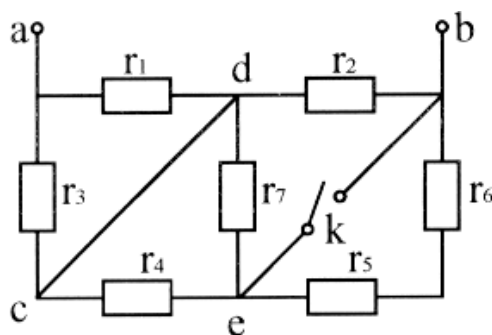


Рисунок 1.5

3. Для цепи, изображенной на рисунке 1.6, $J = 12 \text{ А}$, $E_1 = 30 \text{ В}$, $E_2 = 40 \text{ В}$, значения сопротивлений в Омах указаны на схеме. Найти входное сопротивление относительно выводов источника тока, применив преобразования: 1) треугольника сопротивлений в звезду; 2) звезды сопротивлений в треугольник. ($3,25 \text{ Ом}$)

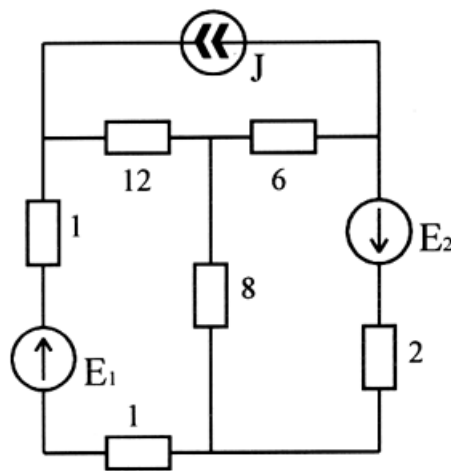


Рисунок 1.6

Контрольные вопросы

1. Как определяется общее сопротивление при последовательном соединении сопротивлений? при параллельном соединении?
2. Как определяется напряжение на участке электрической цепи с последовательными сопротивлениями, падения напряжения на которых известны?
5. Как определить токи в двух параллельных ветвях по известному току в неразветвленной части электрической цепи?
3. При каком соединении сопротивлений ток через все сопротивления равен?

4. При каком соединении сопротивлений напряжение на них одинаково?

6. В каком случае необходимо использовать взаимные преобразования соединения сопротивлений звезда в треугольник?

7. Формулы преобразования звезды в треугольник, треугольника в звезду.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.

2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.

4. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для студентов / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.

Практическое занятие 2

Тема: Анализ режимов цепей постоянного тока с использованием законов Ома и Кирхгофа

Цель: Научиться рассчитывать токи в ветвях с помощью законов Ома и Кирхгофа.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (умение проводить инженерные изыскания), ПК-17 (умение применять знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности).

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости использовать законы Ома и Кирхгофа для расчета электрических цепей.

Теоретическая часть

Закон Ома для участка цепи между зажимами а и b (рисунок 2.1) позволяет найти ток I участка по разности потенциалов $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ и сопротивлению R этого участка:

$$I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}. \quad (2.1)$$

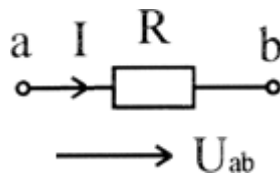


Рисунок 2.1 – Участок цепи

Закон Ома для участка цепи между зажимами b и a (рисунок 2.2) позволяет найти ток I участка по разности потенциалов $U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a$ и сопротивлению R этого участка:

$$I = \frac{U_{ba}}{R} = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{R}. \quad (2.2)$$

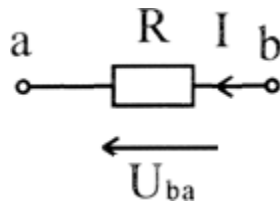


Рисунок 2.2

Закон Ома для участка цепи содержащего ЭДС между зажимами a и b (рисунок 2.3 и рисунок 2.4).

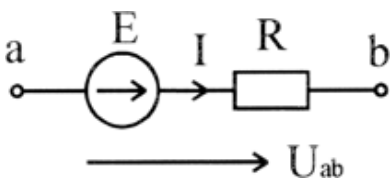


Рисунок 2.3 – Участок цепи, содержащий ЭДС

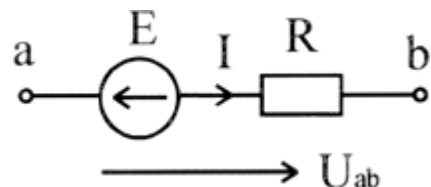


Рисунок 2.4 – Участок цепи содержащий ЭДС

Для схем на рисунках 2.3 и 2.4 закон Ома позволяет найти ток I участка по разности потенциалов $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$, а также находящимся на этом участке ЭДС E и сопротивлению R .

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС (рисунке 2.3)

$$I = \frac{U_{ab} + E}{R} \quad (2.3)$$

В случае если на участке цепи между зажимами a и b направление ЭДС будет противоположно току I (рисунок 2.4).

$$I = \frac{U_{ab} - E}{R} \quad (2.4)$$

Расчет режимов электрических цепей проводят используя первый и второй законы Кирхгофа.

Первый закон формулируется для узлов электрической цепи. Узлом называется место соединения трех и более ветвей электрической цепи. Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи между узлами, состоящий из одного или нескольких элементов по которым протекает один и тот же ток.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю.

$$\sum I_i = 0. \quad (2.5)$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на элементах контура (под контуром здесь понимается замкнутая последовательность ветвей, не содержащих источников тока) равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре:

$$\sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n E_i \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n I_i \cdot r_i = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (2.6)$$

Алгоритм решения задач с использованием законов Кирхгофа.

1. Определить количество узлов y и ветвей b электрической цепи.
2. Выбрать произвольно положительные направления искомых токов ветвей и обозначить их на схеме.

3. Определить количество уравнений по первому закону Кирхгофа, которое равно количеству узлов без единицы ($y - 1$). Записать для произвольно выбранных узлов требуемое количество уравнения по законам Кирхгофа. В алгебраической сумме следует учесть и токи источников тока.

4. Определить количество уравнений по второму закону Кирхгофа. Их число равно количеству ветвей без источников тока ($b - b_{\text{ит}}$) за вычетом уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, т.е. $(b - b_{\text{ит}}) - (y - 1)$, где $b_{\text{ит}}$ – число ветвей с источниками тока. Записать уравнения по 2-му закону Кирхгофа для независимых контуров. Независимые контуры образуются замкнутыми последовательностями ветвей, не содержащих источников тока,

так, чтобы в новом контуре была хоть одна ветвь, не входящая в предыдущие. (Иногда в некоторых цепях необходимо составлять уравнения, в которые входят уже содержащиеся ветви.)

5. Объединить уравнения, составленные по первому и второму законам Кирхгофа, в систему уравнений.

6. Решить систему уравнений.

Пример использования алгоритма решения задач с использованием законов Кирхгофа для электрической цепи, представленной на рисунке 2.5.

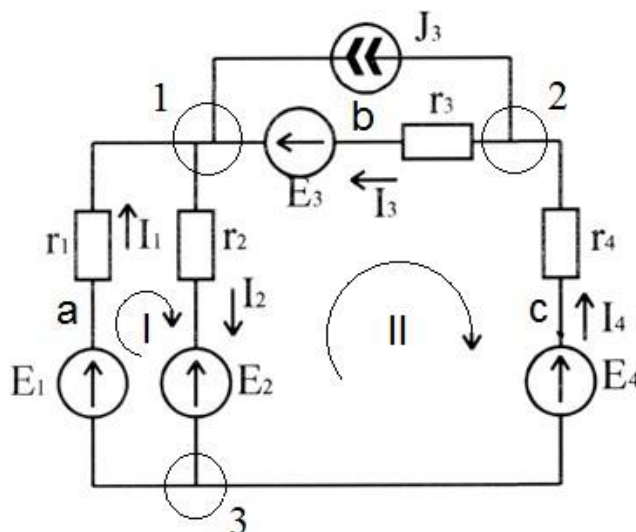


Рисунок 2.5 – Схема электрической цепи

При расчетах как правило необходимо определить токи в ветвях схемы. Все параметры элементов электрической цепи, и ее топология считаются известными.

Решение.

1. Определим количество узлов u и ветвей b электрической цепи. Так, в рассматриваемой цепи имеется три узла, обозначенных цифрами 1, 2 и 3 всего $u = 3$. Ветви находятся между узлами и в представленной цепи их пять $b = 5$.

2. Выберем произвольно положительные направления искомых токов I_1 , I_2 , I_3 , I_4 ветвей и обозначим их на схеме.

3. Определим количество уравнений по первому закону Кирхгофа, равное количеству узлов без единицы: $3 - 1 = 2$. Запишем для произвольно выбранных узлов требуемое количество уравнений по первому закону Кирхгофа. В алгебраической сумме следует учесть и токи источников тока.

$$\begin{aligned} 1 \text{ узел: } & I_1 - I_2 + I_3 + J_3 = 0 \\ 2 \text{ узел: } & I_4 - I_3 - J_3 = 0 \end{aligned}$$

4. Определим количество уравнений по второму закону Кирхгофа, равное числу ветвей без источников тока $(5 - 1)$ минус два уравнения, составленные по первому закону Кирхгофа, т.е. $(5 - 1) - 2 = 2$. Запишем уравнения по 2-му закону Кирхгофа для независимых контуров. Независимые контуры образуются замкнутыми последовательностями ветвей не содержащих источников тока.

Уравнения по второму закону Кирхгофа для рассматриваемой электрической цепи.

$$\begin{aligned} \text{I контур: } & I_1 \cdot r_1 + I_2 \cdot r_2 = E_1 - E_2, \\ \text{II контур: } & -I_2 \cdot r_2 - I_3 \cdot r_3 - I_4 \cdot r_4 = E_2 - E_3 - E_4. \end{aligned}$$

5. Объединить уравнения, составленные по первому и второму законам Кирхгофа в систему уравнений.

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_3 + J_3 = 0 \\ I_4 - I_3 - J_3 = 0 \\ I_1 \cdot r_1 + I_2 \cdot r_2 = E_1 - E_2 \\ -I_2 \cdot r_2 - I_3 \cdot r_3 - I_4 \cdot r_4 = E_2 - E_3 - E_4 \end{cases} \quad (2.7)$$

6. Решить полученную систему уравнений можно, если в ней четыре неизвестные. Чаще всего в задачах требуется определить токи (т.е. для данной схемы I_1, I_2, I_3, I_4), тогда все остальные элементы должны быть известными. Возможны и другие варианты.

Таким образом, получена система уравнений 2.7 для заданной электрической цепи рисунок 2.5 по законам Кирхгофа.

После расчета токов, необходимо проверить баланс мощностей электрической цепи.

Баланс мощностей в электрической цепи.

Общая мощность источников электрической энергии для электрической цепи (рисунок 2.5) определяется следующим образом:

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 - E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 + E_4 \cdot I_4 + U_{12} \cdot J_3. \quad (2.8)$$

Знак «минус» в выражении (2.8) у мощности источника ЭДС $P_{E_2} = -E_2 \cdot I_2$, ставится потому, что направление тока I_2 противоположно направлению ЭДС E_2 . Если направление источника ЭДС и тока через него не совпадает, то данный источник ЭДС потребляет электрическую энергию, а не производит ее. Мощность источника тока $P_{J_3} = U_{12} \cdot J_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot J_3$, т.к. у источника тока J_3 потенциал φ_1 больше, чем φ_2 . Как определять потенциалы электрической цепи (напряжение на участке цепи), будет рассмотрено ниже в примере построения потенциальной диаграммы.

Общая мощность потребителей электрической энергии для электрической цепи (рисунок 2.5) определяется следующим образом:

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4. \quad (2.9)$$

В результате расчетов общая мощность источников электрической энергии $P_{\text{ист}}$ должна оказаться равна общей мощности потребителей электрической энергии $P_{\text{потр}}$ для рассматриваемой электрической цепи $P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}}$. Если равенство не получается, значит, имеются ошибки в расчетах, которые требуется устранить.

Пример. Построение потенциальной диаграммы для внешнего контура электрической цепи, представленной на рисунке 2.5. Внешний контур состоит из элементов E_1 , r_1 , E_3 , r_3 , r_4 , E_4 . Перечень элементов производился от наибольшего по названию узла, в данном случае это узел 3, по часовой стрелке. Из рисунка видно, что при выборе контура в его состав не включены ветви с источником тока, т.к. его сопротивление равно бесконечности, и определить падение напряжения на нем по закону Ома не удастся. Обозначим на электрической схеме точки при переходе от одного элемента к другому. Так, между элементами E_1 и r_1 получим точку a , между E_3 и r_3 – точку b , между r_4 и E_4 обозначим точку c . Используя закон Ома, определим потенциалы всех указанных во внешнем контуре точек. Для этого условно заземлим потенциал точки 3, тогда φ_3 станет равен нулю. При этом токораспределение в цепи не изменится, т.к. никаких новых ветвей, по которым могли бы протекать токи, не образуется.

Тогда потенциалы обозначенных в схеме точек при известных токах определяются следующим образом:

$$\varphi_3 = 0;$$

$$\varphi_a = \varphi_3 + E_1;$$

$$\varphi_1 = \varphi_a - I_1 \cdot r_1;$$

$$\varphi_b = \varphi_1 - E_3;$$

$$\varphi_2 = \varphi_b + I_3 \cdot r_3;$$

$$\varphi_c = \varphi_2 + I_4 \cdot r_4;$$

$$\varphi_3 = \varphi_c - E_4 = 0.$$

Знак «плюс» в формуле $\varphi_a = \varphi_3 + E_1$ ставится потому, что ЭДС E_1 повышает потенциал при переходе от потенциала φ_3 к φ_a . Знак «минус» в формуле $\varphi_1 = \varphi_a - I_1 \cdot r_1$ ставится потому, что ток течет от большего потенциала φ_a к меньшему φ_1 . Чтобы определить меньший потенциал φ_1 необходимо от большего φ_a вычесть падение напряжения $U_1 = I_1 \cdot r_1$ на резисторе r_1 . Знак «минус» в формуле $\varphi_b = \varphi_1 - E_3$ ставится потому, что ЭДС E_3 понижает потенциал при переходе от потенциала φ_1 к φ_b . Знак «плюс» в формуле $\varphi_2 = \varphi_b + I_3 \cdot r_3$ ставится потому, что ток течет от большего потенциала φ_2 к меньшему φ_b . Чтобы отыскать больший потенциал φ_2 необходимо к нему прибавить падение напряжения $U_3 = I_3 \cdot r_3$ на резисторе r_3 . Аналогичным образом ставятся знаки в других уравнениях потенциалов электрической цепи. Представленные формулы для определения потенциалов электрической цепи вытекают из закона Ома.

На основании полученных значений потенциалов точек строится потенциальная диаграмма 2.6.

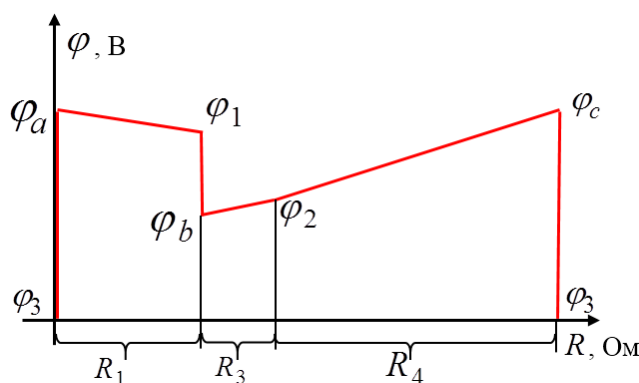


Рисунок 2.6 – Потенциальная диаграмма

Задания

1. Определить показание вольтметра для схемы, изображенной на рисунке 2.7. (15 В).

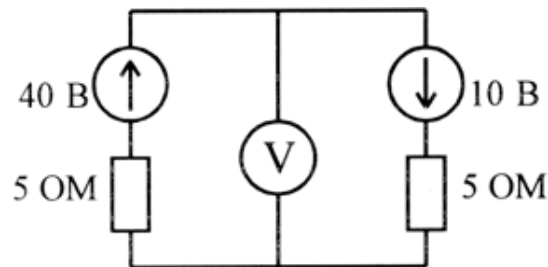


Рисунок 2.7

2. Определить токи в ветвях схемы рисунок 2.8, применяя законы Кирхгофа. Дано: $E_1 = 3$ В, $E_2 = 2$ В, $E_3 = 2$ В, $E_5 = 1$ В, $J_3 = 1$ А, $J_4 = 0,5$ А, $r_1 = 4$ Ом, $r_2 = 6$ Ом, $r_3 = 2$ Ом, $r_4 = 8$ Ом, $r_5 = 10$ Ом. ($I_1 = 0,2$ А, $I_2 = 0,7$ А, $I_3 = -0,5$ А, $I_4 = 0,1$ А, $I_5 = 0,1$ А)

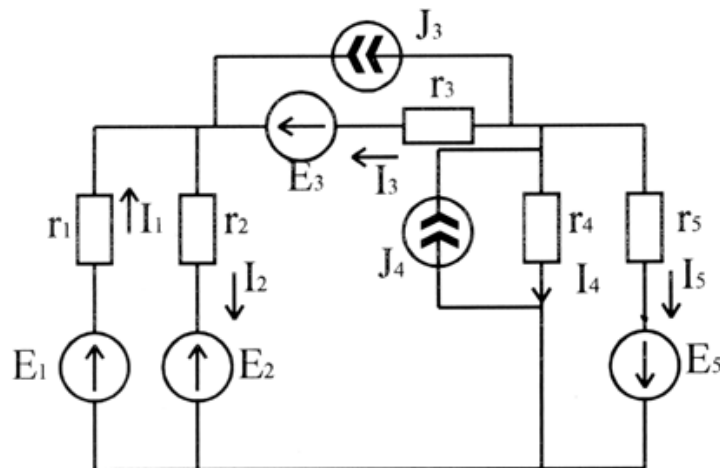


Рисунок 2.8

3. Для цепи рисунок 2.9 построить потенциальные диаграммы при разомкнутом и замкнутом ключе. Дано: $E_1 = 15$ В, $E_2 = 5$ В, $E_3 = 20$ В, $E_4 = 35$ В, $r_1 = 8$ Ом, $r_2 = 24$ Ом, $r_3 = 40$ Ом, $r_4 = 4$ Ом. Внутренние сопротивления источников энергии: $r_{10} = 2$ Ом, $r_{20} = 6$ Ом, $r_{30} = 2$ Ом, $r_{40} = 4$ Ом.

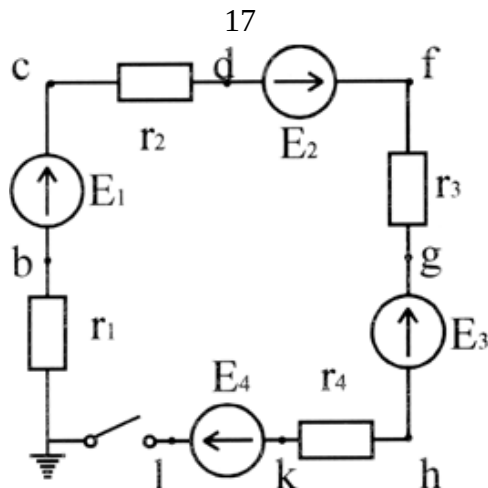


Рисунок 2.9

Контрольные вопросы

1. Записать закон Ома для участка эклектической цепи и для полной цепи.
2. Как определяется направление тока при известных потенциалах электрической цепи?
3. Дайте определение узлам и ветвям электрической цепи.
4. Сформулируйте и запишите первый закон Кирхгофа.
5. Сформулируйте и запишите второй закон Кирхгофа.
6. Как определить показания вольтметра по известным токам в ветвях?
7. Методика построения потенциальной диаграммы для замкнутого контура электрической цепи.
8. Поясните, как произвести учет внутреннего сопротивления источника энергии при построении потенциальной диаграммы.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.

Практическое занятие 3

Тема: Анализ режимов цепей постоянного тока методами контурных токов и узловых потенциалов

Цель: Научиться рассчитывать токи в ветвях методами контурных токов и узловых потенциалов.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (умение проводить инженерные изыскания), ПК-17 (умение применять знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности).

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости использовать методы узловых потенциалов и контурных токов для расчета электрических цепей.

Теоретическая часть

Метод контурных токов.

Метод контурных токов также позволяет уменьшить количество решаемых уравнений в сравнении с системой уравнений по законам Кирхгофа. Количество уравнений по методу контурных токов определяется числом уравнений по второму закону Кирхгофа для рассматриваемой электрической цепи. Метод основывается на том свойстве, что ток в любой ветви может быть представлен в виде алгебраической суммы независимых контурных токов, протекающих по этой ветви. В соответствии с данным методом необходимо выбрать контурные токи таким образом, чтобы каждый из них проходил через один источник тока, а оставшиеся контурные токи выбирать проходящими по ветвям, не содержащим источники тока.

Система уравнений по методу контурных токов в виде матрицы будет иметь столько строк и столбцов, сколько уравнений необходимо записать по второму закону Кирхгофа для рассматриваемой электрической цепи. Если в электрической цепи имеется источник тока, то добавится столбец в систему уравнений, если два, то два столбца и т.д.

Рассмотрим использование метода контурных токов на *примере*.

Метод контурных токов целесообразно применять, когда в количество уравнений по второму закону Кирхгофа для электрической цепи получается меньше чем по первому. На рисунке 3.1 представлена электрическая цепь, отвечающая указанным требованиям.

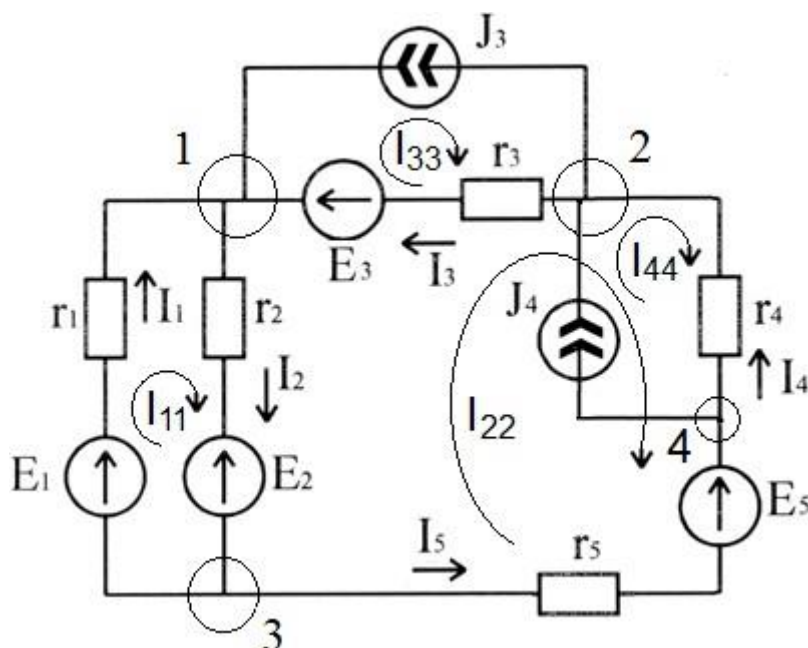


Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи для расчета по методу контурных токов

Решение.

В этой цепи четыре узла, следовательно, по первому закону Кирхгофа необходимо записать $4 - 1 = 3$ уравнения. Рассматриваемая схема содержит семь ветвей, две из которых с источниками тока, следовательно, по второму закону Кирхгофа количество уравнений равно: $7 - 2 - 3 = 2$. Для заданной схемы направления обхода контурных токов I_{11} , I_{22} , I_{33} , I_{44} взяты по часовой стрелке, причем $I_{33} = -J_3$, т.к. обход контура не совпадает с направлением тока источника тока; $I_{44} = J_4$, т.к. обход контура совпадает с направлением тока источника тока. Таким образом, контурные токи $I_{33} = -J_3$ и $I_{44} = J_4$ считаются известными. Следовательно, остается два неизвестных контурных тока (I_{11} и I_{22}), для их нахождения используем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot R_{11} - I_{22} \cdot R_{12} - I_{33} \cdot R_{13} - I_{44} \cdot R_{14} = E_{11} \\ -I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} - I_{33} \cdot R_{23} + I_{44} \cdot R_{24} = E_{22} \end{cases} \quad (3.1)$$

где R_{mm} – собственное сопротивление контура m (сумма сопротивлений всех ветвей, входящих в контур m). Для рассматриваемой цепи $R_{11} = r_1 + r_2$; $R_{22} = r_2 + r_3 + r_4 + r_5$. В системе уравнений (3.1) у собственных сопротивлений контуров по главной диагонали матрицы будут всегда стоять знаки «плюс».

Если будет задана такая электрическая цепь, для которой по второму закону Кирхгофа необходимо будет записать другое количество уравнений, тогда и количество уравнений в системе (2.4) изменится. Количество строк в системе (2.4) определяется количеством уравнений по второму закону Кирхгофа, а количество столбцов равно сумме числа уравнений по второму закону Кирхгофа и числа источников тока.

R_{ml} – общее сопротивление контуров m и l , берется со знаком «плюс», если направления контурных токов в данной ветви совпадают, в обратном случае – берется знак «минус». В рассматриваемой схеме общим сопротивлением между контурами 1 и 2, а, следовательно, 2 и 1, является r_2 . Направление контурных токов в данной ветви не совпадают, следовательно, сопротивление $R_{12}=R_{21}=r_2$ войдет в уравнение со знаком «минус». Сопротивления между контурами 1 и 3, а также 1 и 4 равны нулю, следовательно, $R_{13}=0$ и $R_{14}=0$. Сопротивление между контурами 2 и 3 $R_{23}=r_3$. Направление контурных токов в данной ветви не совпадают, следовательно, сопротивление R_{23} войдет в уравнение со знаком «минус». Сопротивление между контурами 2 и 4 $R_{24}=r_4$. Направление контурных токов в данной ветви совпадают, следовательно, сопротивление R_{24} войдет в уравнение со знаком «плюс».

E_{mm} – алгебраическая сумма ЭДС, входящих в контур m . Для данной схемы $E_{11}=E_1-E_2$, $E_{22}=E_2-E_3-E_5$.

Таким образом, в новых обозначениях система уравнений 3.1 примет следующий вид

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (r_1 + r_2) - I_{22} \cdot r_2 = E_1 - E_2 \\ -I_{11} \cdot r_2 + I_{22} \cdot (r_2 + r_3 + r_4 + r_5) - I_{33} \cdot r_3 + I_{44} \cdot r_4 = E_2 - E_3 - E_5 \end{cases} \quad (3.2)$$

Решив полученную систему (3.2) относительно I_{11} и I_{22} , считая $I_{33} = -J_3$ и $I_{44} = J_4$ известными, найдем токи в ветвях электрической цепи.

Токи в ветвях электрической цепи, через контурные токи определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11}; \quad I_2 = I_{11} - I_{22}; \quad I_3 = I_{33} - I_{22}; \\ I_4 &= -I_{44} - I_{22}; \quad I_5 = -I_{22}. \end{aligned}$$

Метод узловых потенциалов.

Данный метод также позволяет уменьшить количество решаемых уравнений в сравнении с системой уравнений по законам Кирхгофа. Количество уравнений по методу узловых потенциалов определяется количеством уравнений по первому закону Кирхгофа для рассматриваемой электрической цепи. В соответствии с данным методом, необходимо сначала определить потенциалы всех узлов электрической цепи, а затем с помощью закона Ома определить токи в ветвях. При этом один из узлов электрической схемы, который называют *опорным*, заземляется, его потенциал становится равен нулю. Узел для заземления выбирается произвольно. Удобно заземлять узел, номер которого имеет наибольшее значение в заданной электрической цепи.

Система уравнений по методу узловых потенциалов в виде матрицы будет иметь столько строк и столбцов, сколько уравнений необходимо записать по первому закону Кирхгофа для рассматриваемой электрической цепи. Если в электрической цепи имеется ветвь содержащая только идеальный источник ЭДС. Тогда удобно пронумеровать узлы электрической цепи так, чтобы номер узла с наибольшим значения в заданной электрической цепи, оказался в узле от которого отходит источник ЭДС. Этот узел принимают за опорный и заземляют. Тогда потенциал узла, в который входит источник ЭДС, будет известным и равным величине ЭДС источника.

Рассмотрим использование метода узловых потенциалов на примере.

Пример.

Метод узловых потенциалов целесообразно применять, когда количество уравнений по первому закону Кирхгофа для электрической цепи получается меньше чем по второму. На рисунке 3.2 представлена электрическая цепь, отвечающая указанным требованиям.

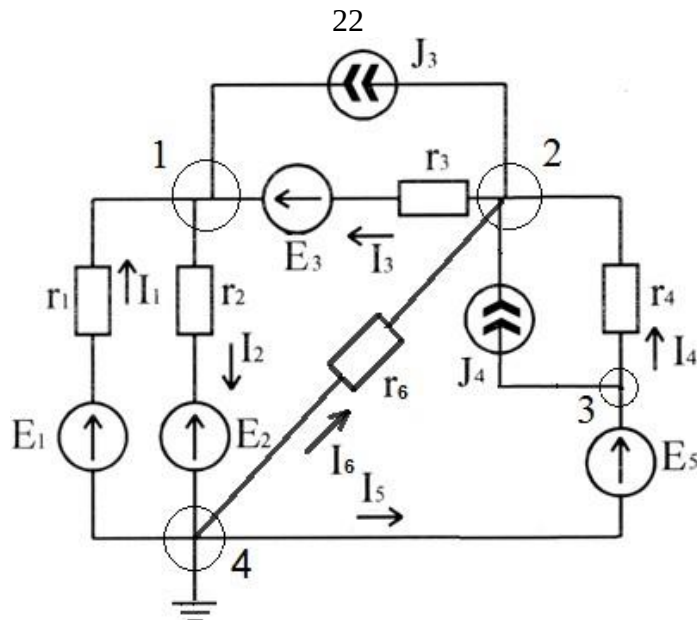


Рисунок 3.2 – Схема электрической цепи для расчета по методу узловых потенциалов

Представленная схема содержит 8 ветвей, 2 из которых содержат источники тока, следовательно, количество уравнений по второму закону Кирхгофа равно: $8 - 2 - 3 = 3$ уравнения.

В заданной цепи четыре узла, следовательно, по первому закону Кирхгофа необходимо записать $4 - 1 = 3$ уравнения, причем имеется ветвь, содержащая только идеальный источник ЭДС E_5 . В этом случае узел, от которого отходит источник ЭДС E_5 , пронумеруем цифрой 4 и примем его за опорный, потенциал которого равен нулю $\varphi_4 = 0$. Обозначим заземление $\perp$ у φ_4 на расчетной схеме. Потенциал узла, в который входит источник ЭДС E_5 , будет известным и равным величине ЭДС источника $\varphi_3 = E_5$.

Таким образом, остается два неизвестных потенциала φ_1 и φ_2 , для их нахождения используем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot g_{11} - \varphi_2 \cdot g_{12} - \varphi_3 \cdot g_{13} = J_{11} \\ -\varphi_1 \cdot g_{21} + \varphi_2 \cdot g_{22} - \varphi_3 \cdot g_{23} = J_{22} \end{cases}, \quad (3.3)$$

где $g_{11}, g_{22}, \dots, g_{SS}$ – собственные проводимости узлов $1, 2, \dots, S$, соответственно, которые определяются как сумма проводимостей ветвей, присоединенных к соответствующему узлу. Для рассматриваемой цепи

$$g_{11} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}; \quad g_{22} = \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_6}.$$

В системе уравнений (3.3) у собственных проводимостей узлов по главной диагонали матрицы будут всегда стоять знаки «плюс». Если будет задана такая электрическая цепь, для которой по первому закону Кирхгофа необходимо будет записать другое количество уравнений, то система уравнений (3.3) должна состоять из строк и столбцов, количество которых определяется количеством уравнений по первому закону Кирхгофа.

g_{SN} – сумма проводимостей ветвей, соединяющих узел S с узлом N , всегда в системе уравнений (3.3) берется со знаком «минус». Для рассматриваемой цепи сумма проводимостей ветвей между узлами 1 и 2, а, следовательно, 2 и 1, является $g_{12} = g_{21} = \frac{1}{r_3}$. Сумма проводимостей ветвей между узлами 1 и 3,

равна нулю, следовательно $g_{13} = 0$. Сумма проводимостей ветвей между узлами 2 и 3 $g_{23} = \frac{1}{r_4}$.

$J_{SS} = \sum_S E \cdot g + \sum_S J$, где $\sum_S E \cdot g$ – алгебраическая сумма произведений ЭДС ветвей, примыкающих к узлу S , на их проводимости; при этом со знаком «плюс» берутся те произведения, в ветвях которых ЭДС действуют в направлении узла S , и со знаком «минус», – в направлении от узла S ;

$\sum_S J$ – алгебраическая сумма источников тока, присоединенных к узлу S , знак перед J определяется согласно правилу, указанному выше. В нашем случае $J_{11} = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3} + J_3$, $J_{22} = -\frac{E_3}{r_3} - J_3 + J_4$.

Таким образом, в новых обозначениях система уравнений 3.3 примет следующий вид

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right) - \varphi_2 \cdot \frac{1}{r_3} = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3} + J_3 \\ -\varphi_1 \cdot \frac{1}{r_3} + \varphi_2 \cdot \left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_6} \right) - \varphi_3 \cdot \frac{1}{r_4} = -\frac{E_3}{r_3} - J_3 + J_4 \end{cases} \quad (3.4)$$

Решив полученную систему (3.4) относительно φ_1 и φ_2 , считая известным $\varphi_3 = E_5$, найдем токи в ветвях электрической цепи.

Токи в ветвях электрической цепи определяются по закону Ома через полученные при решении системы (3.4) потенциалы:

$$I_1 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1 + E_1}{r_1};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_4 - E_2}{r_2};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_3}{r_3};$$

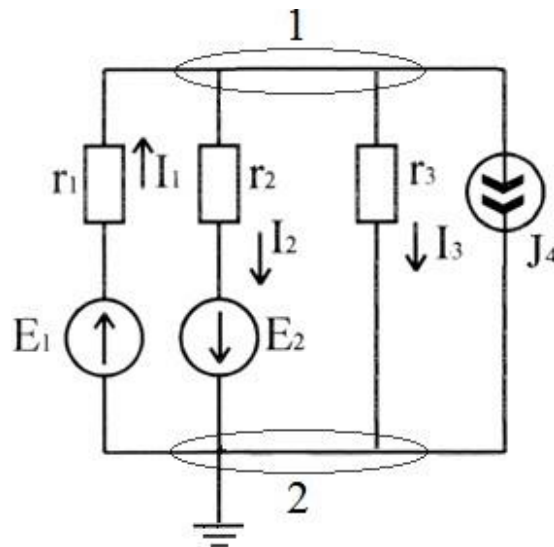
$$I_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{r_4};$$

$$I_5 = I_4 + J_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{r_4} + J_4;$$

$$I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_2}{r_6}.$$

Метод двух узлов (частный случай метода узловых потенциалов).

Встречаются электрические цепи у которых всего два узла рисунок 3.3. Для расчета токов в такой цепи наиболее рациональным методом расчета является метод двух узлов.



Рисунке 3.3

Рассмотрим использование метода двух узлов на примере.

Пример.

Для электрической цепи (рисунок 3.3) по методу узловых потенциалов запишем следующее выражение:

$$\varphi_1 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right) = \frac{E_1}{r_1} - \frac{E_2}{r_2} - J_4.$$

Запишем получившееся выражение для напряжения $U_{12} = -U_{21}$:

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) = -U_{21} = -(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{E_1 \cdot \frac{1}{r_1} - E_2 \cdot \frac{1}{r_2} - J}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}. \quad (3.4)$$

Выражение 3.4 принято называть *методом двух узлов*.

Токи в ветвях электрической цепи, определяются по закону Ома следующим образом:

$$I_1 = \frac{E_1 - (\varphi_1 - \varphi_2)}{r_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_2}{r_2}; \quad I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_3}.$$

Задания

1. Определить токи ветвей в электрической цепи схема, которой представлена на рисунке 3.4 методом: а) контурных токов; б) узловых потенциалов. Дано: $E_1 = 36$ В, $E_2 = 12$ В, $J = 8$ А, $R_1 = R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 1$ Ом, $R_4 = 2$ Ом, $R_5 = 1$ Ом. ($I_1 = 9$ А, $I_2 = 3$ А, $I_3 = 6$ А, $I_4 = 2$ А)

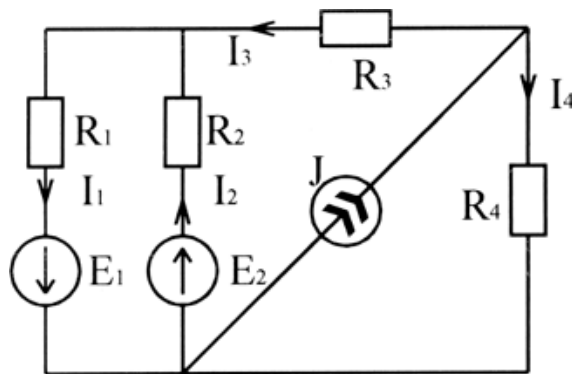


Рисунок 3.4

2. Вычислить все токи в электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 3.5 методом: а) контурных токов; б) методом узловых потенциалов. Дано: $J = 50$ мА, $E_1 = 60$ В, $R_1 = 5$ кОм, $R_2 = 4$ кОм, $R_3 = 16$ кОм, $R_4 = 2$ кОм, $R_5 = 8$ кОм. ($I_1 = 20$ мА, $I_2 = 30$ мА, $I_3 = 10$ мА, $I_4 = 40$ мА, $I_5 = 10$ мА)

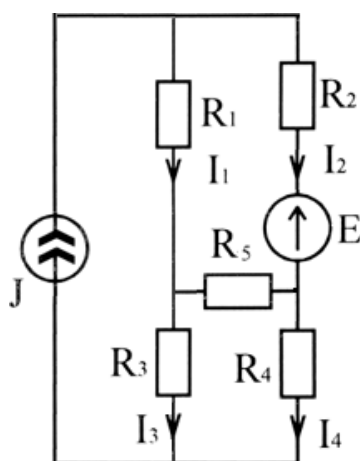


Рисунок 3.5

Контрольные вопросы

1. Сформулировать основные принципы метода узловых потенциалов.
2. Сколько уравнений необходимо составить по методу узловых потенциалов?
3. Сформулировать основные принципы метода контурных токов.
4. Сколько уравнений необходимо составить по методу контурных токов?
5. Каковы особенности применения метода контурных токов для схем, содержащих источник тока?
6. Каковы особенности применения метода узловых потенциалов для схем, содержащих идеальный источник ЭДС между узлами?
7. Как найти токи в ветвях по методу двух узлов?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

3. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для студентов / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.

Практическое занятие 4

Тема: Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока

Цель: Получить навыки перевода синусоидальных величин в комплексные, научиться строить векторные диаграммы.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (умение проводить инженерные изыскания), ПК-17 (умение применять знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности).

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости использовать комплексный метод для расчета электрических цепей.

Теоретическая часть

В настоящее время подавляющая часть электрической энергии генерируется (вырабатывается), передается и потребляется на переменном синусоидальном токе. В отличие от постоянного тока, где полярность источников электрической энергии с течением времени не меняется, при переменном токе происходит чередование полярности источников электрической энергии с определенной частотой. В России принята частота $f = 50$ Гц для генерации и передачи электрической энергии. Таким образом, *переменным ток* является в случае, если он с течением времени меняет свое значение и направление. Значение тока в любой данный момент времени t_1 называют *мгновенным* и обозначают малой буквой $i(t_1)$. Токи, мгновенные значения которых повторяются через равные промежутки времени в той же самой последовательности, называют периодическими, а наименьший промежуток времени, через который эти повторения наблюдаются – периодом T . Ток считается определенным, если известна его зависимость от времени $i(t)$. Термин «переменный ток» обычно применяют в узком смысле, а именно, для такого периодического тока, у которого постоянная составляющая тока равна нулю, т.е. $\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) dt = 0$ и особенно часто для синусоидального тока

$$i(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t).$$

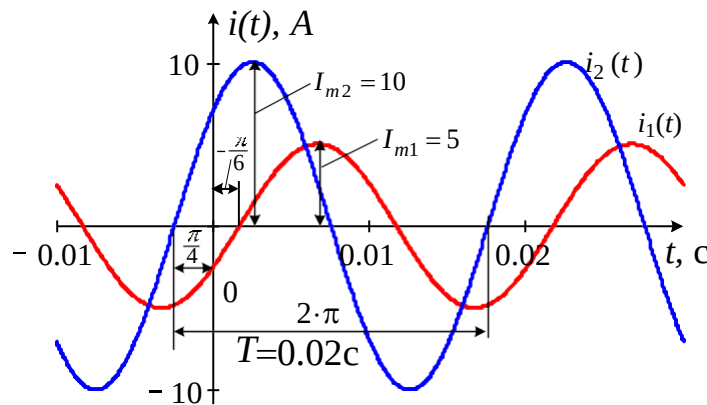
Основные понятия синусоидального тока.

Мгновенные значения синусоидального тока определяется выражением:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (4.1)$$

где I_m – амплитуда тока. Аргумент синуса называют фазой – $(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$. Угол называют начальной фазой. Фаза с течением времени непрерывно растет. После ее увеличения на $2 \cdot \pi$ весь цикл изменения тока повторяется. Величина $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ называется угловой частотой и показывает скорость изменения фазы.

Для примера на рисунке 4.1 построены графики синусоидальных токов одинаковой частоты $f = 50$ Гц, но с различными амплитудами и начальными фазами: $i_1(t) = 5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{\pi}{6}\right)$, $i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$.



Рисунке 4.1 – Графики синусоидальных токов

По оси абсцисс отложено время t и пропорциональная времени величина $\cdot t$. Начальная фаза отсчитывается всегда от момента, соответствующего началу синусоиды, до момента начала отсчета времени $t = 0$. При положительной начальной фазе $\varphi = \frac{\pi}{4}$ начало синусоиды тока $i(t)$ сдвинуто

влево, а при отрицательной начальной фазе $\varphi_1 = -\frac{\pi}{6}$ для тока $i_1(t)$ – вправо от начала координат. Если у нескольких синусоидальных функций, изменяющихся с одинаковой частотой, начала синусоид не совпадают, то говорят, что они сдвинуты относительно друг друга по фазе. На рисунке 4.1 $\varphi_1 - \varphi_2 < 0$, т.е. ток $i_1(t)$ отстает по фазе от тока $i_2(t)$. Если у синусоидальных функций одинаковые частоты и одинаковые начальные фазы, то говорят, что функции совпадают по фазе, если разность фаз равна $\pm \pi$, то говорят, что они противоположны по фазе.

Для численного описания переменного тока, принято использовать параметр, называемый действующее значение $I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt}$, который характеризует действие тока в электрической цепи за период. Действующее значение (его называют также эффективным или среднеквадратичным) синусоидального тока определяется следующим образом:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (I_m \cdot \sin(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot (I_m)^2 \cdot \left(\left(\frac{t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot t)}{4} \right) \Big|_0^T \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot (I_m)^2 \cdot \left(\frac{T}{2} - \frac{\sin(2 \cdot T / 2)}{4} - \left(\frac{0}{2} - \frac{\sin(2 \cdot 0)}{4} \right) \right)} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot (I_m)^2 \cdot \left(\frac{T}{2} \right)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Следовательно, действующее значение синусоидального тока равно $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot I_m$. Действующее значение синусоидального тока численно равно значению такого постоянного тока, который за время, равное периоду синусоидального тока, выделяет такое же количество теплоты, что и синусоидальный ток на одном и том же сопротивлении.

Большинство измерительных приборов показывают действующее значение измеряемой величины. (Определение показаний приборов будет рассмотрено в практическом занятии 10).

Изображение синусоидально изменяющихся величин на комплексной плоскости.

На рисунке 4.2 показан синусоидальный ток $i(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$, представляющий собой на комплексной плоскости вектор I_m .

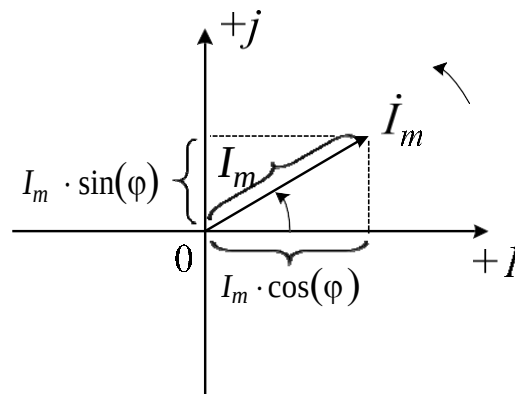


Рисунок 4.2 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

Синусоидальный ток $i(t)$ может быть записан в комплексном виде I_m (точка, поставленная над током I_m , означает, что эта величина изменяется во времени синусоидально) следующим образом:

$$I_m = I_m \cdot e^{j\varphi} = I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi).$$

где I_m – комплексная величина, модуль (длина вектора) которой равен I_m ;

$j = \sqrt{-1}$ – единица измерения по мнимой оси комплексной плоскости;

– угол, под которым вектор I_m проведен к вещественной оси $+1$ комплексной плоскости, равный начальной фазе. Выражение $I_m \cdot e^{j\varphi}$ называют *показательной* формой записи комплексного числа I_m .

$I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ называют алгебраической формой записи комплексного числа I_m .

$I_m \cdot \cos(\varphi)$ – *вещественная* часть комплекса I_m или *активная* составляющая тока I_m .

$j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – *мнимая* часть комплекса I_m или *реактивная* составляющая тока I_m .

Рассмотрим пример записи синусоидального тока в комплексном виде в показательной и алгебраической формах.

Пример.

Запишем в комплексном виде синусоидальные токи
 $i_1(t) = 5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{\pi}{6}\right)$ и $i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$:

$$I_{m1} = 5 \cdot e^{j\left(-\frac{\pi}{6}\right)} \text{ – показательная форма записи тока } i_1(t),$$

$$I_{m1} = 5 \cdot \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) + j \cdot 5 \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) \text{ – алгебраическая форма записи тока } i_1(t),$$

$$I_{m2} = 10 \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{4}\right)} \text{ – показательная форма записи тока } i_2(t),$$

$$I_{m2} = 10 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + j \cdot 10 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \text{ – алгебраическая форма записи тока } i_2(t).$$

Изобразим на комплексной плоскости (рисунок 4.3) синусоидальные токи $i_1(t) = 5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{\pi}{6}\right)$ и $i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$.

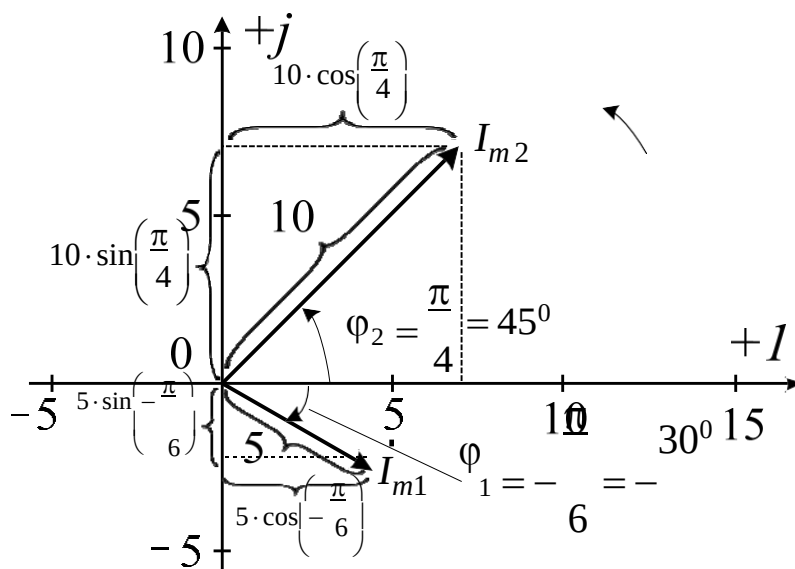


Рисунок 4.3 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

Сложение и вычитание синусоидальных функций времени на комплексной плоскости. Векторная диаграмма.

В результате сложении двух синусоидальных токов $i_1(t) = I_{m1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_1)$ и $i_2(t) = I_{m2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_2)$ одинаковой частоты получается некоторый ток той же частоты $i(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$. Найдем амплитуду I_m и начальную фазу искомого тока. Для этого сложим два тока в комплексном виде I_{m1} и I_{m2} , геометрическая сумма векторов этих токов даст комплексную амплитуду суммарного тока $I_m \cdot e^{j \cdot \varphi}$. Для определения разности двух токов (ЭДС, напряжений) следует произвести не сложение, а вычитание соответствующих векторов. Следует отметить, что если бы векторы I_m , I_{m1} , I_{m2} вращались вокруг начала координат с угловой скоростью, то взаимное расположение векторов относительно друг друга осталось бы без изменений.

Векторной диаграммой называют совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающей синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенные с соблюдением правильной ориентации

их относительно друг друга по фазе. Рассмотрим сложение и вычитание синусоидальных функций на примере.

Пример.

Необходимо сложить и вычесть два тока $i_1(t) = 5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{\pi}{6}\right)$ и

$i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$. Изобразим эти токи на комплексной плоскости в

виде векторов и проведем их сложение и вычитание (рисунок 4.4).

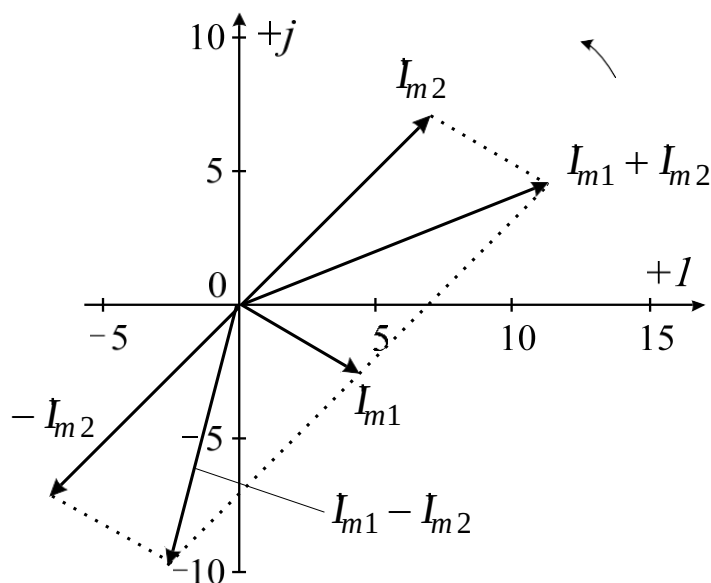


Рисунок 4.4 – Сложение и вычитание синусоидальных величин на комплексной плоскости

Проведем аналитическое сложение и вычитание токов в комплексной форме записи. Для этого используем алгебраическую форму записи комплексных токов:

$$I_{m1} = 5 \cdot \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) + j \cdot 5 \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) = 4,33 - j \cdot 2,5,$$

$$I_{m2} = 10 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + j \cdot 10 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = 7,071 + j \cdot 7,071,$$

$$I_{m1} + I_{m2} = 4,33 - j \cdot 2,5 + 7,071 + j \cdot 7,071 = 11,401 + j \cdot 4,571,$$

$$I_{m1} - I_{m2} = 4,33 - j \cdot 2,5 - 7,071 - j \cdot 7,071 = -2,741 - j \cdot 9,571$$

Если необходимо разделить или умножить два комплекса, тогда используют показательную форму записи или алгебраическую.

В показательной форме записи, при умножении модули умножают, показатели складывают, при делении модули делят, показатели вычитают:

$$I_{m1} \cdot I_{m2} = 5 \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{6} \right)} \cdot 10 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right)} = 50 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{6} \right)} = 50 \cdot e^{j \cdot \left(15^\circ \right)},$$

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{5}{10} \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{4} \right)} = 0,5 \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{5}{12} \cdot \pi \right)} = 0,5 \cdot e^{j \cdot \left(-75^\circ \right)}.$$

Умножение в алгебраической форме записи:

$$I_{m1} \cdot I_{m2} = (4,33 - j \cdot 2,5) \cdot (7,071 + j \cdot 7,071) =$$

$$= 4,33 \cdot 7,071 + j \cdot 7,071 \cdot 4,33 - j \cdot 2,5 \cdot 7,071 - j \cdot 2,5 \cdot j \cdot 7,071.$$

Далее, так как $j^2 = -1$ слагаемое $(-j \cdot 2,5 \cdot j \cdot 7,071)$ станет равно 17,677.

Тогда $I_{m1} \cdot I_{m2} = 30,617 + j \cdot 30,617 - j \cdot 17,677 + 17,677 = 48,296 + j \cdot 12,941$.

Деление в алгебраической форме записи, производится путем домножения числителя и знаменателя на сопряженный комплекс знаменателя. Сопряженный комплекс отличается от обычного знаком у мнимой части.

$$\frac{I_{m1}}{I_{m2}} = \frac{(4,33 - j \cdot 2,5)}{(7,071 + j \cdot 7,071)} = \frac{(4,33 - j \cdot 2,5) \cdot (7,071 - j \cdot 7,071)}{(7,071 + j \cdot 7,071) \cdot (7,071 - j \cdot 7,071)} =$$

$$= \frac{4,33 \cdot 7,071 - j \cdot 7,071 \cdot 4,33 - j \cdot 2,5 \cdot 7,071 + j \cdot 2,5 \cdot j \cdot 7,071}{7,071 \cdot 7,071 - j \cdot 7,071 \cdot 7,071 + j \cdot 7,071 \cdot 7,071 + 7,071 \cdot 7,071} =$$

$$= \frac{12,94 - j \cdot 48,295}{100} = 0,129 - j \cdot 0,483$$

Мгновенная мощность.

Протекание синусоидальных токов по участкам электрической цепи сопровождается потреблением энергии от источников. Скорость поступления энергии характеризуется мощностью. Под *мгновенной мощностью*, понимают произведение мгновенного значения напряжения $u(t)$ на участке цепи на мгновенное значение тока $i(t)$, протекающего по этому участку:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t).$$

Резистивный, индуктивный и емкостной элементы в цепи синусоидального тока.

Элементами реальных электрических цепей синусоидального тока являются резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. Резистивный элемент – это идеализированный схемный элемент, учитывающий выделение

теплоты в том или ином элементе реальной электрической цепи. Индуктивный элемент – это идеализированный, элемент представляющий катушку индуктивности без активного сопротивления $R=0$. Емкостной элемент – это идеализированный элемент, представляющий собой конденсатор без потерь $R=\infty$.

Напряжение совпадает с формой вызванного этим напряжением тока только в резистивных цепях, т.е. ток и напряжение в этом случае совпадают по фазе. В цепях с индуктивными и емкостными элементами формы напряжения и тока отличаются друг от друга.

В цепях с индуктивным элементом ток и напряжение связаны следующим выражением: $i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$. Если напряжение, приложенное к индуктивному элементу, имеет синусоидальную форму $u(t) = u_L(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, то ток определится из выражения

$$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) dt = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ),$$

$$i_L = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ),$$

где $I_m = \frac{U_m}{\omega \cdot L}$.

Произведение $\omega \cdot L$ обозначается X_L и называется *индуктивным сопротивлением* $X_L = \omega \cdot L$.

Таким образом, если к индуктивному элементу приложить напряжение гармонической формы, то ток будет отставать от напряжения на 90° (рисунок 4.5 4.6).

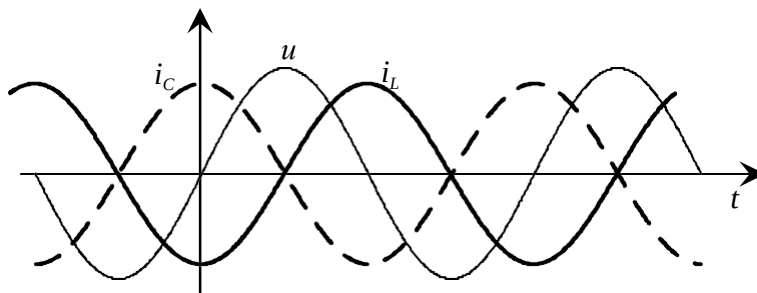


Рисунок 4.5 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе напряжения равной нулю

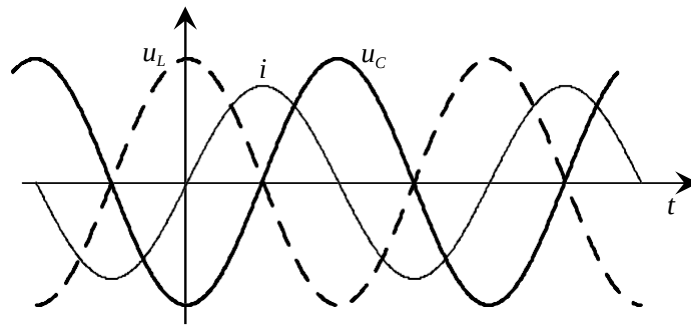


Рисунок 4.6 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе тока равной нулю

В цепях с емкостным элементом ток и напряжение связаны следующим выражением $i_C = C \frac{du_C}{dt}$. Если ко входу цепи приложено напряжение синусоидальной формы $u(t) = u_C(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, то ток через емкостной элемент определится из выражения:

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot \frac{d}{dt}(U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)) = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Так как множитель $\omega \cdot C \cdot U_m$ имеет размерность тока, обозначим его $I_m = \omega \cdot C \cdot U_m$. Известно, что $\cos(\omega \cdot t) = \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)$. Таким образом, ток через емкостной элемент $i_C = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ опережает напряжение на 90° (рисунок 4.5, 4.6). Величина $\frac{1}{\omega \cdot C}$ обозначается X_C и называется *емкостным сопротивлением* $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$.

Задания

1. Построить кривые изменения напряжения и тока во времени и начертить векторы, изображающие заданные синусоидальные функции

$$u(t) = 100 \cdot \sin\left(157 \cdot t + \frac{\pi}{10}\right) \text{ В}; \quad i(t) = 5 \cdot \sin\left(157 \cdot t - \frac{\pi}{8}\right) \text{ А}.$$

Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током? Определить период T и частоту ω .

2. Найти аналитически и при помощи векторной диаграммы сумму и разность синусоидальных токов. Найти аналитически их произведение и частное от деления.

а) $i_1(t) = 100 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$, μA ; $i_2(t) = 120 \cdot \sin(\omega \cdot t - 45^\circ)$, μA ;

б) $i_1(t) = -20 \cdot \sin(\omega \cdot t - 112^\circ)$, μA ; $i_2(t) = 50 \cdot \sin(\omega \cdot t + 250^\circ)$, μA ;

в) $i_1(t) = 50 \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ)$, μA ; $i_2(t) = 25 \cdot \sin(\omega \cdot t + 110^\circ)$, μA ;

3. Катушка с активным сопротивлением $R = 10 \text{ Ом}$, индуктивностью $L = 0,05 \text{ Гн}$ подключена к источнику синусоидального напряжения (рисунок 7.7), действующее значение которого $U = 120 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить полное сопротивление катушки, ток и сдвиг фаз между напряжением и током. Вычислить активную и реактивную составляющие напряжением на зажимах катушки. Построить векторную диаграмму напряжений и тока. ($X_L = 15,7 \text{ Ом}$, $Z = 18,6 \text{ Ом}$, $\varphi = 57^\circ 30'$, $I = 6,45 \text{ А}$, $U_{X_L} = 103 \text{ В}$, $U_R = 64,5 \text{ В}$)

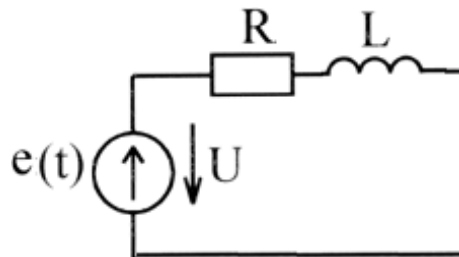


Рисунок 4.7

4. Найти мгновенные значения напряжения на всех участках и мгновенную мощность источника (рисунок 4.8). Дано: $J(t) = 2 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$, $f = 200 \text{ Гц}$, $r = 10 \text{ Ом}$, $L = 0,01 \text{ Гн}$, $C = 80 \text{ мкФ}$.

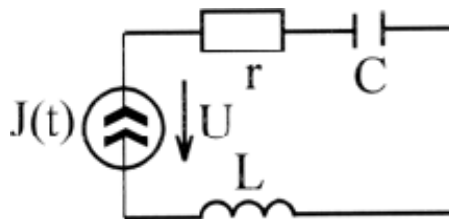


Рисунок 4.8

$$(u_r(t) = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ), \quad u_L(t) = 25 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ), \quad u_C(t) = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t - 60^\circ), \\ u(t) = 20,6 \cdot \sin(\omega \cdot t + 44^\circ), \quad p(t) = 17,67 - 18 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + 74^\circ)).$$

Контрольные вопросы

1. Чем отличается переменный ток от постоянного?
2. Приведите основные характеристики синусоидального тока.
3. Как определяется действующее значения переменного тока?
4. Как изображается переменный ток на комплексной плоскости?
5. Приведите комплексные формы записи переменного тока.
6. Как аналитически и графически сложить (вычесть) два переменных тока?
7. Как аналитически умножить или разделить две комплексные величины?
8. Как определяется и что показывает мгновенная мощность?
9. Как определяется индуктивное сопротивление? Емкостное?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.

Практическое занятие 5

Тема: Расчет однофазных цепей синусоидального тока

Цель: Получить навыки расчета разветвленных однофазных цепей синусоидального тока различными методами как в обычных режимах, так и в режиме резонанса, научиться сопровождать расчеты векторными и топографическими диаграммами.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (умение проводить инженерные изыскания), ПК-17 (умение применять знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности).

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости проводить расчеты однофазных цепей используемых при электроснабжении потребителей.

Теоретическая часть

Символический (комплексный) метод расчета цепей синусоидального тока.

Рассмотрим электрическую цепь синусоидального тока, схема которой приведена на рисунке 5.1.

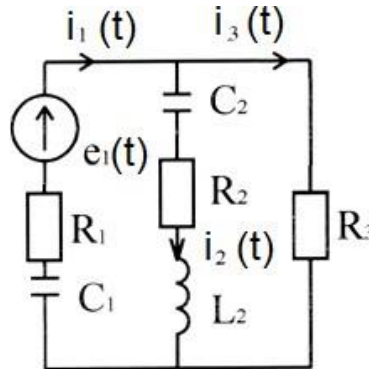


Рисунок 5.1 – Схема электрической цепи синусоидального тока

В цепи действует синусоидальный источник ЭДС $e_1(t) = E_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$. Запишем уравнения по законам Кирхгофа для мгновенных значений, учитывая, что $u_R(t) = i(t) \cdot R$; $u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$; $u_C(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt$. Далее в уравнениях синусоидальные токи и напряжения, зависящие от времени будем обозначать i , e , u_R , u_L , u_C :

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ u_{R1} + u_{C1} + u_{C2} + u_{R2} + u_{L2} = e_1 \\ -u_{L2} - u_{R2} - u_{C2} + u_{R3} = 0 \end{cases}$$

Выражая мгновенные значения напряжения через мгновенные значения токов, получаем

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 \cdot R_1 + \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1 dt + \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt + i_2 \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} = e_1 \\ -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - i_2 \cdot R_2 - \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt + i_3 \cdot R_3 = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Система уравнений (5.1) представляет собой законы Кирхгофа в дифференциальной форме для схемы электрической цепи (рисунок 5.1).

Сущность символического метода расчета состоит в том, что при синусоидальном токе можно перейти от уравнений, составленных для мгновенных значений и являющихся дифференциальными уравнениями, к

алгебраическим уравнениям, составленным относительно комплексов тока и ЭДС. При этом следует произвести следующие замены:

$$\begin{aligned}
 i &\rightarrow I_m \\
 e &\rightarrow E_m \\
 u_R = i \cdot R &\rightarrow I_m \cdot R \\
 u_L = L \cdot \frac{di}{dt} &\rightarrow I_m \cdot j \cdot \omega \cdot L \\
 u_C = \frac{1}{C} \int i dt &\rightarrow I_m \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right)
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Мгновенное значение напряжения на индуктивной катушке $u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$

заменено комплексом $I_m \cdot j \cdot \omega \cdot L$, опережающим ток на 90° . Опережение вектора тока происходит вследствие умножения его на $j = 1 \cdot e^{j \cdot 90^\circ}$, так как умножение любого вектора на j сдвигает его на угол, равный $+90^\circ$. Таким

образом, мгновенное значение напряжения на конденсаторе $u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i dt$ заменено комплексом $I_m \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right)$, отстающим от тока на 90° . Отставание

вектора тока происходит вследствие умножения его на $(-j = 1 \cdot e^{-j \cdot 90^\circ})$, так как умножение любого вектора на $(-j)$ сдвигает его на угол, равный (-90°) .

Анализ электрических цепей также можно производить в комплексах действующих значений токов I и напряжений U , которые в $\sqrt{2}$ раз меньше соответствующих амплитудных комплексов I_m U_m . В задачах, как правило, расчет ведется для действующих значений токов и напряжений, если не оговорено другое. Расчет для действующих значений проводится потому, что модули этих значений будут показывать измерительные приборы, включенные в рассматриваемую электрическую цепь.

После замен мгновенных величин в схеме на рисунке 5.1 на комплексы действующих значений схема электрической цепи примет вид, показанный на рисунке 5.2.

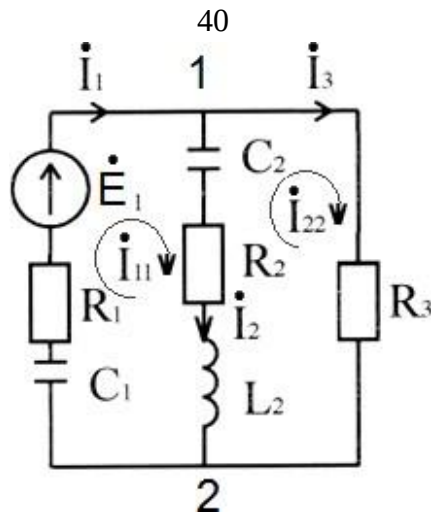


Рисунок 5.2 – Схема электрической цепи синусоидального тока

Символическая форма записи уравнений для действующих значений токов I и U напряжений по законам Кирхгофа для схемы электрической цепи на рисунке 5.2:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ \dot{I}_1 \cdot R_1 + \dot{I}_1 \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_1} \right) + \dot{I}_2 \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) + \dot{I}_2 \cdot R_2 + \dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 = \dot{E}_1 \\ -\dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 - \dot{I}_2 \cdot R_2 - \dot{I}_2 \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) + \dot{I}_3 \cdot R_3 = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Решив систему уравнений (5.3), получим комплексы неизвестных токов I_1 , I_2 и I_3 . После перехода от комплексных значений токов к мгновенным $i_1(t)$, $i_2(t)$ и $i_3(t)$ токи считаются определенными.

Для расчета цепей переменного тока посредством комплексных чисел могут использоваться все методы, применяемые для расчета цепей постоянного тока. При этом напряжения, потенциалы, токи, сопротивления и проводимости должны быть записаны в комплексной форме.

Метод контурных токов для цепи переменного тока.

Рассмотрим метод контурных токов на примере схемы, представленной на рисунке 5.2.

Для заданной схемы направления обхода контурных токов I_{11} , I_{22} взяты по часовой стрелке. Источников тока в схеме нет. Таким образом, система уравнений по методу контурных токов будет иметь две строки и два столбца:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot \underline{Z}_{11} - I_{22} \cdot \underline{Z}_{12} = E_{11} \\ -I_{11} \cdot \underline{Z}_{12} + I_{22} \cdot \underline{Z}_{22} = E_{22} \end{cases} \quad (5.4)$$

где $\underline{Z}_{mm}$ – собственное комплексное сопротивление контура m (сумма комплексных сопротивлений всех ветвей, входящих в контур m). В нашем

случае $\underline{Z}_{11} = R_1 - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_1} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} + R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 = R_1 - j \cdot X_{C_1} - j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}$;

$$\underline{Z}_{22} = -j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2} + R_3.$$

$\underline{Z}_{ml}$ – общее комплексное сопротивление контуров m и l , берется со знаком «плюс», если направления контурных токов в данной ветви совпадают, в обратном случае – берется знак «минус». Для рассматриваемой цепи общим сопротивлением между контурами 1 и 2, а, следовательно, 2 и 1, является

$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}$. Направление контурных токов в данной ветви не совпадают, следовательно, сопротивление $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$, войдет в уравнение со знаком минус.

E_{mm} – комплекс алгебраической суммы ЭДС, входящих в контур m . В нашем случае $E_{11} = E_1$, $E_{22} = 0$.

Таким образом, в новых обозначениях система уравнений 5.4 примет следующий вид:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 - j \cdot X_{C_1} - j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}) - I_{22} \cdot (-j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}) = E_1 \\ -I_{11} \cdot (-j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}) + I_{22} \cdot (-j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2} + R_3) = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

Решив полученную систему (5.5) относительно I_{11} и I_{22} , найдем токи в ветвях электрической цепи.

Токи в ветвях электрической цепи, через контурные токи определяются следующим образом: $I_1 = I_{11}$; $I_2 = I_{11} - I_{22}$; $I_3 = I_{22}$.

Метод узловых потенциалов для цепи переменного тока.

В представленной на рисунке 5.2 электрической цепи всего два узла. Для расчета токов в такой цепи используем метод двух узлов.

Запишем выражение для напряжения $U_{12} = -U_{21}$ по методу двух узлов:

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) = -U_{21} = -(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{E_1 \cdot R_1 - \frac{1}{j \cdot X_{C_1}}}{\frac{1}{R_1 - j \cdot X_{C_1}} + \frac{1}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} + \frac{1}{R_3}} \quad (5.6)$$

Токи в ветвях электрической цепи определяются по закону Ома следующим образом:

$$I_1 = \frac{E_1 - (\Phi_1 - \Phi_2)}{R_1 - j \cdot X_{C_1}}; I_2 = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}; I_3 = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R_3}.$$

Использование закона Ома для расчета цепи переменного тока рассмотрим на примере схемы, представленной на рисунке 5.2.

В схеме (рисунок 5.2) содержится один источник, поэтому для нахождения тока I_1 используем закон Ома:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1 - j \cdot X_{C_1} + \frac{R_3 \cdot (R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}};$$

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}};$$

$$I_3 = I_1 \cdot \frac{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}.$$

Комплексное сопротивление относительно источника E_1 равно $R_1 - j \cdot X_{C_1} + \frac{R_3 \cdot (R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}$, т.к. ветвь с R_3 соединена параллельно с ветвью $(R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})$, по которой протекает ток I_2 , а их общее сопротивление $\frac{R_3 \cdot (R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}$ соединено последовательно с участком цепи $R_1 - j \cdot X_{C_1}$.

Токи I_2 и I_3 определялись через параллельное токораспределение I_1 по ветвям R_3 и $(R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})$.

Пример расчета электрической цепи синусоидального тока.

Рассчитать токи в ветвях электрической цепи однофазного переменного тока рисунок 5.3. Если $e_1(t) = 20 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$, $C_1 = C_2 = 318,5$ мкФ, $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $L_2 = 16$ мГн, $R_3 = 20$ Ом.

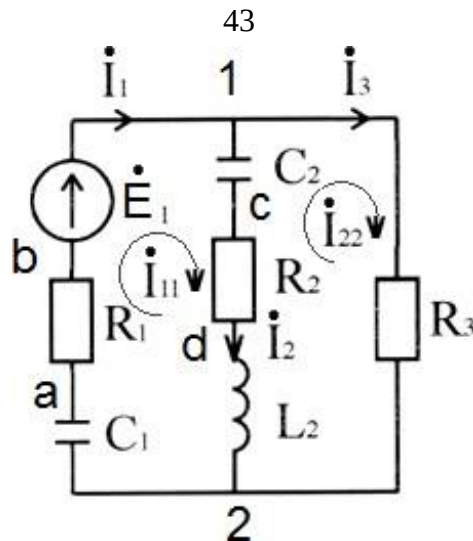


Рисунок 5.3 – Схема электрической цепи синусоидального тока

Решение.

Воспользуемся методом двух узлов

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) = -U_{21} = -(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{E_1 \cdot R_1 - \frac{1}{j \cdot X_{C_1}}}{\frac{1}{R_1 - j \cdot X_{C_1}} + \frac{1}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} + \frac{1}{R_3}}.$$

Определим индуктивное и емкостные сопротивления

$$X_{L_2} = \omega \cdot L = 314 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ Ом},$$

$$X_{C_1} = X_{C_2} = \frac{1}{\omega \cdot C_1} = \frac{1}{314 \cdot 318,5 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом}.$$

Определим комплекс действующего значения источника $E_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot \varphi_1}$,

т.к. $E_m = 200 \cdot \sqrt{2}$, а $\varphi_1 = 0$. Тогда $E_1 = 200 \cdot e^{j \cdot 0} = 200 \text{ В}$.

Подставим в выражение U_{12} полученные значения:

$$U_{12} = \frac{200 \cdot \frac{1}{10 - j \cdot 10}}{\frac{1}{10 - j \cdot 10} + \frac{1}{10 + j \cdot 5 - j \cdot 10} + \frac{1}{20}}.$$

Приведем знаменатель полученного выражения к виду

$$\begin{aligned} \frac{1}{10 - j \cdot 10} + \frac{1}{10 + j \cdot 5 - j \cdot 10} + \frac{1}{20} &= \frac{20 \cdot (10 - j \cdot 5) + 20 \cdot (10 - j \cdot 10) + (10 - j \cdot 10) \cdot (10 - j \cdot 5)}{(10 - j \cdot 10) \cdot (10 - j \cdot 5) \cdot 20} = \\ &= \frac{200 - j \cdot 100 + 200 - j \cdot 200 + 100 - j \cdot 50 - j \cdot 100 - 50}{(10 - j \cdot 10) \cdot (10 - j \cdot 5) \cdot 20} = \frac{450 - j \cdot 450}{(10 - j \cdot 10) \cdot (10 - j \cdot 5) \cdot 20}. \end{aligned}$$

После подстановки полученного значения в выражение для U_{12} , получим:

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= \frac{200}{\frac{10 - j \cdot 10}{450 - j \cdot 450}} = \frac{200 \cdot 20 \cdot (10 - j \cdot 5)}{450 - j \cdot 450} = \frac{40000 - j \cdot 20000}{450 - j \cdot 450} = \\
 &= \frac{(10 - j \cdot 10) \cdot (10 - j \cdot 5) \cdot 20}{(450 - j \cdot 450) \cdot (450 + j \cdot 450)} = \\
 &= \frac{(40000 - j \cdot 20000) \cdot (450 + j \cdot 450)}{(450 - j \cdot 450) \cdot (450 + j \cdot 450)} = \\
 &= \frac{40000 \cdot 450 - j \cdot 20000 \cdot 450 + j \cdot 450 \cdot 40000 + 450 \cdot 20000}{450^2 - j \cdot 450 \cdot 450 + j \cdot 450 \cdot 450 + 450^2} = \\
 &= \frac{18000000 + 9000000 - j \cdot 9000000 + j \cdot 18000000}{202500 + 202500} = \frac{27000000 + j \cdot 9000000}{405000} = \\
 &= \frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9} \approx 66,667 + j \cdot 22,222.
 \end{aligned}$$

Теперь найдем ток I_1 , используя закона Ома:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{E - (\varphi_1 - \varphi_2)}{R_1 + j \cdot X_{C_1}} = \frac{200 - \left(\frac{600 + j \cdot 200}{9} \right)}{10 - j \cdot 10} = \frac{1800 - 600 - j \cdot 200}{10 - j \cdot 10} = \\
 &= \frac{(1200 - j \cdot 200)}{(90 - j \cdot 90)} = \frac{(1200 - j \cdot 200) \cdot (90 + j \cdot 90)}{(90 - j \cdot 90) \cdot (90 + j \cdot 90)} = \\
 &= \frac{1200 \cdot 90 + j \cdot 90 \cdot 1200 - j \cdot 200 \cdot 90 + 200 \cdot 90}{90^2 + 90^2} = \frac{126000 + j \cdot 90000}{16200} = \\
 &= \frac{70}{9} + j \cdot \frac{50}{9} \approx 7,778 + j \cdot 5,556.
 \end{aligned}$$

В показательной форме записи ток I_1 равен:

$$I_1 = |I_1| \cdot e^{j \cdot \arg(I_1)} = \sqrt{\left(\frac{70}{9} \right)^2 + \left(\frac{50}{9} \right)^2} \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{50/9}{70/9} \right)} = \sqrt{\frac{7400}{81}} \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{5}{7} \right)} \approx 9,558 \cdot e^{j \cdot (35,538^\circ)}.$$

Ток I_2 будет равен:

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} = \frac{\frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9}}{10 + j \cdot 5 - j \cdot 10} = \frac{40}{9} + j \cdot \frac{40}{9} \approx 4,444 + j \cdot 4,444.$$

Ток I_2 в показательной форме записи $I_2 = |I_2| \cdot e^{j \cdot \arg(I_2)} \approx 6,285 \cdot e^{j \cdot (45^\circ)}$.

Ток I_3 будет равен:

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_3} = \frac{\frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9}}{20} = \frac{10}{3} + j \cdot \frac{10}{9} \approx 3,333 + j \cdot 1,111.$$

Ток I_3 в показательной форме записи $I_3 = |I_3| \cdot e^{j \cdot \arg(I_3)} \approx 3,514 \cdot e^{j \cdot (18,435^\circ)}$.

Таким образом, запишем мгновенные значения токов:

$$i_1(t) = 9,558 \cdot \sin(314 \cdot t + 35,538^\circ), \quad i_2(t) = 6,285 \cdot \sin(314 \cdot t + 45^\circ), \\ i_3(t) = 3,514 \cdot \sin(314 \cdot t + 18,435^\circ).$$

Векторная диаграмма токов.

На рисунке 5.4 представлена векторная диаграмма токов для электрической цепи, изображенной на рисунке 5.3.

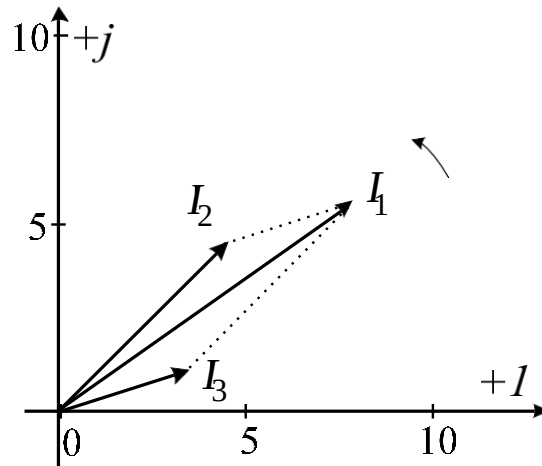


Рисунок 5.4 – Векторная диаграмма токов

Определим потенциалы точек электрической схемы рисунок 5.3.

$$\varphi_2 = 0;$$

$$\varphi_a = \varphi_2 - I_1 \cdot (-j \cdot X_{C_1}) \approx -(7,778 + j \cdot 5,556) \cdot (-j \cdot 10) \approx -55,556 + j \cdot 77,778;$$

$$\varphi_b = \varphi_a - I_1 \cdot R_1 = -55,556 + j \cdot 77,778 - (7,778 + j \cdot 5,556) \cdot 10 \approx -133,333 + j \cdot 22,222;$$

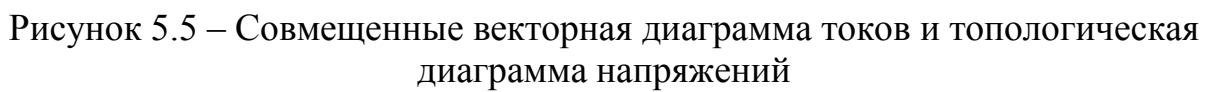
$$\varphi_c = \varphi_b + E_1 \approx -133,333 + j \cdot 22,222 + 200 \approx 66,667 + j \cdot 22,222;$$

$$\varphi_d = \varphi_c - I_2 \cdot (-j \cdot X_{C_2}) = 66,667 + j \cdot 22,222 - (4,444 + j \cdot 4,444) \cdot (-j \cdot 10) \approx 22,222 + j \cdot 66,667;$$

$$\varphi_e = \varphi_d - I_2 \cdot R_2 = 22,222 + j \cdot 66,667 - (4,444 + j \cdot 4,444) \cdot 10 \approx -22,222 + j \cdot 22,222;$$

$$\varphi_f = \varphi_e - I_2 \cdot j \cdot X_{L_2} = -22,222 + j \cdot 22,222 - (4,444 + j \cdot 4,444) \cdot j \cdot 5 \approx 0.$$

Потенциалы точек на комплексной плоскости образуют *топологическую диаграмму*. Для схемы (рисунок 5.3) топологическая диаграмма, совмещенная с векторной диаграммой токов, представлена на рисунке 5.5. Масштаб векторов тока при это увеличен в десять раз.



Если аналитический расчет дает результаты, не совпадающие с такими очевидными положениями, то, следовательно, в расчете есть ошибка, которую необходимо устранить. Кроме того, векторную диаграмму часто используют и как средство расчета.

Активная, реактивная и полная мощность.

Мгновенная мощность, производимая и отдаваемая источником ЭДС и получаемая нагрузкой, равна скорости совершения работы A в данный момент времени $p = \frac{dA}{dt} = u \cdot i$.

Рассмотрим на *примере* электрической цепи (рисунок 5.3) прием, позволяющий найти активную и реактивную мощности при известных комплексах напряжения и тока.

Активная мощность в цепи переменного тока:

$$P_{\text{пол}} = U_{R_1} \cdot I_1 + U_{R_2} \cdot I_2 + U_{R_3} \cdot I_3 = (|I_1|)^2 \cdot R_1 + (|I_2|)^2 \cdot R_2 + (|I_3|)^2 \cdot R_3,$$

где U_{R_1} , U_{R_2} , U_{R_3} – действующие значения напряжения на резисторах, $|I_1|$ – модуль (длина вектора) комплекса тока I_1 .

$$\begin{aligned} P_{\text{пол}} &= (|7,778 + j \cdot 5,556|)^2 \cdot 10 + (|4,444 + j \cdot 4,444|)^2 \cdot 10 + (|3,333 + j \cdot 1,111|)^2 \cdot 20 = \\ &= \sqrt{(7,778)^2 + (5,556)^2} \cdot 10 + \sqrt{(4,444)^2 + (4,444)^2} \cdot 10 + \sqrt{(3,333)^2 + (1,111)^2} \cdot 20 = 1556. \end{aligned}$$

Реактивная мощность в цепи переменного тока:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пол}} &= (|I_1|)^2 \cdot (-j \cdot X_{C_1}) + (|I_2|)^2 \cdot (j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}) = \\ &= \sqrt{(7,778)^2 + (5,556)^2} \cdot (-j \cdot 10) + \sqrt{(4,444)^2 + (1,111)^2} \cdot (j \cdot 5 - j \cdot 10) = -j \cdot 1111. \end{aligned}$$

Комплекс полной мощности получаемой нагрузкой от источника ЭДС E_1 :

$$S_{\text{пол}} = P_{\text{пол}} \pm j \cdot Q_{\text{пол}} = 1556 - j \cdot 1111.$$

В формуле стоит знак $\pm$, т.к. реактивная мощность может быть, как положительная, так и отрицательная, в зависимости от характера нагрузки. В нашем случае $P_{\text{пол}} = 1,556$ кВт, $Q_{\text{пол}} = -j \cdot 1,111$ кВар.

Комплекс полной мощности $S_{\text{отд}}$, отдаваемой (генерируемой) источником ЭДС E_1 , определяется следующим образом:

$$S_{\text{отд}} = E_1 \cdot I_1^*,$$

где I_1^* – сопряженный комплекс тока I_1 . Для рассматриваемой схемы $I_1 = 7,778 + j \cdot 5,556$. Сопряженный комплекс тока I_1^* отличается от простого

комплекса I_1 тем, что у мнимой части тока I_1 необходимо изменить знак $I_1^* = 7,778 - j \cdot 5,556$ (в рассматриваемом случае знак «плюс» меняется на «минус»).

Таким образом, $S_{отд} = 200 \cdot (7,778 - j \cdot 5,556) = 1556 - j \cdot 1111$. Вещественная часть комплекса полной мощности $S_{отд}$ обозначается $P_{отд}$ и является активной мощностью, генерируемой источником E_1 . Мнимая часть – это реактивная мощность $Q_{отд}$. В рассматриваемом случае $P_{отд} = 1,556$ кВт, $Q_{отд} = -j \cdot 1,111$ кВар.

Расчет показывает, что баланс активных и реактивных мощностей в рассматриваемой цепи рисунок 5.3 выполняется.

На рисунке 5.7 представлена иллюстрация токов, напряжений, активной, реактивной и полной мощности для электрической цепи, изображенной на рисунке 5.3.

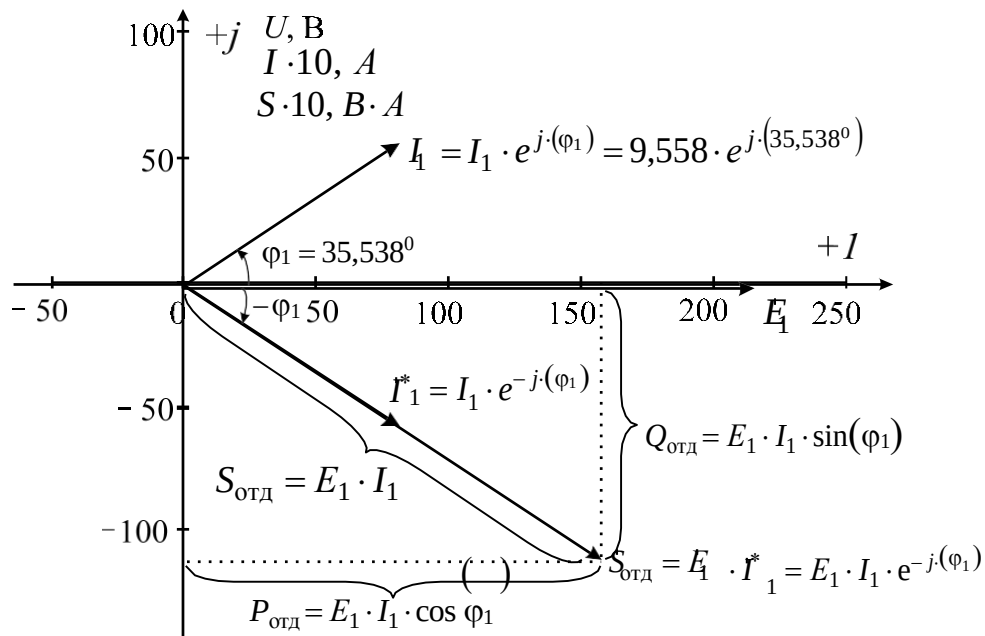


Рисунок 5.7 – Векторная диаграмма токов, напряжений и мощностей
Измерение активной мощности в цепи переменного тока.

Активная мощность измеряется ваттметром W , который имеет две цепи или обмотки. На рисунке 5.8 показана обмотка тока, которая имеет два зажима (вывода) 1 и 2, а также обмотка напряжения (зажимы 3 и 4). Одноименные зажимы обозначают звездочками.

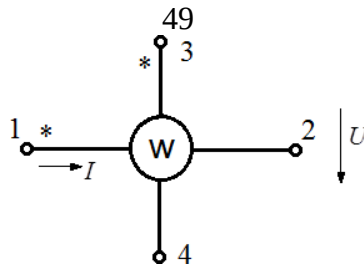


Рисунок 5.8 – Изображение ваттметра на электрической схеме

Ваттметр измеряет значение $W = \operatorname{Re}[U \cdot I^*] = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$, где U и I – действующие значения напряжения и тока, подведенные к ваттметру, а φ – угол сдвига фаз между ними, который соответствует одинаковым положительным направлениям U и I относительно выводов, отмеченных звездочкой.

Вольтметры V и амперметры A в цепи переменного тока показывают модуль действующего значения измеряемой величины.

Резонансный режим работы цепей переменного тока.

В цепи переменного тока, содержащей один или несколько индуктивных или емкостных элементов, подключенных к источнику энергии возможен режим резонанса, при котором ток и напряжение на входе цепи будут совпадать по фазе. Различают два основных вида резонансных режимов: *резонанс токов* и *резонанс напряжений*. Резонансный режим на практике используют для уменьшения сдвига фаз между напряжением на приемнике и током, потребляемым от генератора.

Резонанс токов возникает в параллельном колебательном контуре (рисунок 5.9).

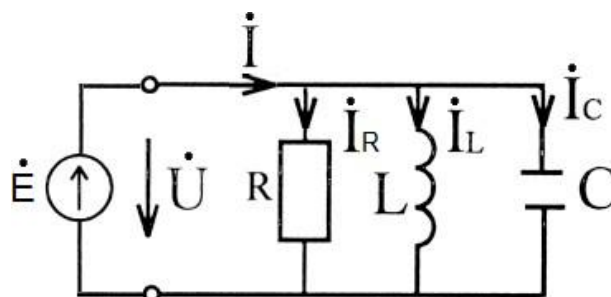


Рисунок 5.9 – Параллельный колебательный контур

При напряжении питания $U = U \cdot e^{j\psi_U}$ комплексное значение общего тока будет равно:

где $Y = \frac{1}{R} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L} + \frac{1}{\left(\frac{1}{g} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L} \right)} = \frac{1}{R} - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \frac{1}{g} \right) + j \cdot (\omega \cdot C) =$

$$= \frac{1}{R} - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right) = \frac{1}{R} - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right) = g - j \cdot (b_L - b_C) - \text{комплексная проводимость цепи};$$

$$Y = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right)^2} - \text{ее модуль (полная проводимость)};$$

$\varphi = \psi_U - \psi_I$ – аргумент.

Действующее значение тока I

$$I = U \cdot Y = U \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right)^2}.$$

При угловой частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ индуктивная $b_L = \frac{1}{\omega \cdot L}$ и емкостная

$b_C = \omega \cdot C$ проводимости ветвей одинаковы $b_L = b_C$, угол сдвига фаз тока и

напряжения $\varphi = \psi_U - \psi_I = 0$. Полная проводимость цепи $Y = g = \frac{1}{R}$, и общий

ток $I_0 = U \cdot g = \frac{U}{R}$. Если напряжение U на зажимах цепи и активная

проводимость g цепи не изменяются, то общий ток при резонансе имеет наименьшее значение. Токи в индуктивном и емкостном элементах равны по величине и находятся в противофазе. Векторная диаграмма при резонансе токов представлена на рисунке 5.10.

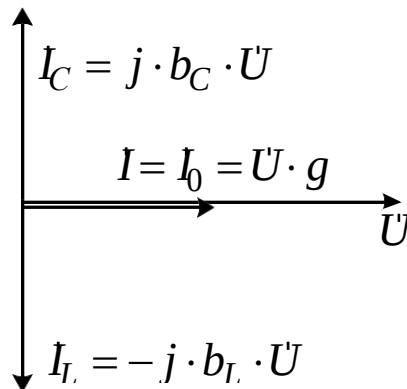


Рисунок 5.10 – Векторная диаграмма токов при параллельном резонансе

Если в ветвях с индуктивным и емкостным элементами включены резисторы R_L и R_C , то условием резонанса токов в цепи будет равенство индуктивной и емкостной проводимостей ветвей (рисунок 5.11):

$$\frac{\omega \cdot L}{R_L^2 + (\omega \cdot L)^2} = \frac{\frac{1}{\omega \cdot C}}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}, \text{ резонансная частота } \omega = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}.$$

Добротность для параллельного контура $Q = \frac{I_L}{I_0} = \frac{I_C}{I_0}$ определяет

кратность превышения тока в индуктивном и емкостном элементах над общим током в режиме резонанса. Резонансные свойства контура характеризуют также величиной, носящей название затухание контура $d = \frac{1}{Q}$.

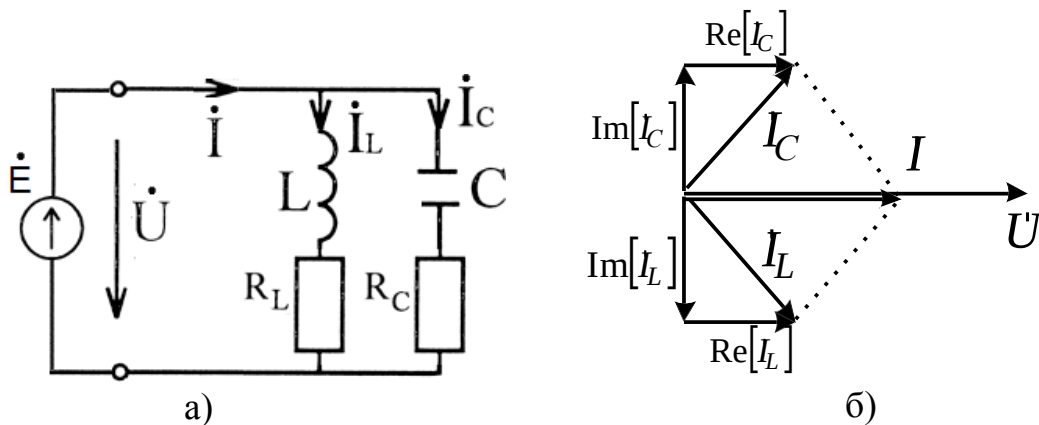


Рисунок 5.11 – Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б) параллельного колебательного контура в режиме резонанса

Резонанс напряжений возникает в последовательном колебательном контуре (рисунок 5.12), который содержит индуктивный L , емкостной C и резистивный R элементы.

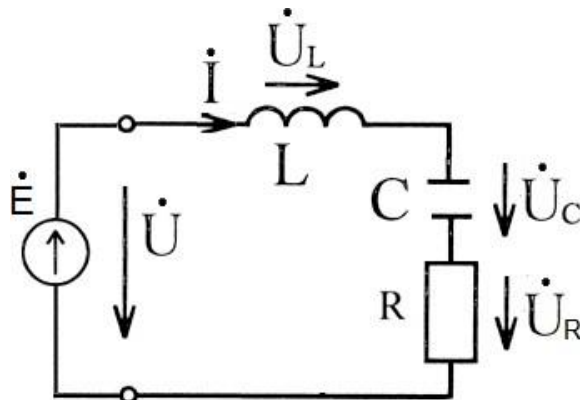


Рисунок 5.12 – Последовательный колебательный контур

По закону Ома комплексная величина тока в контуре определяется

$$I = I \cdot e^{j\psi_i} = \frac{U}{Z} = \frac{U \cdot e^{j\psi_U}}{Z \cdot e^{j\varphi}},$$

где $\underline{Z} = R + j \cdot \omega \cdot L - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot C} \right)$ – комплексное входное сопротивление,

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}$ – его модуль (полное сопротивление),

$\varphi = \psi_U - \psi_i = \arctg \left(\frac{\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}{R} \right)$ – его аргумент.

Действующее значение тока: $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}.$

Режим работы неразветвленного участка цепи, при котором ее ток и напряжение совпадают по фазе $\psi_u = \psi_i$, $\varphi = 0$, называется резонансом напряжений. В режиме резонанса напряжение на емкостном и напряжение на индуктивном элементах равны и находятся в противофазе рисунок 5.13.

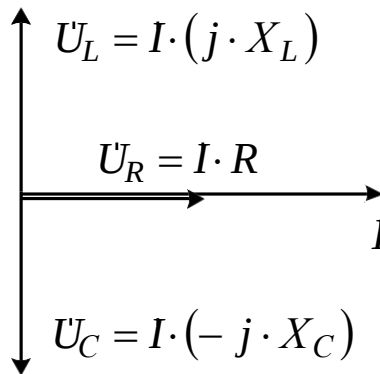


Рисунок 5.13 – Векторная диаграмма напряжений при последовательном резонансе

Резонансного режима можно достичь, изменяя частоту приложенного к цепи напряжения или параметры цепи: индуктивность катушки и емкость конденсатора. Величины угловой частоты ω_0 , индуктивности L_0 и емкости C_0 ,

в резонансном режиме: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}.$

Если напряжение U на зажимах цепи и активное сопротивление R цепи не изменяются, то ток при резонансе имеет наибольшее значение, равное $I_0 = \frac{U}{R}$ и не зависящее от величин реактивных сопротивлений. Напряжения на емкостном и индуктивном элементах могут во много раз превысить напряжение питания, если $\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}} > R$, где $\sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$ – характеристическое (волновое) сопротивление колебательного контура. Отношение $\frac{U_{Cp}}{U} = \frac{U_{Lp}}{U} = \frac{\rho}{R} = Q$ определяет кратность превышения напряжения на зажимах индуктивного и емкостного элементов над напряжением питания и называется добротностью контура.

Цепи переменного тока с взаимной индуктивностью.

Если две катушки изготовлены таким образом, что магнитный поток одной пересекает витки другой, то между катушками имеется взаимная индуктивность M . При согласном включении катушек магнитный поток, вызванный током одной катушки, совпадает по направлению с магнитным потоком, вызванным током другой катушки ($M > 0$). Соединение катушек, при котором магнитные потоки направлены в противоположные стороны, является встречным ($M < 0$).

На схемах замещения электрических цепей точками обозначены одноименные выводы (начала катушек). При согласном включении катушек токи направлены одинаково относительно одноименных выводов (рисунок 5.14 а). Если токи направлены по-разному относительно одноименных выводов (рисунок 5.44 б), то катушки включены встречно.

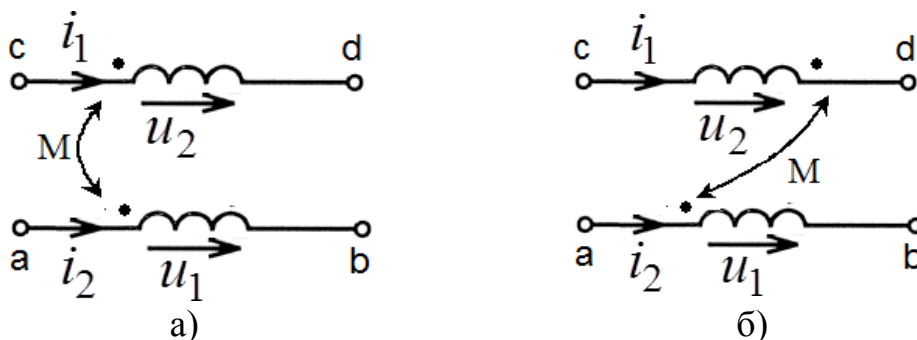


Рисунок 5.14 – Схема замещения электрической цепи

Напряжения на индуктивных элементах при наличии индуктивной связи определяется при согласном включении как

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

при встречном включении $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}.$

В режиме синусоидального тока комплексные значения напряжения на индуктивных элементах при согласном включении определяются:

$$U_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2, \quad U_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1;$$

при встречном включении –

$$U_1 = j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2, \quad U_2 = j\omega L_2 I_2 - j\omega M I_1.$$

Степень индуктивной связи двух элементов цепи характеризуется коэффициентом связи $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$. При $k = 1$ ($M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$) имеем

совершенную связь обмоток – весь поток, создаваемый одной обмоткой, пересекает сечение витков второй катушки, и рассеяние магнитного потока отсутствует. К этому режиму можно приблизиться, помещая обе катушки на общем сердечнике, материал которого имеет высокую магнитную проницаемость. Практически всегда $k < 1$. Примером цепи с магнитной связью является трансформатор. *Трансформатор* используется для преобразования токов и напряжений, развязки и согласования отдельных участков цепи. Он состоит из двух или нескольких индуктивно связанных обмоток или катушек. (задачи по трансформаторам будет рассмотрены в практическом занятии 7)

Задания

1. Для электрической цепи однофазного переменного тока схема, которой представлена на рисунке 5.15. Записать уравнения по законам Кирхгофа в дифференциальной форме. Найти токи ветвей методом контурных токов и узловых потенциалов, напряжения на участках цепи, активную, реактивную и полную мощности, а также построить векторную диаграмму токов и напряжений. Определить показание измерительных приборов.

Дано: $e_1(t) = e_3(t) = 20 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$, $C_1 = C_2 = 318,5$ мкФ, $R_2 = 10$ Ом, $L_2 = 16$ мГн, $R_3 = 10$ Ом. ($I_1 = j \cdot 1$ А, $I_2 = 1$ А, $I_3 = (1 + j \cdot 1)$ А)

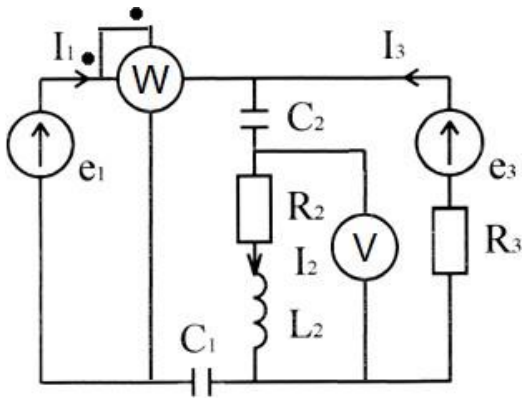


Рисунок 5.15

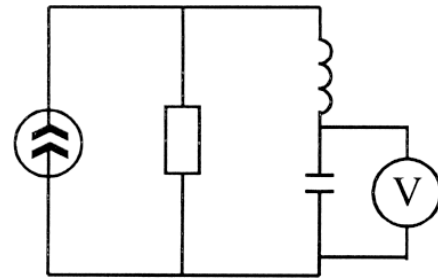


Рисунок 5.16

2. Источник тока $J(t) = 10 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, частота которого может изменяться, подключен к схеме рисунок 5.16 с параметрами $R = 10 \text{ Ом}$, $C = 1 \text{ мкФ}$. Напряжение на емкости в режиме резонанса равно 10 В. Определить резонансную частоту и индуктивность. (10^6 рад./с , 10^{-6} Гн)

3. Для электрической цепи однофазного переменного тока схема, которой представлена на рисунке 5.17. Найти емкость конденсатора C при котором в цепи будет наблюдаться резонанс и токи в этом режиме I , I_L , I_C . Параметры электрической цепи: $U(t) = 10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(500 \cdot t), \text{ В}$; $R = 16 \text{ Ом}$; $L = 1,6 \text{ мкГн}$. ($C = 25 \text{ мкФ}$, $I = 0,625 \text{ А}$, $I_L = I_C = 1,25 \text{ А}$)

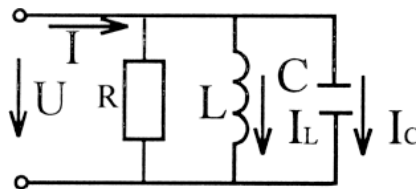


Рисунок 5.17

4. Для электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 5.18 с параметрами $X_1 = 20 \text{ Ом}$, $X_2 = 20 \text{ Ом}$, $X_C = 10 \text{ Ом}$, $X_1 = 20 \text{ Ом}$, $R = 40 \text{ Ом}$, $X_M = 10 \text{ Ом}$, $E = 200 \text{ В}$. Определить показание вольтметра. (97 В)

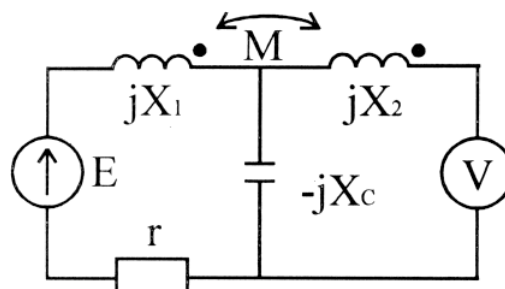


Рисунок 5.18

5. Для электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 5.19 с параметрами: $e_1(t) = e_2(t) = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$, В; $R_1 = 80$ Ом; $L_1 = 191$ мОм; $L_2 = L_3 = 255$ мГн; $C_2 = 80$ мкФ; $e_3(t) = 200 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t + 120^\circ)$, В; $M = 127$ мГн. Определить токи ветвей. ($I_1 = 0.3 \cdot e^{-j \cdot 10^\circ}$ А, $I_2 = 0.97 \cdot e^{j \cdot 41^\circ}$ А, $I_3 = 1.18 \cdot e^{j \cdot 30^\circ}$ А)

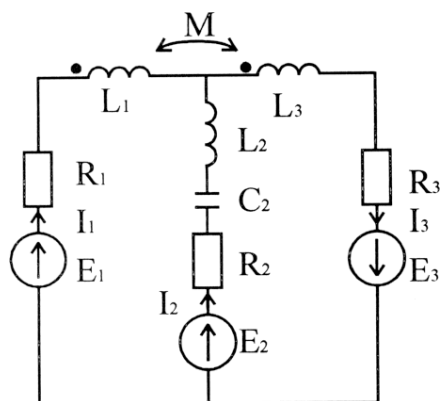


Рисунок 5.19

Контрольные вопросы

1. Изложите основы символического метода расчета. Почему все методы расчета цепей постоянного тока применимы к цепям синусоидального тока?
2. Дайте определение векторной и топографической диаграммам.
3. Как определить напряжение между двумя точками схемы по топографической диаграмме?
4. Физически интерпретируйте P , Q , S .
5. Выразите комплексную мощность S через комплексы напряжения и тока.
6. Запишите баланс активных и реактивных мощностей.
7. Дайте определение режиму резонанса токов и режиму резонанса напряжений.
8. Как в расчете учитывают магнитную связь между индуктивными катушками?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.

4. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для студентов / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.

Практическое занятие 6

Тема: Расчет трехфазных цепей синусоидального тока

Цель: Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при симметричной и несимметричной нагрузке.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (умение проводить инженерные изыскания), ПК-17 (умение применять знание научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности).

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости проводить расчеты трехфазных цепей используемых при электроснабжении зданий.

Теоретическая часть

Трехфазные цепи синусоидального тока.

Электрическая цепь, состоящая из системы трех синусоидальных ЭДС, имеющих одну и ту же частоту и сдвинутых по фазе одна относительно другой на угол $2\pi/3$ (120°), к которым с помощью соединительных проводов подключена нагрузка, называется трехфазной. Графики мгновенных значений *трехфазной симметричной системы ЭДС* с действующим значением каждой фазы $E_A = E_B = E_C = 220\text{ В}$ изображены на рисунке 6.1, соответствующая векторная диаграмма – на рисунке 6.2.

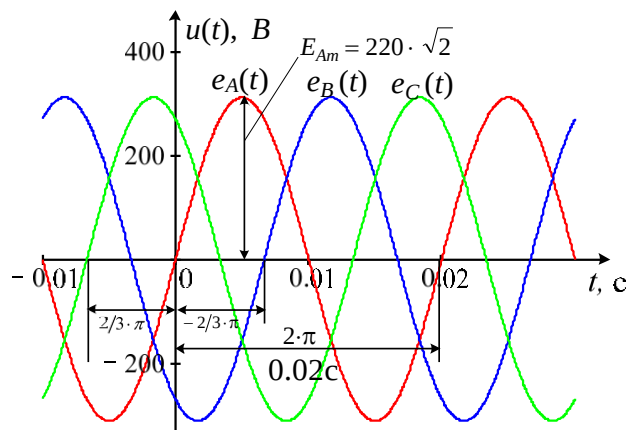


Рисунок 6.1 – Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС

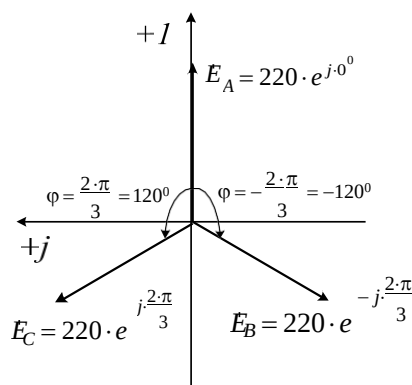


Рисунок 6.2 – Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую, с трехфазной системой ЭДС; линий передачи со всем необходимым оборудованием; приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными, так и однофазными.

На электрической схеме трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° . При соединении звездой одноименные зажимы трех обмоток объединяют в одну точку (рисунок 6.3), которую называют *нулевой точкой* генератора N .

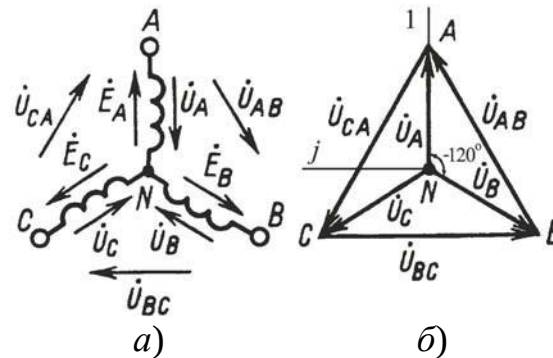


Рисунок 6.3 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора звездой (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

Обмотки генератора обозначают буквами A , B , C ; буквы ставят: A – у начала первой, B – у начала второй и C – у начала третьей фазы.

Таким образом, при соединении обмоток трехфазного генератора звездой (рисунок 6.3 а) линейные напряжения определяются через разности фазных:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (6.1)$$

Для симметричного генератора (источника) фазные напряжения

$$\dot{U}_A = U_\phi; \dot{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j \frac{2\pi}{3}}; \dot{U}_C = U_\phi \cdot e^{j \frac{2\pi}{3}}, \quad (6.2)$$

линейные напряжения (рисунок 6.3 б)

$$\dot{U}_{AB} = U_\phi \cdot e^{j \frac{\pi}{6}}; \dot{U}_{BC} = U_\phi \cdot e^{-j \frac{\pi}{6}}; \dot{U}_{CA} = U_\phi \cdot e^{j \frac{5\pi}{6}}. \quad (6.3)$$

Для симметричного источника справедливо равенство:

$$U_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\phi. \quad (6.4)$$

При соединении обмоток генератора треугольником (рисунок 6.4) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. Геометрическая сумма ЭДС в замкнутом треугольнике равна нулю. Поэтому если к зажимам A , B , C не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

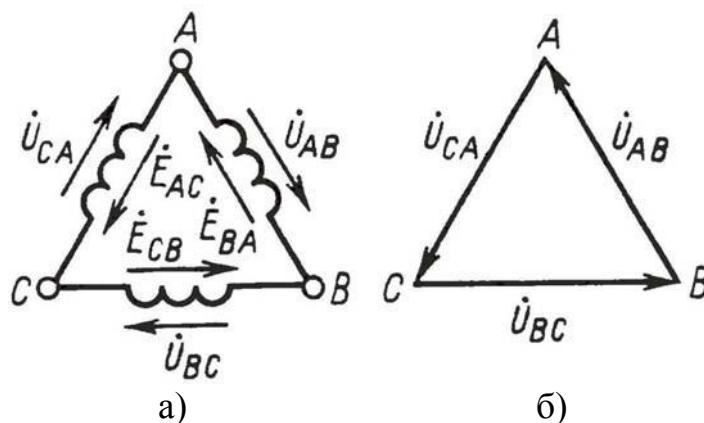


Рисунок 6.4 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора треугольником (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

При соединении обмоток трехфазного источника треугольником (рисунок 6.4 а) линейные напряжения равны фазным (рисунок 6.4 б)

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (6.5)$$

Выделяют следующие *схемы соединения трехфазного генератора с нагрузкой*. В случае соединения обмоток генератора звездой: звезда – звезда с нулевым проводом, звезда – звезда без нулевого провода, звезда – треугольник.

В случае соединения обмоток генератора треугольником, выделяют следующие *схемы соединения трехфазного генератора с нагрузкой*: треугольник – звезда, треугольник – треугольник.

Расчет трехфазных цепей синусоидального тока с симметричной несимметричной нагрузкой.

Трехфазные цепи являются разновидностью цепей синусоидального тока, и потому расчет и исследование процессов в них производят теми же методами и приемами. Для цепей трехфазного тока применим также символический метод расчета, построение векторных и топографических диаграмм. Векторные диаграммы облегчают нахождение углов между токами и напряжениями, делают все соотношения более наглядными и помогают находить возникающие ошибки при аналитическом расчете.

Симметричный режим. Для симметричного приемника, соединенного звездой (рисунок 6.5 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$, напряжение смещения нейтрали U_{nN} равно нулю, а токи в фазах

$$I_A = \frac{U_A}{(\underline{Z} + \underline{Z}_l)}; \quad I_B = \frac{U_B}{(\underline{Z} + \underline{Z}_l)}; \quad I_C = \frac{U_C}{(\underline{Z} + \underline{Z}_l)}, \quad (6.6)$$

где $\underline{Z}_l$ – сопротивление симметричной линии на фазу. По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 6.5 б):

$$I_A = I_B = I_C = \frac{U_\phi}{|\underline{Z} + \underline{Z}_l|}. \quad (6.7)$$

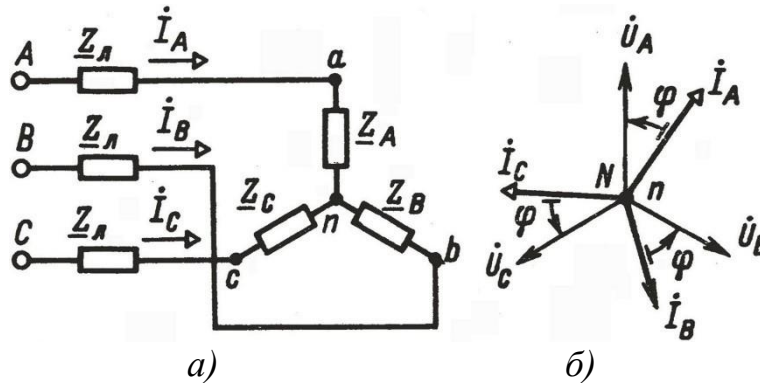


Рисунок 6.5 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

Для симметричного приемника, соединенного треугольником (рисунок 6.6 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}$. Если $\underline{Z}_l = 0$, то фазные токи приемника равны:

$$I_{ab} = U_{AB} / (\underline{Z}); \quad I_{bc} = U_{BC} / (\underline{Z}); \quad I_{ca} = U_{CA} / (\underline{Z}). \quad (6.8)$$

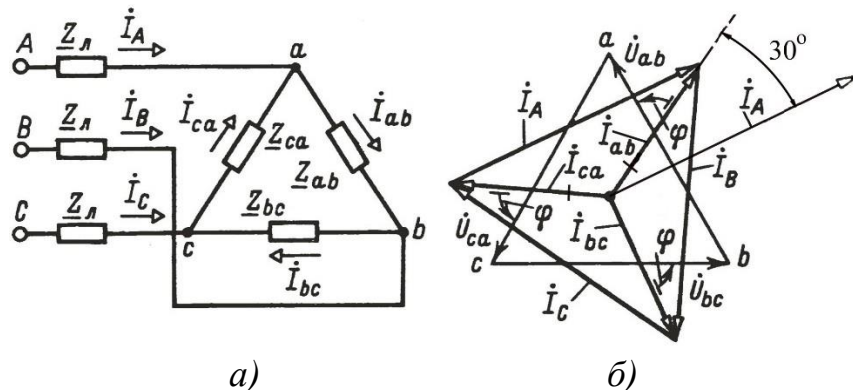


Рисунок 6.6 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 6.6 б):

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi = U_\phi / |\underline{Z}|. \quad (6.9)$$

Линейные токи приемника определяются разностью фазных токов:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}. \quad (6.10)$$

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 6.6 б),

$$I_A = \sqrt{3} \cdot I_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}}; I_B = I_A \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}; I_C = I_A \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}. \quad (6.11)$$

Если $\underline{Z}_n \neq 0$, то (после преобразования треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду) линейные токи

$$I_A = \frac{U_A}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_n}; I_B = \frac{U_B}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_n}; I_C = \frac{U_C}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_n}. \quad (6.12)$$

Фазные токи определяются через линейные:

$$I_{ab} = \frac{I_A}{\sqrt{3}} e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}; I_{bc} = I_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}; I_{ca} = I_{ab} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}. \quad (6.13)$$

Несимметричный режим. При соединении приемника звездой с нейтральным проводом (рисунок 6.7)

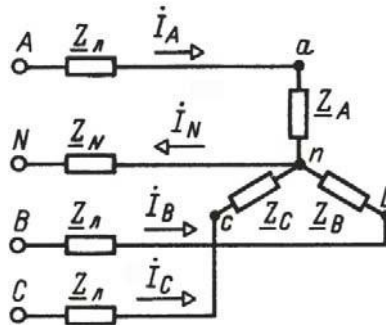


Рисунок 6.7 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов

$$U_{nN} = \frac{U_A \cdot \underline{Y}_A + U_B \cdot \underline{Y}_B + U_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (6.14)$$

где $\underline{Y}_A = 1/(\underline{Z}_A + \underline{Z}_n)$; $\underline{Y}_B = 1/(\underline{Z}_B + \underline{Z}_n)$; $\underline{Y}_C = 1/(\underline{Z}_C + \underline{Z}_n)$; $\underline{Y}_N = 1/\underline{Z}_N$.

Линейные токи и ток в нейтральном проводе

$$I_A = \frac{U_A - U_{nN}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_n}; I_B = \frac{U_B - U_{nN}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_n}; I_C = \frac{U_C - U_{nN}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_n}; I_N = \frac{U_{nN}}{\underline{Z}_N}. \quad (6.15)$$

По первому закону Кирхгофа

$$I_N = I_A + I_B + I_C. \quad (6.16)$$

Для приемника, соединенного звездой без нейтрального провода и заданных линейных напряжений источника, токи можно определить без предварительного расчета напряжения смещения нейтрали:

$$U_{An} = \frac{U_{AB} \cdot \underline{Y}_B - U_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad U_{Bn} = \frac{U_{BC} \cdot \underline{Y}_C - U_{AB} \cdot \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C};$$

$$U_{Cn} = \frac{U_{CA} \cdot \underline{Y}_A - U_{BC} \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \quad (6.17)$$

$$I_A = U_{An} / (\underline{Z}_A + \underline{Z}_L); \quad I_B = U_{Bn} / (\underline{Z}_B + \underline{Z}_L); \quad I_C = U_{Cn} / (\underline{Z}_C + \underline{Z}_L). \quad (6.18)$$

При соединении приемника треугольником (рисунок 6.6 а) и $\underline{Z}_L = 0$ фазные токи определяются согласно (6.8), линейные – (6.10).

Если $\underline{Z}_L \neq 0$, то треугольник сопротивлений можно преобразовать в эквивалентную звезду и для этого соединения рассчитать линейные токи, как показано выше.

Фазные токи определяются по предварительно найденным фазным напряжениям приемника:

$$U_{ab} = \underline{Z}'_A \cdot I_A - \underline{Z}'_B \cdot I_B; \quad U_{bc} = \underline{Z}'_B \cdot I_B - \underline{Z}'_C \cdot I_C;$$

$$U_{ca} = \underline{Z}'_C \cdot I_C - \underline{Z}'_A \cdot I_A; \quad (6.19)$$

$$I_{ab} = U_{ab} / (\underline{Z}_{ab}); \quad I_{bc} = U_{bc} / (\underline{Z}_{bc}); \quad I_{ca} = U_{ca} / (\underline{Z}_{ca}), \quad (6.20)$$

где $\underline{Z}'_A, \underline{Z}'_B, \underline{Z}'_C$ – сопротивления лучей звезды, эквивалентной треугольнику.

Мощность трехфазной цепи и способы ее измерения.

Симметричный режим. Активная, реактивная и полная мощности симметричного приемника независимо от вида соединения:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \phi, \quad (6.21)$$

$$Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \phi, \quad (6.22)$$

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L, \quad (6.23)$$

где ϕ – сдвиг по фазе между фазными напряжением и током.

Несимметричный режим. Активная, реактивная и полная мощности несимметричного приемника независимо от вида соединения равны сумме соответствующих мощностей трех фаз.

Измерение мощности. Для измерения активной мощности, передаваемой от источника к приемнику, в трехфазной цепи с нейтральным проводом при несимметричном режиме включают ваттметры в каждую фазу (рисунок 6.8).

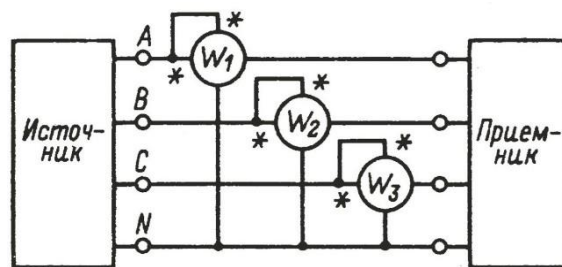


Рисунок 6.8 – Схема для измерения мощности трехфазной цепи с нейтральным проводом

Активная мощность равна сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}. \quad (6.24)$$

В случае симметричного режима достаточно одного ваттметра, при этом мощность

$$P = 3 \cdot P_W. \quad (6.25)$$

При отсутствии нейтрального провода активную мощность измеряют двумя ваттметрами, включенными по схеме, показанной на рисунке 6.9 а (и при симметричном, и при несимметричном режимах). Активная мощность равна алгебраической сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2}. \quad (6.26)$$

Для измерения реактивной мощности той же трехфазной системы применяют схему включения ваттметров, показанную на рисунке 6.9 б. Реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_{W1} + P_{W2}). \quad (6.27)$$

При симметричном режиме реактивную мощность можно измерить одним ваттметром, включенным по схеме рисунок 6.9 в. В этом случае

$$Q = \sqrt{3} \cdot P_W. \quad (6.28)$$

Полная мощность для каждой фазы определяется из треугольника мощностей, также как и для цепей однофазного тока.

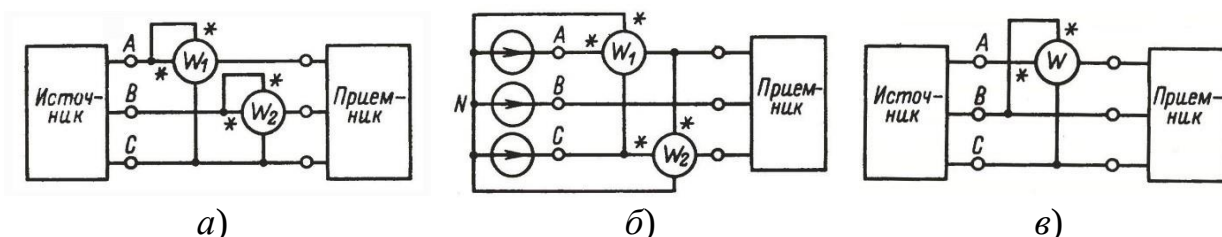


Рисунок 6.9 – Схемы для измерения трехфазной активной мощности в цепи без нейтрального провода (а) и реактивной мощности при несимметричной (б) и симметричной нагрузке (в)

Задания

1. На рисунке 6.10 представлена симметричная трёхфазная система с параметрами $X_C = 90 \text{ Ом}$, $r = 40 \text{ Ом}$. Определить показания приборов и ток i при $U_A = 120 \angle 0^\circ \text{ В}$. (207,5 В; 4 А; 2,3 А; 625 Вт; 950 Вт; $i = 3\sqrt{2} \sin \omega t \text{ А}$).

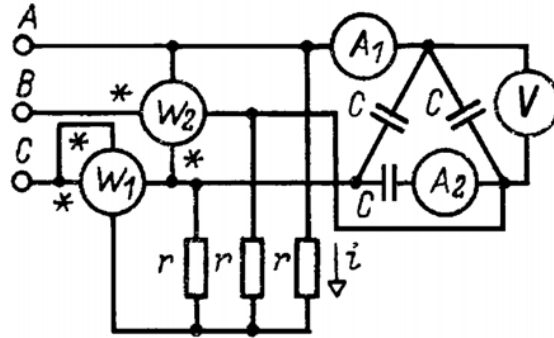


Рисунок 6.10

2. К симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС $E = 230 \text{ В}$ и с внутренним сопротивлением $\underline{Z}_0 = (0,3 + j0,9) \text{ Ом}$ подключена несимметричная нагрузка, соединенная в звезду с нулевым проводом (рисунок 6.11). Сопротивления фаз нагрузки: $\underline{Z}_a = (2 + j4) \text{ Ом}$, $\underline{Z}_b = (4 - j8) \text{ Ом}$, $\underline{Z}_c = 5 \text{ Ом}$. Сопротивление каждого провода линии $\underline{Z}_{\text{лп}} = (0,4 + j0,3) \text{ Ом}$, а сопротивление нулевого провода $\underline{Z}_N = 0,5 \text{ Ом}$. Определить токи и напряжения на каждой фазе нагрузки и генераторе при наличии нейтрального провода и при его обрыве.

Для каждого случая построить векторную диаграмму. ($I_A = 37,9 e^{-j60^\circ 10'} \text{ А}$,

$$I_B = 27,4 e^{-j67^\circ 40'} \text{ А}, I_C = 41,6 e^{-j108^\circ 35'} \text{ А}, I_N = 24,8 e^{-j49^\circ 25'} \text{ А},$$

$$U_{an} = 170 e^{-j3^\circ 15'} \text{ В}, U_{bn} = 230 e^{-j134^\circ 20'} \text{ В}, U_{cn} = 208 e^{j108^\circ 35'} \text{ В},$$

$$U_{AN} = 195 e^{-j2^\circ 5'} \text{ В}, U_{BN} = 243 e^{-j125^\circ} \text{ В}, U_{CN} = 213 e^{-j110^\circ 45'} \text{ В}.$$

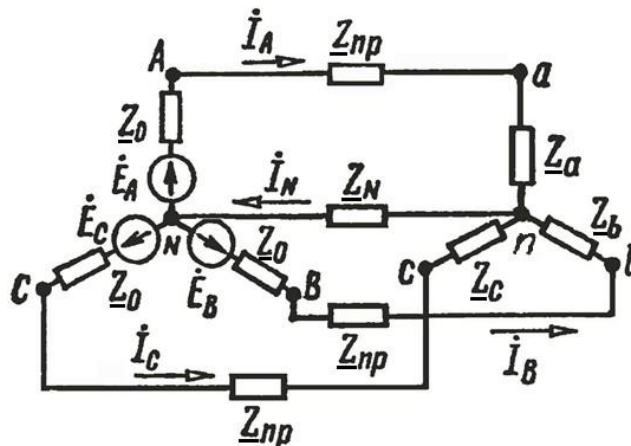


Рисунок 6.11

3. В цепи рисунок 6.12 определить токи в линии и в фазах приёмника при коротком замыкании между точками b и c, если $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$; $\omega \cdot L = 2 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_A = 10 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_B = j10 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_C = -j10 \text{ Ом}$. (0; 95 А; 95 А; 0; 33 А; 33 А).

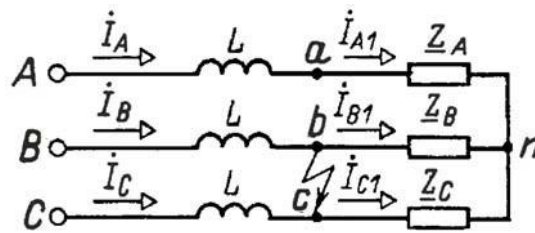


Рисунок 6.12

Контрольные вопросы

1. Что означает симметричный трехфазный источник электрической энергии?
2. Что означает несимметричный трехфазный источник?
3. Перечислите способы соединения обмоток трехфазного источника.
4. Что такое нейтральный провод?
5. Какое напряжение называется фазным, линейным?
6. Что означает симметричная и несимметричная нагрузка?
7. Что такое напряжение смещения нейтрали?
8. Как определить ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке?
9. Чему равна мощность трехфазной системы в симметричном режиме?
10. Что такое одно-, двух- и трехфазное короткое замыкание?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
4. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для студентов / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ
РАБОТ**

по дисциплине

**Инженерные системы зданий и сооружений:
(Электроснабжение с основами электротехники)**

Направление подготовки 08.03.01 Строительство
Профиль подготовки - Проектирование зданий

Оглавление

Введение	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.....	4
Исследование линейных цепей постоянного тока (4 ч)	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2	37
Последовательное соединение потребителей однофазного переменного тока. Резонанс напряжений и токов в цепях синусоидального тока (4 ч)	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3	72
Трехфазные цепи. Исследование цепи трехфазного тока при различных схемах соединения нагрузки (4 ч)	72
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4	95
Исследование характеристик и параметров однофазного трансформатора (6 ч)....	95

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование линейных цепей постоянного тока (4 ч)

Цель работы:

1. Измерить ток и напряжение в цепи, экспериментально убедиться в верности закона Ома.
2. Экспериментально убедиться в верности первого и второго законов Кирхгофа.
3. Построить потенциальную диаграмму для контура.
4. Экспериментально определить внутренние сопротивления: источника постоянного напряжения и источника тока. Построить графики их внешних характеристик.

В результате выполнения лабораторной работы у студента формируются компетенции ПК-10 (владение методами проведения инженерных изысканий), ПК-17 (владение научно-технической информацией, отечественным и зарубежным опытом по профилю деятельности).

Теоретическое обоснование

Закон Ома для участка цепи между зажимами a и b (рисунок 1.1) позволяет найти ток I участка по разности потенциалов $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ и сопротивлению R этого участка:

$$I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}. \quad (1.1)$$

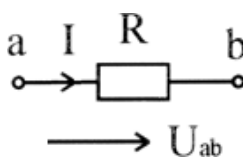


Рисунок 1.1 – Участок цепи

Законы Кирхгофа.

Законы Кирхгофа позволяют составить систему уравнений для расчета электрической цепи любой сложности.

Для формулировки законов Кирхгофа, в электрической цепи выделяются *узлы и ветви*. *Ветвь* можно определить как участок цепи, образованный последовательно соединенными элементами (через которые течет одинаковый

ток) и заключенный между двумя узлами. В свою очередь, *узел* – это точка цепи, в которой сходятся не менее трех ветвей.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю.

$$\sum I_i = 0. \quad (1.2)$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на элементах контура (под контуром здесь понимается замкнутая последовательность ветвей, не содержащих источников тока) равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре:

$$\sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n E_i \text{ или } \sum_{i=1}^n I_i \cdot r_i = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (1.3)$$

Рассмотрим применение законов Кирхгофа для электрической цепи изображенной на рисунке 1.1.

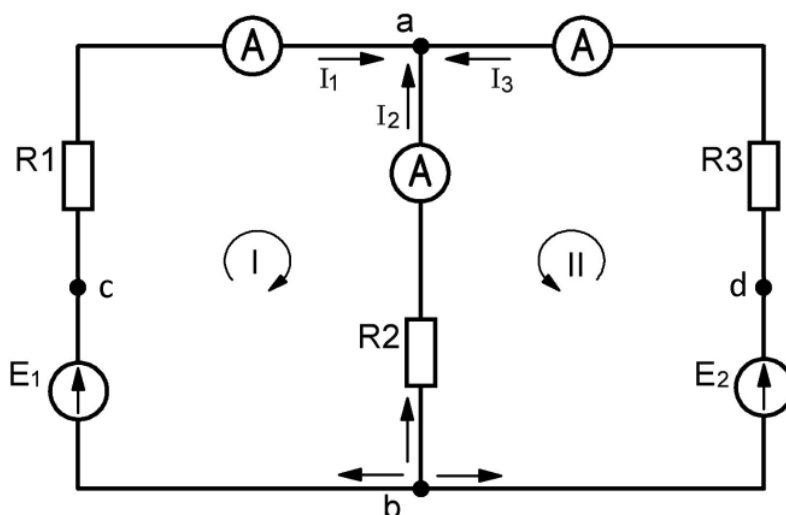


Рисунок 1.1 – Схема линейной электрической цепи постоянного тока

Определим количество уравнений для расчета электрической цепи постоянного тока. В качестве неизвестных определим токи в ветвях, а известными будем считать параметры элементов электрической цепи. Так по первому закону Кирхгофа записывают уравнений на одно меньше, чем узлов в электрической цепи. На основании первого закона Кирхгофа для узла *a* схемы, изображенной на (Рисунке 1.1), можно составить следующее уравнение:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1.4)$$

По второму закону Кирхгофа записывается столько уравнений, сколько неизвестных токов в ветвях и минус количество уравнений по первому закону

Кирхгофа. Согласно второму закону Кирхгофа, для первого и второго контуров цепи, соответственно, можно записать следующие уравнения:

$$I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 = E_1 \quad (1.5)$$

$$-I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 = -E_2 \quad (1.6)$$

Таким образом, всего уравнений по обоим законам Кирхгофа должно быть столько, сколько неизвестных токов в ветвях цепи. Уравнения (1.4)-(1.6) представляют собой систему линейных уравнений, которая полностью описывает рассматриваемую цепь.

Примером применения второго закона Кирхгофа является построение *потенциальной диаграммы*. Под потенциальной диаграммой понимают график распределения потенциала на каком-либо участке цепи или в замкнутом контуре. По оси абсцисс на нем откладывают сопротивления вдоль контура, начиная с какой-либо произвольной точки, а по оси ординат – потенциалы соответствующих точек. Каждой точке участка цепи или замкнутого контура соответствует своя точка на потенциальной диаграмме.

В качестве примера рассмотрим контур (E1, R1, R3, E2) (Рисунок 1.2).

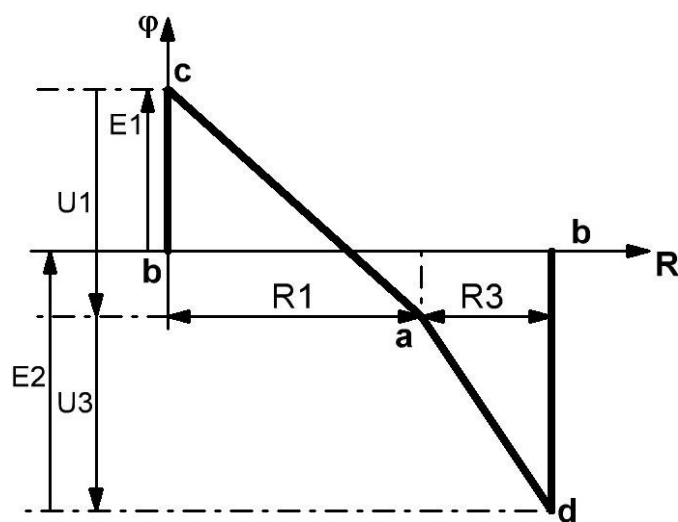


Рисунок 1.2 – Потенциальная диаграмма

В качестве начальной точки для построения потенциальной диаграммы примем узел b . Для построения потенциальной диаграммы, нужно определить падение напряжения на каждом сопротивлении, входящем в выбранный контур. На участке с сопротивлением потенциал увеличивается, если обход

осуществляется против направления тока, и понижается, если направление обхода совпадает с направлением тока.

На участке с источником ЭДС потенциал изменяется на величину ЭДС – повышается в случае, когда переход от одной точки к другой осуществляется по направлению ЭДС и понижается, когда переход осуществляется против направления ЭДС (Рисунок 1.2).

Рассмотрим виды источников электрической энергии.

Идеальным источником постоянного напряжения является такой источник электрической энергии, у которого разность потенциалов между выводами не зависит от тока, проходящего через источник (внутреннее сопротивление такого источника равно нулю). Ввиду конструктивных особенностей реальные источники напряжения обладают ненулевым внутренним сопротивлением, в результате чего выходное напряжение зависит от тока нагрузки.

Поскольку у реального источника постоянного напряжения внутреннее сопротивление не равно нулю, разность потенциалов между его выводами зависит от протекающего через источник тока. Эта зависимость называется внешней характеристикой источника.

Приведенному описанию источника постоянного напряжения соответствует электрическая схема замещения, состоящая из источника ЭДС и соединенного последовательно с ним сопротивления, представленная на рисунке 1.3.

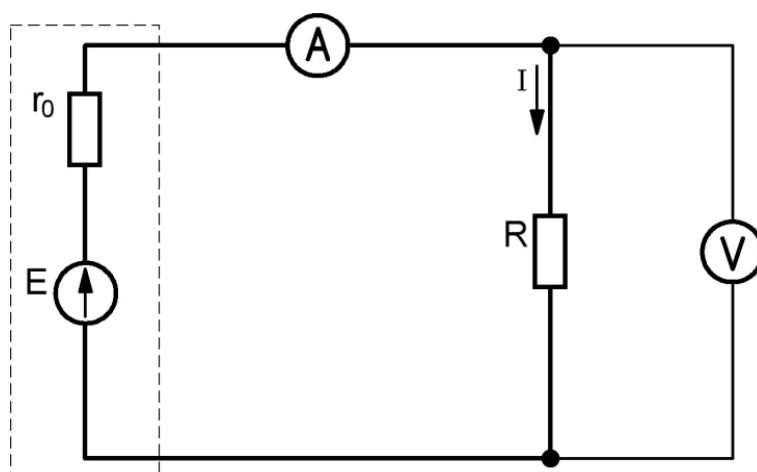


Рисунок 1.3 – Схема замещения неидеального источника напряжения

Величина E называется электродвижущей силой (ЭДС) источника и определяется как работа, затрачиваемая сторонними силами на перемещение единицы положительного заряда от отрицательного контакта к положительному. Компоненты схемы замещения реального источника постоянного напряжения, ЭДС, и внутреннее сопротивление источника физически неразделимы.

График внешней характеристики источника напряжения при подключенной нагрузке R показан на рисунке 1.4.

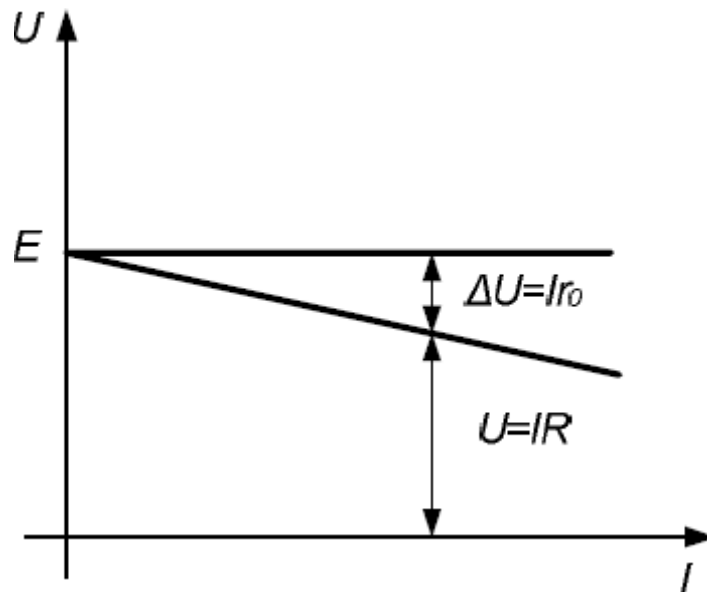


Рисунок 1.4 – Внешняя характеристика источника напряжения

В большинстве случаев внешняя характеристика источника питания имеет почти линейный вид.

Выражение для внешней характеристики источника:

$$U = E - I \cdot r_0 \quad (1.7)$$

Идеальным источником постоянного тока является такой источник электрической энергии, у которого выходной ток постоянен и не зависит от нагрузки (внутреннее сопротивление такого источника равно бесконечности). Напряжение на выходе идеального источника тока также может изменяться до бесконечности, в зависимости от сопротивления нагрузки, обеспечивая постоянство выходного тока. Ввиду конструктивных особенностей в реальном источнике выходной ток находится в некоторой зависимости от сопротивления нагрузки.

Вольтамперная характеристика идеального источника тока представляет собой вертикальную линию (рисунок 1.5).

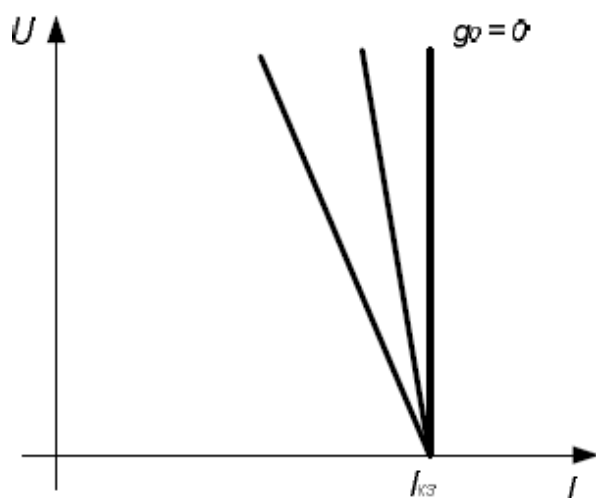


Рисунок 1.5 – Внешняя характеристика источника тока

В общем случае зависимость напряжения на выводах от тока источника нелинейна (кривая 1 на рисунке 1.6). Зависимость между выходным напряжением и током называется внешней характеристикой источника тока и определяется двумя характерными точками соответствующими: режиму холостого хода ($I = 0; U = U_{xx}$); режиму короткого замыкания $U = 0; I = I_{кз}$.

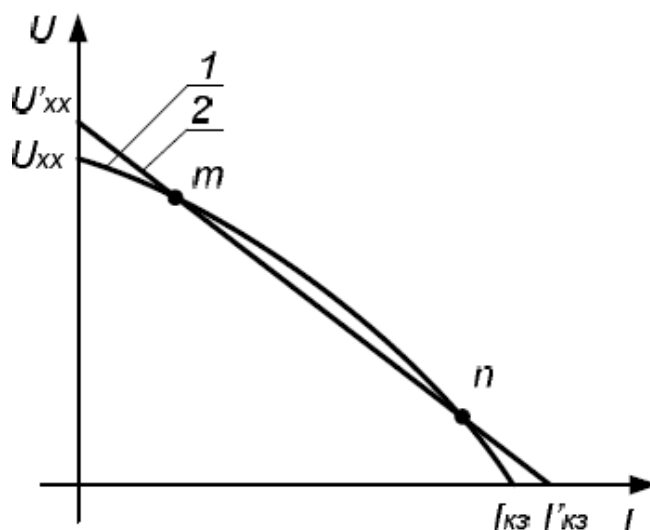


Рисунок 1.6 – Аппроксимация внешней характеристики источника тока

Токи и напряжения реального источника обычно могут изменяться в определенных пределах, ограниченных сверху значениями, соответствующими номинальному режиму (режиму, при котором изготовитель гарантирует допустимые в пределах спецификации отклонения выходных параметров, наряду с оптимальной экономичностью и долговечностью устройства).

Для упрощения расчетов, в ряде случаев нелинейная вольтамперная характеристика на выбранном рабочем участке $m-n$, определяемом рабочими интервалами изменения напряжения и тока, может быть аппроксимирована прямой линией.

Для большинства источников тока и напряжения подобная линеаризация правомерна. Также следует отметить, что, в отличие от источников напряжения, для большинства источников тока длительная работа в режиме короткого замыкания является допустимой.

Прямая 2 на рисунке 1.6 описывается линейным уравнением

$$U = U_{xx} - I \cdot r_0 \quad (1.8)$$

где U_{xx} – напряжение на зажимах источника при отключенной нагрузке, $r_0 = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}$.

Реальный источник тока замещается эквивалентной схемой (рисунок 1.7), состоящей из идеального источника (J) и параллельно включенного резистора с очень высоким сопротивлением r_0 .

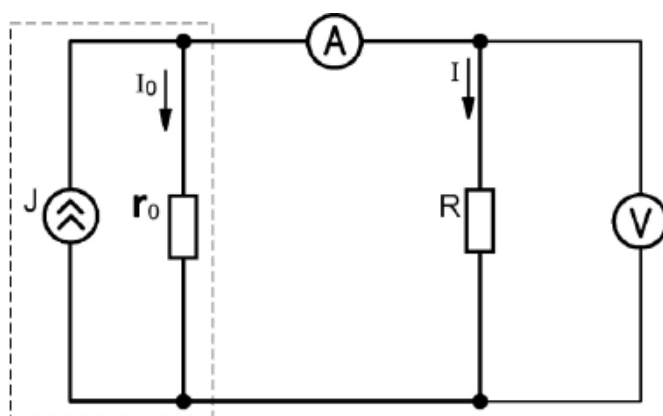


Рисунок 1.7 – Схема замещения неидеального источника тока

Компоненты схемы замещения реального источника – идеальный источник постоянного тока и внутренняя проводимость (или сопротивление) – физически не разделимы.

Оборудование и материалы

1. Лабораторная работа выполняется на специально разработанной макетной плате «Теоретические основы электротехники» для рабочей станции NI ELVIS II сопряженной с ПЭВМ. В дальнейшем будем эту систему называть лабораторный стенд (рисунок 1.8).

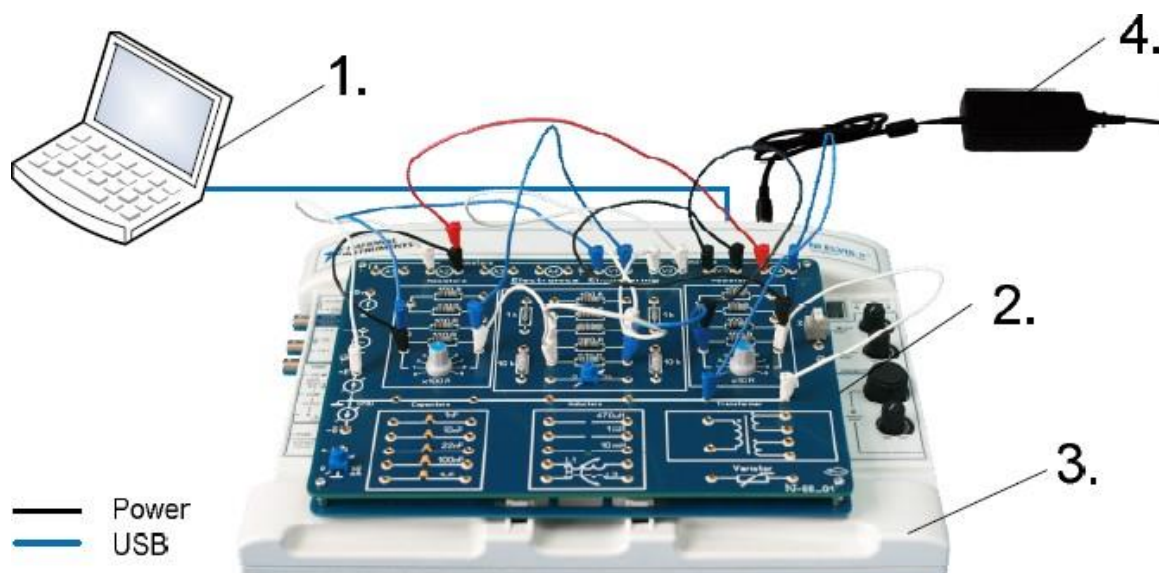


Рисунок 1.8 –Лабораторный стенд подключаемый к ПЭВМ: 1 – персональный компьютер (ПЭВМ); 2 – макетная плата; 3 – контрольно-измерительное оборудование NI ELVIS II, подключаемое к (1) по USB; 4 – Блок питания обеспечивающий электропитание NI ELVIS II и макетной платы

2. В стандартной комплектации лабораторного стенда имеются соединительные провода 17 шт.

3. Для работы лабораторного стенда необходимо также иметь следующее оборудование и программное обеспечение. **Системные требования к персональному компьютеру:** Pentium-4 и выше, ОЗУ минимум 256МБ, свободное пространство на жестком диске не менее 200МБ. Видеокарта и монитор Поддерживающее разрешение экрана не менее 1024x768 точек. **Необходимое программное обеспечение.** Операционная система: MS Windows 7. Microsoft Office 2010. Для чтения документации: Adobe Reader 9.0 или выше. Программное обеспечение NI ELVIS II+ (или «NI ELVIS II»). Программное обеспечение **Electronics Engineering Board 2** для проведения лабораторных работ.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры физики, электротехники и электроники и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Сборку схемы осуществлять исправными соединительными проводами, используя при этом приведенные в лабораторной работе принципиальные схемы экспериментов.

4. Собранная цепь проверяется преподавателем и может включаться только по его разрешению. О включении напряжения предупреждают всех членов бригады, выполняющих работу.

5. Изменения схемы производят только при выключенном напряжении на стенде, а вновь собранная схема перед подачей на нее напряжения проверяется преподавателем.

6. По окончании испытания или при перерыве в работе схему отключают от напряжения питания. Разборку схему осуществляют по разрешению преподавателя.

7. Запрещается включение лабораторного стенда в сеть в присутствии легковоспламеняющихся жидкостей или в атмосфере, содержащей горючие газы.

8. При возникновении неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с лабораторным стендом, выключив его из сети, и обратиться к обслуживающему персоналу.

Задания

Описание макетной платы лабораторного стенда.

На плате установлены электронные компоненты и контактные площадки измерительных приборов, но нет заранее собранных электрических схем. Сборка схем осуществляется студентом при помощи соединительных проводов из комплекта стенда. На плате имеется индикатор включения питания (светодиод **Питание**), и предусмотрена защита от перегрузок.

Макетная плата условно разделена на зоны (рисунок 1.9):

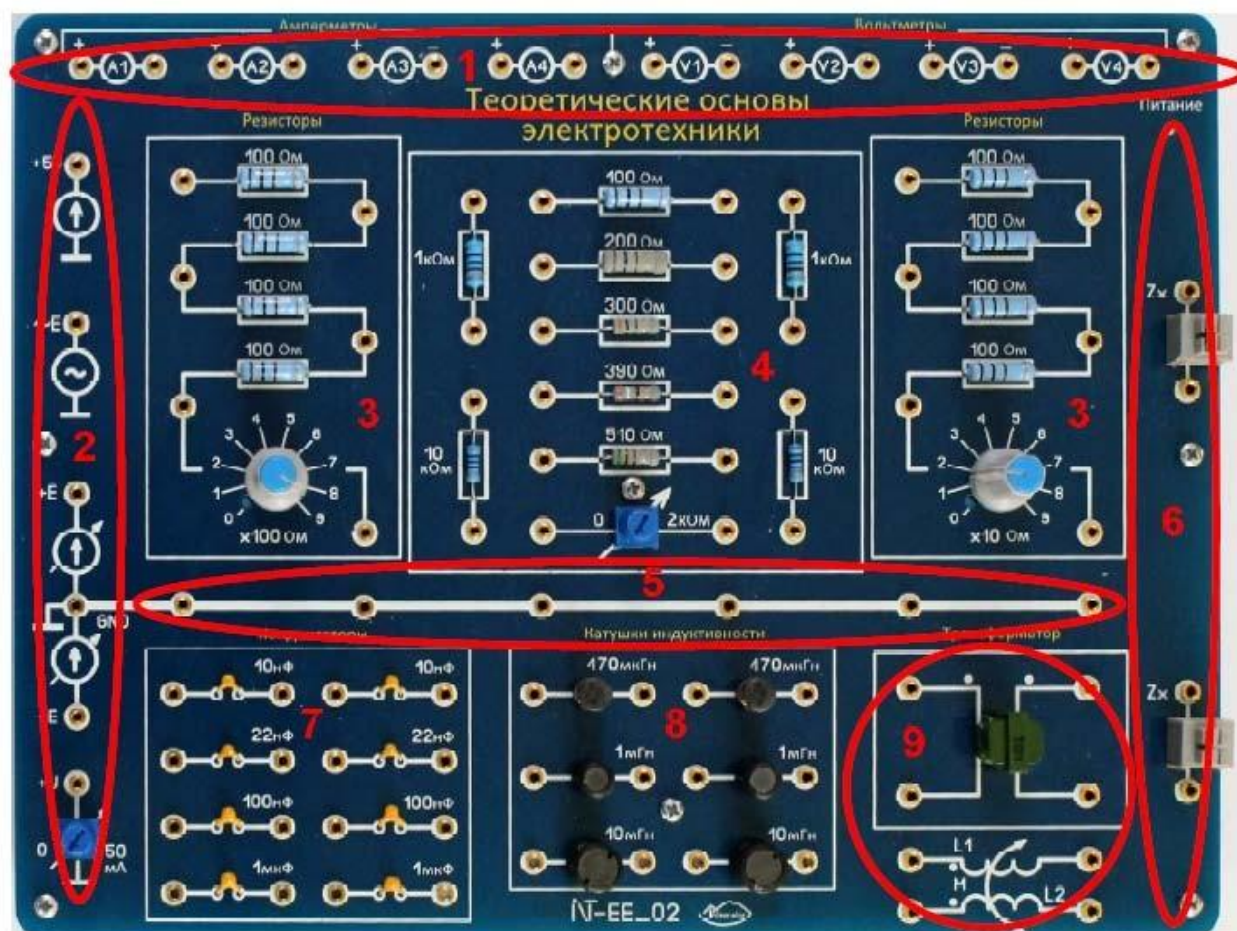


Рисунок 1.9 – Макетная плата и зоны элементов на ней

1. Зона измерительных приборов: 4 амперметра и 4 вольтметра.
2. Зона источников, параметры которых представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры источников электрической энергии

Описание	Обозначение на плате	Соответствие обозначениям NI ELVIS II	Параметры регулирования
Нерегулируемый источник напряжения	+5V	+5V	Нерегулируемые +5B
Источник переменного напряжения	~E	FGEN	Частота: 1 ... 20 кГц Напряжение: 0 ... 10 В Форма: синус, меандр, треугольник
Регулируемый источник напряжения	+E	VPS+ (VPSpos)*	Диапазон: 0 ... +10 В
Регулируемый источник напряжения	-E	VPS- (VPSneg)*	Диапазон: -10 ... 0 В
Регулируемый источник тока	+J	CS	Диапазон: 0 ... 50 мА

3. Зоны:

– с 4 последовательно соединенными резисторами по 100 Ом и галетным переключателем 0..900 Ом с шагом 100 Ом;

– с 4 последовательно соединенными резисторами по 100 Ом и галетным переключателем 0..90 Ом с шагом 10 Ом.

4. Зона независимых резисторов (100 Ом, 200 Ом, 300 Ом, 390 Ом, 510 Ом, 1 кОм, 10 кОм) и переменный резистор, 2 кОм.

5. Зона подключения к «нейтрали» («земля»).

6. Клеммы для подключения внешних компонентов.

7. Зона независимых конденсаторов (10нф, 22нф, 100нф, 1мкф).

8. Зона независимых и последовательно соединенных индуктивностей (470мкГн, 1мГн, 10мГн).

9. Зона трансформатора.

Работа с макетной платой лабораторного стенда.

На макетной плате имеются контактные площадки, при помощи которых можно производить электрические соединения для подачи напряжений и токов, а также для передачи полученных сигналов устройству **NI ELVIS II** для измерений. Электрические подключения производятся при помощи соединительных проводов (рисунок 1.10), вставляемых в контактные гнезда на плате согласно схеме, приведенной на лицевой панели каждой лабораторной работы. К одному гнезду, при необходимости, можно одновременно подключать несколько соединительных проводов, вставляя штекеры на концах проводов друг в друга.

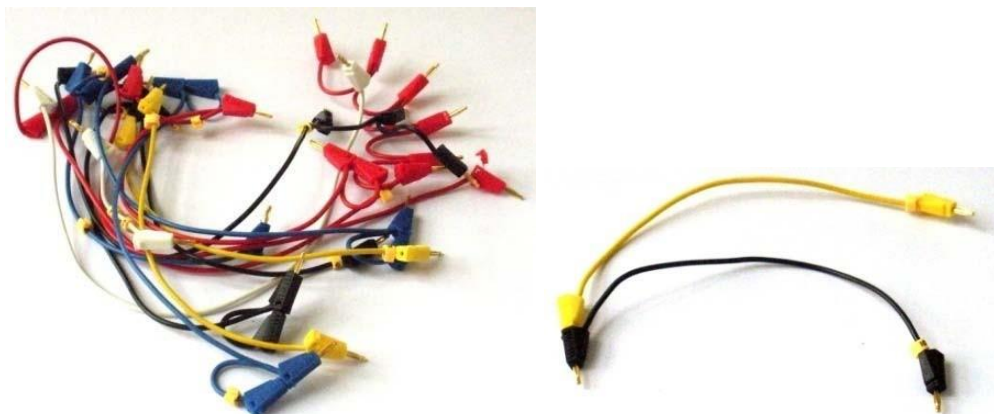


Рисунок 1.10 – Соединительные провода

Включение и подготовка к работе. Если платформа **NI ELVIS II** выключена, включите ее при помощи выключателя, расположенного на торце устройства в задней части, рядом с разъемом для подключения кабеля питания (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Выключатель питания NI ELVIS II

При включении сперва должен зажегаться желтый светодиод «USB Active» (4), затем через несколько секунд, после того, как компьютер распознает устройство, светодиод гаснет и загорается желтый светодиод «USB Ready» (3) (рисунок 1.12)

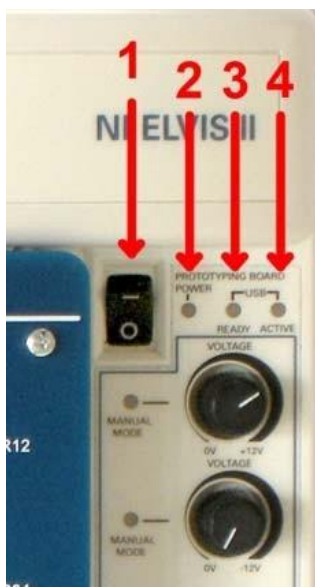


Рисунок 1.12 – Выключатель питания платы и индикаторы

Если после включения питания платформы **NI ELVIS II** на экране компьютера откроется мастер выбора устройства сбора данных (рисунок 1.13), щелкните **Cancel** для выхода из этого окна.

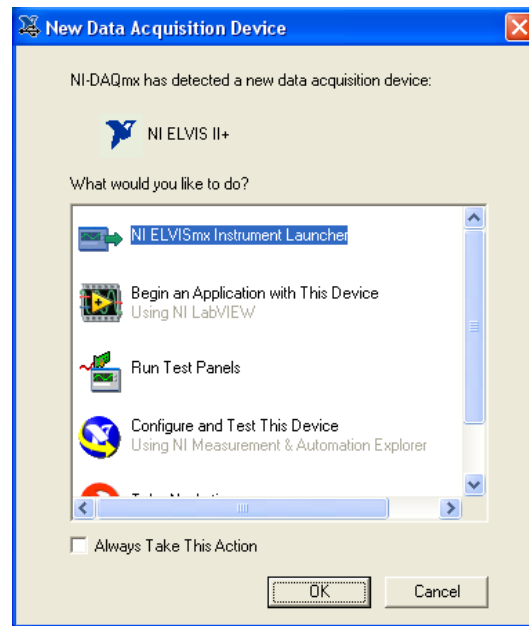
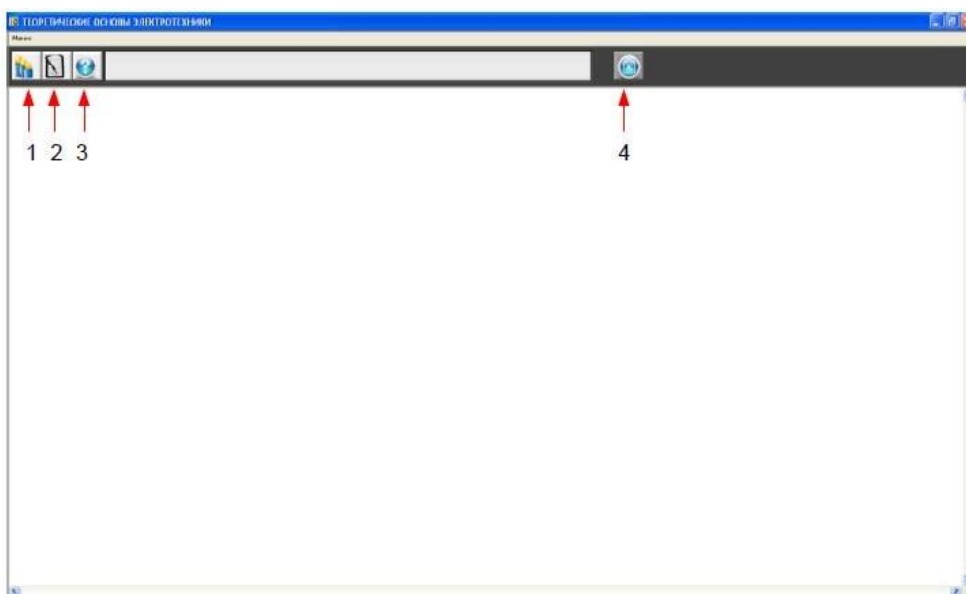


Рисунок 1.13 – Мастер выбора устройства сбора данных

Затем включите выключатель питания платы (1) (рисунок 1.11), при этом должны загореться зеленый светодиод **PROTOTYPING BOARD POWER** (2) и красный светодиод **Питание** на плате.

Запуск программы и проведение лабораторных работ. Запуск программы осуществляется двойным щелчком по ярлыку Electronics Engineering Board 2 на рабочем столе или через стартовое меню Windows: Пуск -> Electronics Engineering Board 2.

При запуске программы на экран монитора выводится лицевая панель с элементами меню (рисунок 1.14).



1. Вход в систему
2. Регистрация
3. Помощь
4. Выход

Рисунок 1.14 – Начальное окно программы

При выключенном питании платформы **NI ELVIS II**, либо если вместо макетной платы Electronics Engineering Board 2 была установлена другая плата, программа выведет сообщение ошибки: «**Устройство не подключено. Продолжить?**» (рисунок 1.15)

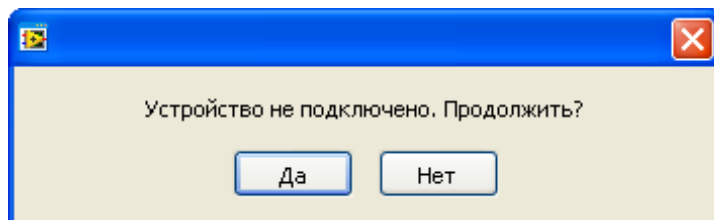


Рисунок 1.15 – Сообщение ошибки о невозможности обнаружения платы

При выборе варианта **Нет** будет осуществлен выход из программы. В случае выбора варианта **Да** можно продолжить работу, но в индикаторных полях приборов вместо действительных сигналов и измеренных значений будут выводиться случайные величины.

Регистрация и вход. Для получения доступа к лабораторным работам пользователь должен зарегистрироваться (выбрать в меню элемент **Регистрация**) или **Войти**.

Нажимаем **Войти**. Для всех персональных компьютеров в появившемся диалоговом окне рисунок 1.16 в строке **Имя пользователя** необходимо написать ПКХ, где Х это № компьютера указанный на мониторе в правом верхнем углу. В строке **Пароль** нужно указать 1111.

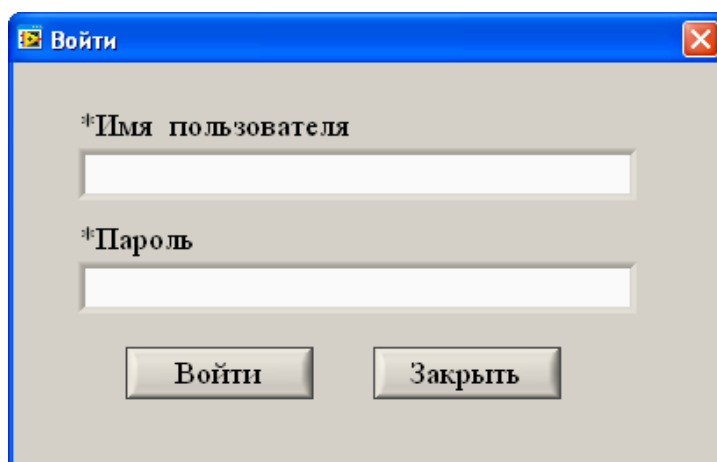


Рисунок 1.16

При выборе пункта меню **Регистрация** откроется окно регистрации (рисунок 1.17).

Рисунок 1.17 – Окно регистрации

Необходимо заполнить следующие поля: группа, имя и фамилия, имя пользователя, пароль.

Затем укажите путь к рабочей папке, в которой будут храниться стандартные файлы задания и отчеты по проведенным лабораторным работам, и нажмите кнопку **Регистрация**.

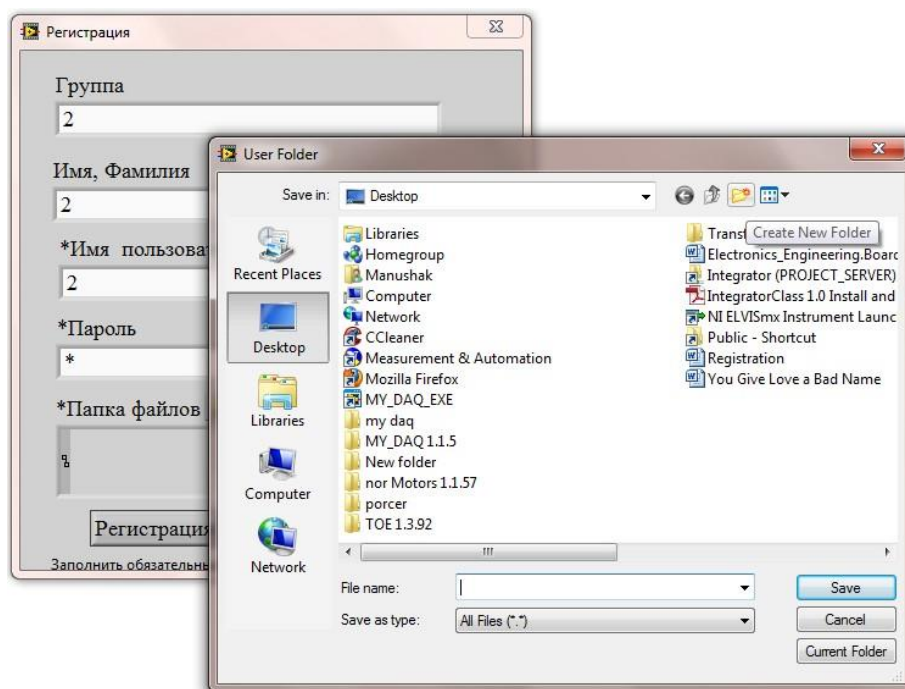


Рисунок 1.18

Если для пользователя уже создана рабочая папка, то необходимо войти в нее, и сделать ее текущей (нажав **Current Folder** -> **OK**, рисунок 1.19).

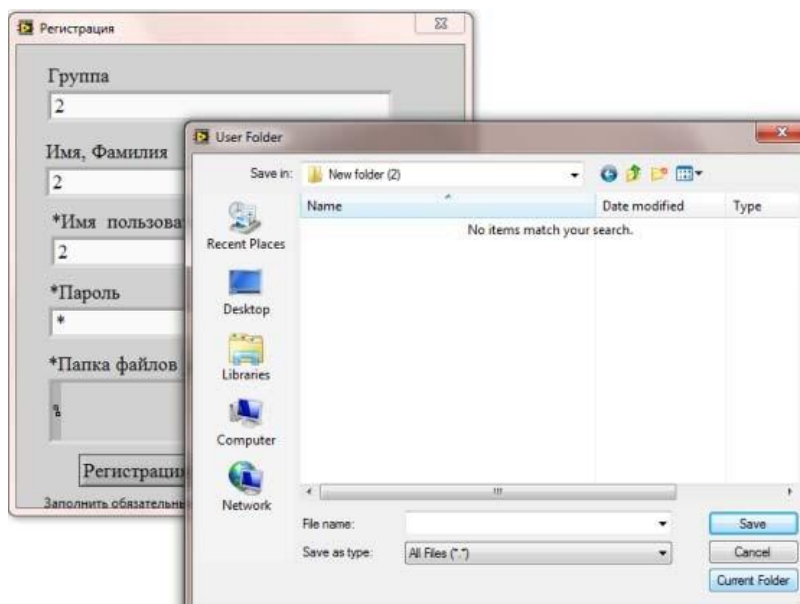


Рисунок 1.19

При заполнении полей регистрации недопустимо использовать текст в юникоде, а также символы '?', '/', '\', '|', '*', '&', '<', '>', '+', '=', ':', '”’.

После проведения лабораторной работы результаты, сохраненные в формате MS Excel, будут также включать регистрационные данные студента.

После входа в программу откроется **главное** меню (рисунок 1.20). Переход к выбранной лабораторной работе производится двойным щелчком по соответствующей строке меню.

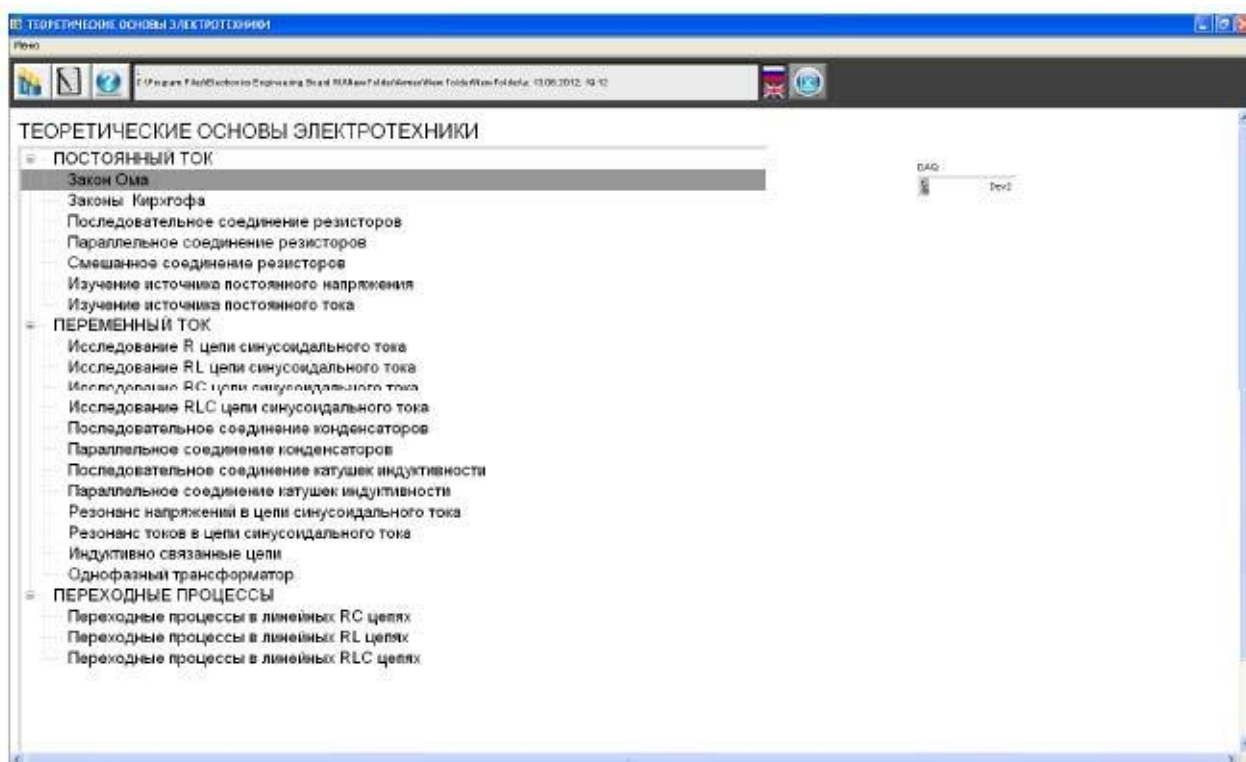


Рисунок 1.20 – Окно главного меню

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, студент должен:

1. Внимательно ознакомиться с требованиями по технике безопасности.
2. Ознакомиться с теоретическими материалами по теме.
4. Изучить методику проведения лабораторных работ.
5. Понимать принципы работы электрических схем.

Лабораторная работа №1 «Исследование линейных цепей постоянного тока» будет содержать четыре эксперимента из главного меню рисунок 1.20: «Закон Ома», «Законы Кирхгофа»; «Изучения источника постоянного напряжения», «Изучения источника постоянного тока».

1 эксперимент: «Закон Ома». Приборы и компоненты:

1. Сопротивления (зона резисторов на плате); 2. Потенциометр (x100 Ом);
3. Источник напряжения (+E); 4. Вольтметр (V1); 5. Амперметр (A1).

Подготовка к проведению эксперимента «Закон Ома».

1. Убедитесь, что рабочая станция **NI ELVIS II** включена (выключатель питания станции находится в положении **I**, см. Рисунок 1.11).
2. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).
3. Из главного меню (рисунок 1.20) двойным щелчком выберите эксперимент «**Закон Ома**». На рисунке 1.21 показано окно данного эксперимента. Окно состоит из главного меню, панели управления и рабочего поля (рисунок 1.21).

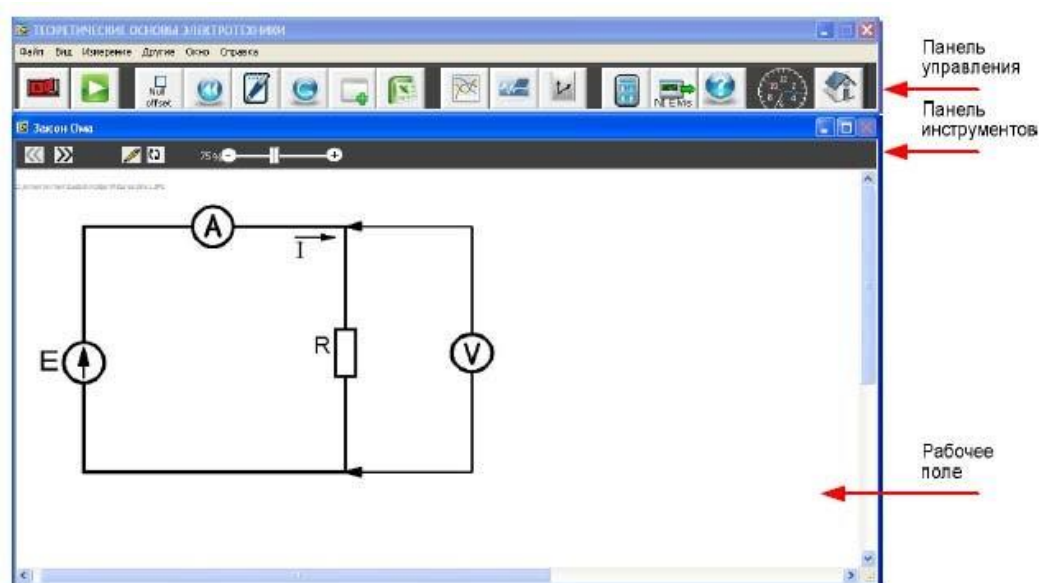


Рисунок 1.21 – Лицевая панель эксперимента «Закон Ома»

Нажмите кнопку **Следующий** (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное в соответствии с рисунком 1.21 изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 1.22).

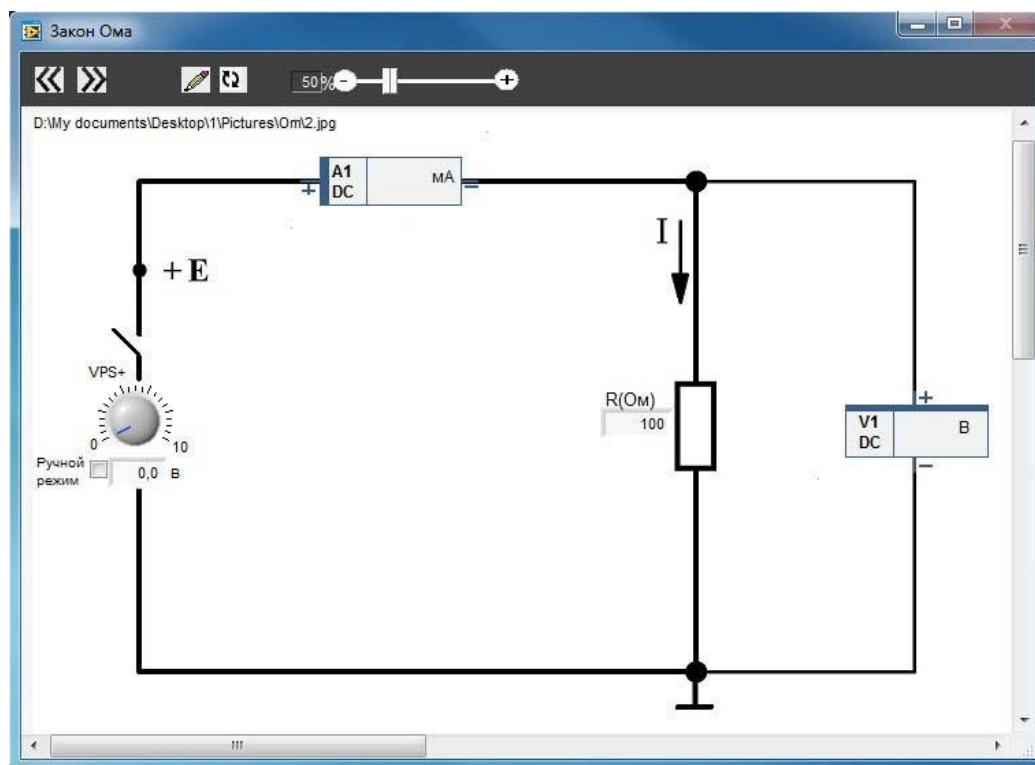


Рисунок 1.22 – Схема электрической цепи эксперимента «Закон Ома»

4. Соберите на макетной плате электрическую цепь в соответствии со схемой на рисунке 1.22. Установите номинал сопротивления, соответствующий заданному преподавателем варианту (N) в соответствии с таблицей 1.2.

Таблица 1.2 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента «Закон Ома»

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R \text{ (Ohm)}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$+E \text{ [B]}$	$0 \div 10$									
$R \text{ (Ohm)}$	$100 \div 1000$									
$+E \text{ [B]}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

5. Введите в поле изображенное на рисунке 1.22 значение $R \text{ (Ohm)}$ равное величине, соответствующее номиналу установленного на плате резистора согласно заданному варианту.

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю. После проверки приступить к выполнению эксперимента «Закон Ома».

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Закон Ома».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления (рисунок 1.23) кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.



Рисунок 1.23 – Панель управления. Кнопка 1 Старт/Стоп. Индикатор подключения платы: – красного цвета, если макетная плата не подключена к станции NI ELVIS II+, – зеленого, если есть подключение. Запускает источники напряжения, тока и измерители. Кнопка 2 Сброс. Выключает все источники напряжения, тока и измерители. Кнопка 3 Смещение нуля. Галочка в этом поле приводит к смещению показаний всех инициализированных измерителей на величину показаний соответствующих измерителей в момент выставления галочки. Установку Смещения нуля рекомендуется производить перед началом каждой лабораторной работы. Кнопка 4 Сброс измерений – стирает результаты всех измерений в данной эксперименте в файле MS Excel и окне Графопостроителя. Кнопка 5 Запись – производит запись в файл MS Excel индицируемых в момент нажатия показаний всех измерителей, установленных на рабочем поле и отмечает точку с этими показаниями в окне Графопостроителя. Кнопка 6 Отменить запись – стирает все данные, записанные в MS Excel и зафиксированные на Графопостроителе в результате последней операции Запись. Кнопка 7 Новый график – создает новую таблицу в файле MS Excel и начинает вычерчивать новый график в окне Графопостроителя. Кнопка 8 Excel таблица – вызывает файл MS Excel. Кнопка 9 Графопостроитель – вызывает окно инструмента Графопостроитель. Кнопка 10 Осциллограммы – вызывает окно инструмента Осциллограммы. Кнопка 11 Векторная диаграмма – вызывает окно инструмента Векторная диаграмма. Кнопка 12 Калькулятор – вызывает инструмент Калькулятор. Кнопка 13 NI инструменты – вызывает меню инструментов станции NI ELVIS II. Кнопка 14 Помощь – вызывает меню с Руководством пользователя и информацией о программе. Кнопка 15 Вернуться в главное меню – возвращает в окно с меню экспериментов.

Исследование зависимости $I = f(U)$ при $R = \text{const}$.

3. Установите начальное значение напряжения **VPS+** (рисунок 1.22) равным 1 В. Показание приборов A1, V1 покажут ток и напряжения в исследуемой цепи. Нажмите **Запись**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Пошагово увеличивайте напряжение источника (от 1 В до 10 В, с шагом 1 В) и, нажимая **Запись**, фиксируйте показания приборов. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**.

5. По окончании установите значение напряжения **VPS+** равным нулю.

6. Установите на плате номинал сопротивления, отличный от заданного преподавателем согласно варианта (см. таблица 1.2).

7. Введите эту же величину сопротивления в **поле значения R** на рабочем поле лицевой панели и нажмите кнопку (7) на панели управления **Новый график**.

8. Повторите пункты 3–7. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**. По окончании сохраните файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

9. Нажмите **Стоп**.

Исследование зависимости $I = f(R)$ при $U = \text{const}$.

10. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

11. Нажмите на рабочем поле кнопку **Следующий (>>)** и измените схему на плате в соответствии с рисунком 1.24.

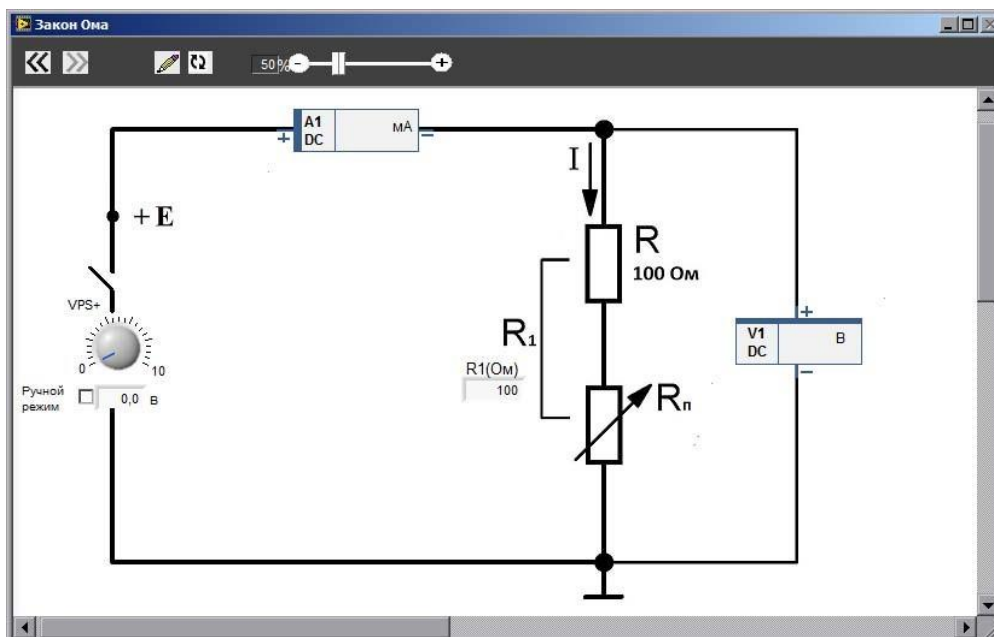


Рисунок 1.24

12. Представьте собранную схему для проверки преподавателю. После проверки установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен).

13. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления (рисунок 1.23) кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

14. Вращая ручку потенциометра **x100 Ом** на плате, установите переменное сопротивление в положение «0». Введите в поле значения **R1** на рабочем поле величину полного сопротивления цепи – 100 Ом.

15. Вращая ручку **VPS+** на рабочем поле, установите соответствующее заданному преподавателем варианту (*N*) напряжение, в соответствии с таблицей 1.3.

Таблица 1.3 – Варианты (*N*) для эксперимента

<i>N</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>U</i> (В)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

16. Потенциометром **x100 Ом** пошагово увеличивайте сопротивление цепи (от 100 до 1000Ом, с шагом 100 Ом). На каждом шаге вводите в поле значения величину получившегося сопротивления цепи и, нажимая **Запись**, фиксируйте показания приборов. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**.

17. По окончании переведите потенциометр **x100 Ом** в положение «0» и нажмите **Новый график**.

18. Повторите пп.14 - 16 для разных значений напряжения, отличных от заданного преподавателем согласно варианта (см. таблица 1.3).

19. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**. По окончании сохраните файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

20. Нажмите **Стоп**.

21. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).

2 эксперимент: «Законы Кирхгофа». Приборы и компоненты:

1. Сопротивления (зона резисторов на плате);
2. Источники напряжения (E1, E2);
3. Амперметры (A1, A2, A3);
4. Вольтметры (V1, V2, V3).

Подготовка к проведению эксперимента

1. Закройте **Панель управления**, нажав на крестик в правом верхнем углу. В результате будет доступно **Главное меню** (рисунок 1.20).

2. Из главного меню двойным щелчком выберите эксперимент «**Законы Кирхгофа**». Нажмите кнопку **Следующий** (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное в соответствии с рисунком 1.25 изображение электрической схемы лабораторной работы с установленными на ней полями компонентов и приборов.

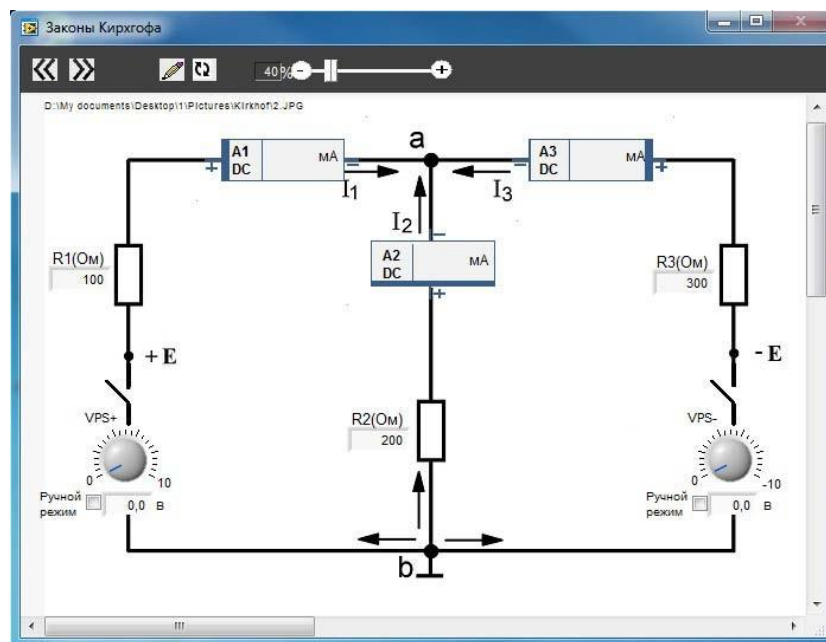


Рисунок 1.25

3. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой, показанной на рисунке 1.25. Установите номиналы сопротивлений, соответствующие заданному преподавателем варианту (N) (см. таблицу 1.4). К узлу **a** – следует присоединить концы амперметров с одинаковой полярностью.

Примечание. При сборке схемы внимательно соблюдайте полярность амперметров, вольтметров, источников ЭДС и тока.

Таблица 1.4 – Варианты (N) для эксперимента «Законы Кирхгофа»

N	$E1$	$E2$	$R1$	$R2$	$R3$
	$[B]$	$[B]$	$[Om]$	$[Om]$	$[Om]$
1	10	-1	100	200	300
2	9	-2	200	300	400
3	8	-3	300	400	500
4	7	-4	400	500	600
5	6	-5	500	600	700
6	5	-6	600	700	800
7	4	-7	700	800	900
8	3	-8	800	900	1000
9	2	-9	900	1000	1100
10	1	-10	1000	1100	1200

4. Введите в поле изображенное на рисунке 1.25 значение R (Ом) согласно заданному варианту таблицы 1.4.

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю. После проверки приступить к выполнению эксперимента «Закон Кирхгофа».

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Законы Кирхгофа».

Первый закон Кирхгофа.

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления (рисунок 1.23) кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите соответствующие заданному преподавателем варианту (см. таблицу 1.4) значения источников напряжения, $E1$: + E (VPS+) и $E2$: - E (VPS-). Приборы $A1$, $A2$, $A3$ покажут токи в исследуемой цепи. Нажмите **Запись**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

4. Нажмите **Стоп**, затем **Новый график**.

Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).

Второй закон Кирхгофа.

5. Щелчком по кнопке **Следующий** (>>) на рабочем поле откройте новую схему (рисунок 1.26).

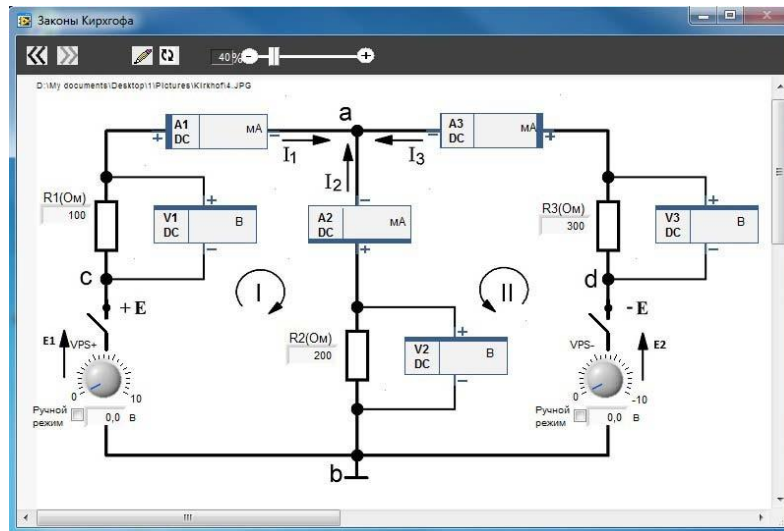


Рисунок 1.26

6. Подключите к схеме вольтметры в соответствии со схемой рисунок 1.26.

Примечание. При сборке схемы будьте внимательны по отношению к полярности амперметров, вольтметров и источников ЭДС и тока.

7. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

8. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

9. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления (рисунок 1.23) кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

10. Установите соответствующие заданному преподавателем варианту (см. таблицу 1.4) значения источников напряжения, $E1: +E$ (VPS+) и $E2: -E$ (VPS-). Приборы A1, A2, A3 и V1, V2, V3 покажут токи и напряжения в исследуемой цепи. Нажмите **Запись**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

11. Нажмите **Стоп**.

12. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

3 эксперимент: «Изучения источника постоянного напряжения».

Приборы и компоненты:

1. Резистивные переключатели $\times 10$ Ом и $\times 100$ Ом;
2. Источник напряжения (+E);
3. Вольтметр (**V1**);
4. Амперметр (**A1**).

Подготовка к проведению эксперимента

1. Закройте **Панель управления**, нажав на крестик в правом верхнем углу. В результате будет доступно **Главное меню** (рисунок 1.20).

2. Из главного меню двойным щелчком выберите эксперимент «**Изучения источника постоянного напряжения**». Нажмите кнопку **Следующий** (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное в соответствии с рисунком 1.27 изображение электрической схемы лабораторной работы с установленными на ней полями компонентов и приборов.

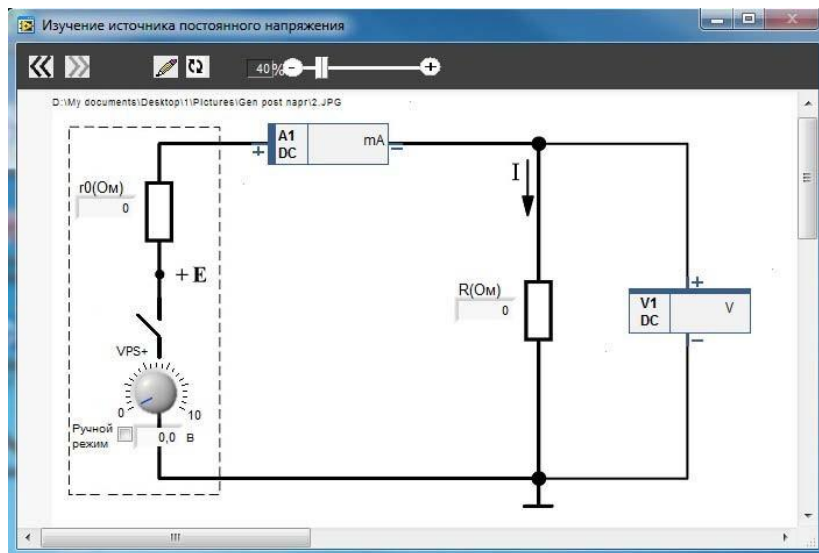


Рисунок 1.27

4. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунке 1.27. Установите номинал внутреннего сопротивления r_0 , соответствующий заданному преподавателем варианту (N) в соответствии с таблицей 1.5.

Таблица 1.5 – Варианты (N) для эксперимента

N	r_0	E
	[Ом]	[В]
1	10	10
2	20	
3	30	
4	40	
5	50	

5. Введите в поле значения r_0 на рабочем поле лицевой панели величину, соответствующую номиналу установленного на плате резистора, эмулирующего внутреннее сопротивление источника.

6. Установите ручку потенциометра **x100 Ом** в положение 500 Ом, это значение будет использоваться в качестве сопротивления нагрузки **R**.

7. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Изучения источника постоянного напряжения».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления (рисунок 1.23) кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите напряжение холостого хода (в отсутствие тока нагрузки) равным 10В. Для этого отключите один из проводов от потенциометра **R** от схемы, вращая ручку **E (VPS+)** на рабочем поле, установите значение напряжения 10 В, нажмите **Запись**, подключите нагрузку **R** обратно.

4. Для снятия внешней характеристики, вращая ручку потенциометра **x100 Ом**, пошагово увеличивайте сопротивление цепи от 500 до 1000 Ом, с шагом 100 Ом. На каждом шаге, нажимая **Запись**, записывайте показания приборов A1 и V1 в файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

5. Щелчком по иконке **MS Excel** откройте файл данных и сохраните его.

6. Нажмите **Стоп**.

7. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

4 эксперимент: «Изучения источника постоянного тока». Приборы и компоненты:

1. Потенциометры **x10 Ом** и **x100 Ом**;
2. Источник тока (**+J**);
3. Вольтметр (**V1**);
4. Амперметр (**A1**).

Подготовка к проведению эксперимента

1. Закройте **Панель управления**, нажав на крестик в правом верхнем углу. В результате будет доступно **Главное меню** (рисунок 1.20).

2. Из главного меню двойным щелчком выберите эксперимент **«Изучения источника постоянного тока»**. Нажмите кнопку **Следующий (>>)** на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное в соответствии с рисунком 1.28 изображение электрической схемы лабораторной работы с установленными на ней полями компонентов и приборов.

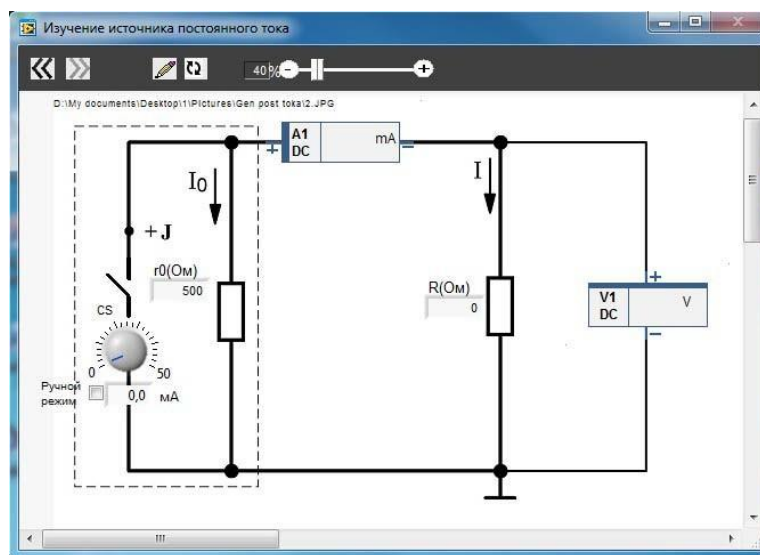


Рисунок 1.28

3. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунок 1.28. Установите номинал внутреннего сопротивления r_0 , соответствующей заданному преподавателем варианту из таблицы 1.6.

4. Введите в поле значения r_0 на рабочем поле лицевой панели величину, соответствующую номиналу установленного на плате резистора.

Таблица 1.6

N	$\pm J$	r_0
	[mA]	[Ом]
1	10	500
2		600
3		700
4		800
5		900
6		1000

5. В качестве сопротивления нагрузки **R** будет использоваться потенциометр **x10 Ом**. Установите ручку потенциометра в нулевое положение.

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Изучения источника постоянного тока».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления (рисунок 1.23) кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите ток короткого замыкания (сопротивление нагрузки равно нулю) равным 10мА.

4. Для снятия внешней характеристики, вращая ручку потенциометра x10 Ом, пошагово увеличивайте сопротивление цепи (от 0 до 50 Ом с шагом 10 Ом). На каждом шаге, нажимая **Запись**, записывайте показания приборов.

5. Снимите внешние характеристики для двух дополнительных вариантов внутреннего сопротивления, заданных преподавателем.

6. Щелчком по иконке **MS Excel** откройте файл данных и сохраните его.

7. Нажмите **Стоп**.

8. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).

Обработка экспериментальных данных

Необходимо провести расчёты в соответствии с требованиями раздела пошаговый порядок выполнения экспериментов лабораторной работы.

Для 1 эксперимента необходимо:

1. По данным 1 эксперимента рассчитайте сопротивление $R = \frac{V_i}{A_i}$ на

каждом шаге измерения, определите относительную погрешность

$$\sigma_i = \frac{R_i - \bar{R}}{R} \cdot 100\% \text{ и среднее значение сопротивления } \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \text{ для заданного}$$

преподавателем варианта. Результаты расчетов занести в таблицу 1.7.

Таблица 1.7

I=f(U) при R=Const. R=			[Ом]		
N	Измерить		Рассчитать		
	V1	A1	R	Погрешность σ	Среднее значение R
	[В]	[мА]	[Ом]	[%]	[Ом]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

2. Исходя из полученных значений постройте график $I = f(U)$ при $R = \text{const}$.

3. По данным 1 эксперимента рассчитайте сопротивление на каждом шаге измерения для заданного преподавателем варианта значения напряжения источника $E = V_{PS} +$. Результаты расчетов занести в таблицу 1.8.

4. Исходя из полученных значений, постройте график $I = f(R)$ при $U = \text{const}$.

Таблица 1.8

I=f(R) при U=Const. E=		[B]		
N	Установить	Измерить		Рассчитать
	R1	V1	A1	R1
	[Ом]	[В]	[мА]	[Ом]
1	100			
2	200			
3	300			
4	400			
5	500			
6	600			
7	700			
8	800			
9	900			
10	1000			

Для 2 эксперимента необходимо:

5. По данным эксперимента рассчитайте сумму токов в узлах **a** и **b** для заданного преподавателем варианта. Результаты расчетов занести в таблицу 1.9.

Таблица 1.9

N	Установить					Измерить			Рассчитать	
	$E1$	$E2$	$R1$	$R2$	$R3$	$A1$	$A2$	$A3$	ΣIa	ΣIb
	$[В]$		$[Ом]$			$[мА]$			$[мА]$	

6. По данным эксперимента рассчитайте сумму ЭДС и падений напряжений контуров I и II для заданного преподавателем варианта. Результаты расчетов занести в таблицу 1.10.

Таблица 1.10

N	Установить					Измерить			Рассчитать	
	$E1$	$E2$	$R1$	$R2$	$R3$	$V1$	$V2$	$V3$	$\sum_{k=1}^m E_k - \sum_{i=1}^n V_i$ Контур I	$\sum_{k=1}^m E_k - \sum_{i=1}^n V_i$ Контур II
	$[В]$		$[Ом]$			$[В]$			$[В]$	$[В]$

7. На основании данных из таблицы 1.10 постройте потенциальную диаграмму контура (**E1, R1, R3, E2**) для заданного преподавателем варианта.

Потенциалы обозначенных в схеме (рисунок 1.26) точек при известных токах определяются следующим образом: $\varphi_b = 0$; $\varphi_c = \varphi_b + E_1$; $\varphi_a = \varphi_c - I_1 \cdot R_1$; $\varphi_d = \varphi_a + I_3 \cdot R_3$; $\varphi_b = \varphi_d - E_2 \approx 0$.

Для 3 эксперимента необходимо:

8. По данным эксперимента рассчитайте внутреннее сопротивление $r_0 = \frac{\Delta U}{I} = \frac{E - U}{I}$ и падение напряжения $\Delta U = E - U$ для внешней характеристики, заполните таблицу 1.11. Сравните величины номиналов установленных на плате элементов со значениями, рассчитанными на основании экспериментально полученных данных.

Таблица 1.11

N	Установить			Измерить		Рассчитать		
	r_0	E	R	$V1$	$A1$	ΔU	ΔI	r_0
	[Ом]	[В]	[Ом]	[В]	[мА]	[В]	[мА]	[Ом]
1			xx					
2			1000					
3			900					
4			800					
5			700					
6			600					
7			500					

9. По данным эксперимента постройте внешнюю характеристику.

Для 4 эксперимента необходимо:

10. По данным эксперимента рассчитайте внутреннее сопротивление

$r_0 = \frac{U}{J - I}$ для каждой характеристики и заполните таблицу 1.12.

Таблица 1.12

N	Установить			Измерить		Рассчитать		
	r_0	+J	R	$V1$	$A1$	ΔU	ΔI	r_0
	[Ом]	[мА]	[Ом]	[В]	[мА]	[В]	[мА]	[Ом]
1			0					
2			10					
3			20					
4			30					
5			40					
6			50					

11. Сравните величины номиналов установленных на плате элементов со значениями, рассчитанными на основании экспериментально полученных данных.

Содержание отчета

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Понятие электрическая цепи, ее элементы, схема замещения и топология электрической цепи: ветвь, контур, узел.
2. Сформулируйте законы Кирхгофа для цепей постоянного тока.
3. Сколько независимых уравнений необходимо составить по первому и второму законам Кирхгофа для определения токов в ветвях?
4. Величины, каких ЭДС и падений напряжений в контурах схемы следует считать положительными, а какие – отрицательными при составлении уравнений по второму закону Кирхгофа?
5. Как производится расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа?
6. Записать уравнения по первому и второму законам Кирхгофа для электрических схем по заданию преподавателя.

7. Каковы основные соотношения при последовательном и параллельном соединении потребителей постоянного тока?
8. Запишите уравнения энергетического баланса для цепей постоянного тока.
9. Что отражает потенциальная диаграмма и как по ней определяются токи в ветвях электрической цепи?
10. В какой последовательности необходимо откладывать сопротивления резистивных элементов при построении потенциальной диаграммы?
11. Можно ли определить направление тока через резистивный элемент, зная величины потенциалов на его зажимах?
12. Может ли оказаться, что несколько точек электрической цепи имеют нулевой потенциал, если заземлена только одна точка?
13. Изменится ли токораспределение в электрической цепи, если заземлить одну из ее точек?
14. Построить потенциальную диаграмму для контуров электрической цепи по заданию преподавателя.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная учебная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Серия «Высшее образование». – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

1. Григораш, О. В. Электротехника и электроника : учебник для вузов / О. В. Григораш, Г. А. Султанов , Д. А. Нормов . – Ростов-на-Дону : Феникс ; Краснодар : Неоглори, 2008. – 462 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-13949-3.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Углубленный курс. Учебник для бакалавров. Изд.12, испр., доп., 2014. – 701 с. – ISBN 978-5-9916-3210-2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Последовательное соединение потребителей однофазного переменного тока. Резонанс напряжений и токов в цепях синусоидального тока (4 ч)

Цель работы:

1. Изучение основных свойств, законов и режимов работы электрической цепи синусоидального тока, содержащей последовательно соединенные резистор и индуктивность. Экспериментальное определение значений параметров элементов, входящих в исследуемую цепь, изучение их влияния на режим ее работы.
2. Изучение основных свойств, законов и режимов работы электрической цепи синусоидального тока, содержащей последовательно соединенные резистор и емкость. Экспериментальное определение значений параметров элементов, входящих в исследуемую цепь, изучение их влияния на режим ее работы.
3. Исследование резонанса в цепи синусоидального тока с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью.
4. Исследование резонанса в цепи синусоидального тока с параллельно соединенными индуктивностью и емкостью.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (владение методами проведения инженерных изысканий), ПК-17 (владение научно-технической информацией, отечественным и зарубежным опытом по профилю деятельности).

Теоретическое обоснование

Синусоидальным током называют ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону (рисунок 2.1)

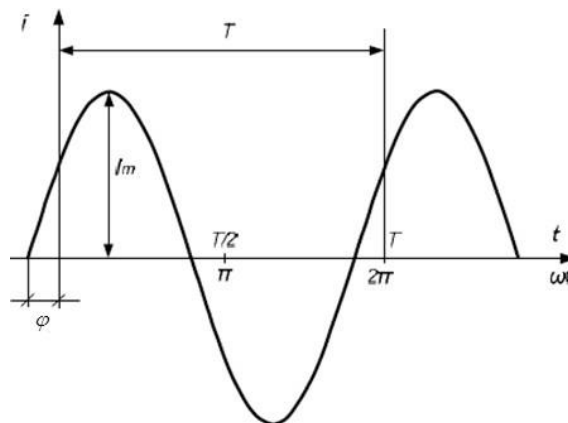


Рисунок 2.1 – График функции синусоидального тока

Выражения для тока, напряжения и ЭДС в цепи синусоидального тока могут быть представлены в следующем виде:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i) \quad (2.1)$$

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u) \quad (2.2)$$

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_e) \quad (2.3)$$

где $i(t)$, $u(t)$, $e(t)$ – мгновенные значения тока, напряжения и ЭДС; I_m , U_m , E_m – амплитуды (максимальные значения) тока, напряжения и ЭДС; T – период; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ – угловая частота, $f = \frac{1}{T}$ – частота; φ_i – начальная фаза.

Для удобства принято производить отсчет с нулевой начальной фазы напряжения, $\varphi_u = 0$ и соответственно $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$

В электротехнике широко применяется понятие *действующего значения* синусоидально изменяющейся величины (его называют также эффективным или среднеквадратичным). Действующее значение синусоидального тока определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (I_m \cdot \sin(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot (I_m)^2 \cdot \left[\left(\frac{t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot t)}{4} \right) \right]_0^T} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot (I_m)^2 \cdot \left(\frac{T}{2} - \frac{\sin(2 \cdot T/2)}{4} - \left(\frac{0}{2} - \frac{\sin(2 \cdot 0)}{4} \right) \right)} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot (I_m)^2 \cdot \left(\frac{T}{2} \right)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Действующее значение синусоидального тока численно равно значению такого постоянного тока I , который за время, равное периоду синусоидального тока, выделяет на активном сопротивлении такое же количество теплоты, что и при прохождении синусоидального тока с амплитудой I_m .

Все электроизмерительные приборы, предназначенные для измерения синусоидальных токов и напряжений, показывают действующие значения.

Изображение синусоидально изменяющихся величин на комплексной плоскости. На рисунке 2.2 показан синусоидальный ток $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$, представляющий собой на комплексной плоскости вектор I_m .

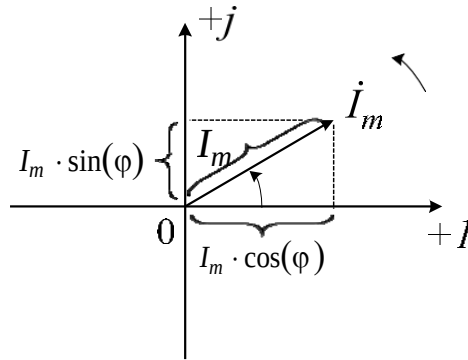


Рисунок 2.2 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

Синусоидальный ток $i(t)$ может быть записан в комплексном виде I_m (точка, поставленная над током I_m , означает, что эта величина изменяется во времени синусоидально) следующим образом:

$$I_m = I_m \cdot e^{j\varphi} = I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi).$$

где I_m – комплексная величина, модуль (длина вектора) которой равен I_m ;

$j = \sqrt{-1}$ – единица измерения по мнимой оси комплексной плоскости;

– угол, под которым вектор I_m проведен к вещественной оси $+1$ комплексной плоскости, равный начальной фазе. Выражение $I_m \cdot e^{j\varphi}$ называют *показательной* формой записи комплексного числа I_m .

$I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ называют алгебраической формой записи комплексного числа I_m .

$I_m \cdot \cos(\varphi)$ – *вещественная* часть комплекса I_m или *активная* составляющая тока I_m .

$j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – *мнимая* часть комплекса I_m или *реактивная* составляющая тока I_m .

Резистивный, индуктивный и емкостной элементы в цепи синусоидального тока. Элементами реальных электрических цепей синусоидального тока являются резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. Резистивный элемент – это идеализированный схемный элемент, учитывающий выделение теплоты в том или ином элементе реальной электрической цепи. Индуктивный элемент – это идеализированный, элемент представляющий катушку индуктивности без активного сопротивления $R = 0$.

Емкостной элемент – это идеализированный элемент, представляющий собой конденсатор без потерь $R = \infty$.

Напряжение совпадает с формой вызванного этим напряжением тока только в резистивных цепях, т.е. ток и напряжение в этом случае совпадают по фазе. В цепях с индуктивными и емкостными элементами формы напряжения и тока отличаются друг от друга.

В цепях с индуктивным элементом ток и напряжение связаны следующим выражением: $i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$. Если напряжение, приложенное к индуктивному элементу, имеет синусоидальную форму $u(t) = u_L(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, то ток определится из выражения

$$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) dt = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ),$$

$$i_L = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ),$$

где $I_m = \frac{U_m}{\omega \cdot L}$.

Произведение $\omega \cdot L$ обозначается X_L и называется *индуктивным сопротивлением* $X_L = \omega \cdot L$.

Таким образом, если к индуктивному элементу приложить напряжение гармонической формы, то ток будет отставать от напряжения на 90° (рисунок 2.3, 2.4).

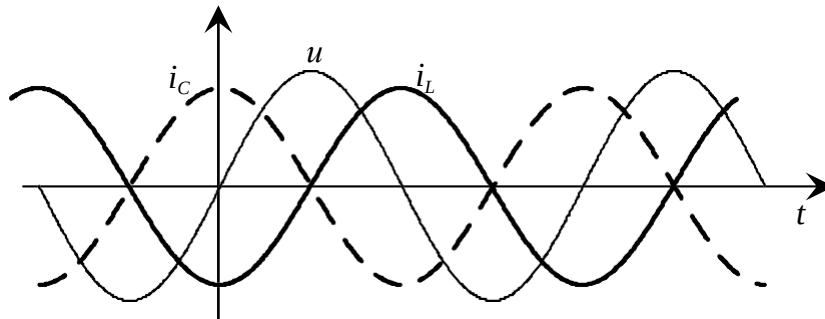


Рисунок 2.3 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе напряжения равной нулю

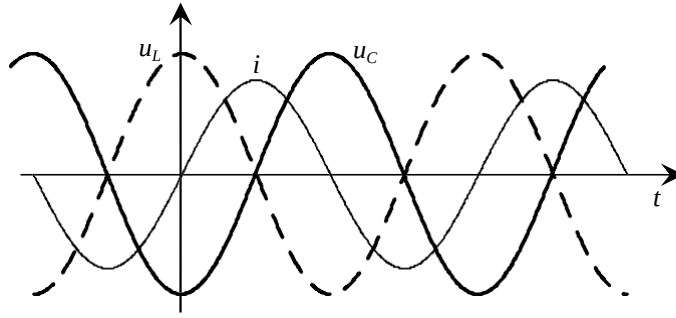


Рисунок 2.4 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе тока равной нулю

В цепях с емкостным элементом ток и напряжение связаны следующим выражением $i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt}$. Если ко входу цепи приложено напряжение синусоидальной формы $u(t) = u_C(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, то ток через емкостной элемент определится из выражения:

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot \frac{d}{dt}(U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)) = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Так как множитель $\omega \cdot C \cdot U_m$ имеет размерность тока, обозначим его $I_m = \omega \cdot C \cdot U_m$. Известно, что $\cos(\omega \cdot t) = \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)$. Таким образом, ток через емкостной элемент $i_C = I_m \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)$ опережает напряжение на 90° (рисунок 3.5, 3.6). Величина $\frac{1}{\omega \cdot C}$ обозначается X_C и называется *емкостным сопротивлением* $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$.

Протекание синусоидальных токов по участкам электрической цепи сопровождается потреблением энергии от источников. Скорость поступления энергии характеризуется мощностью. Под *мгновенной мощностью*, понимают произведение мгновенного значения напряжения $u(t)$ на участке цепи на мгновенное значение тока $i(t)$, протекающего по этому участку:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t).$$

Напряжение и ток на входе нагрузки в общем случае сдвинуты по фазе на угол φ . Примем начальную фазу напряжения $\psi_u = 0$, а начальную фазу тока $\psi_i = -\varphi$. При таком условии мгновенные значения напряжения и тока: $u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, $i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$.

Таким образом, мгновенная мощность определится следующим образом:

$$p = u \cdot i = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} [\cos(\varphi) - \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi)] = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi).$$

Мгновенная мощность имеет постоянную составляющую и гармоническую составляющую, частота которой в 2 раза больше частоты напряжения и тока (рисунок 2.5). Мгновенная мощность положительна, когда у напряжения и тока одинаковые знаки, и она отрицательна, когда у напряжения и тока разные знаки.

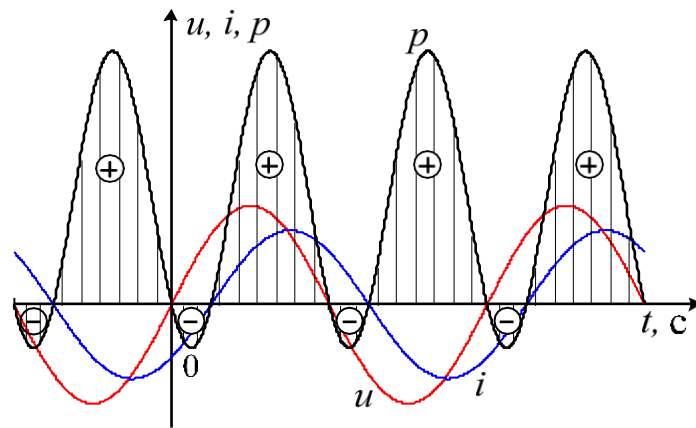


Рисунок 2.5 – График изменения мгновенных значений величин: синусоидального напряжения, тока и мощности

Когда мгновенная мощность отрицательна, энергия поступает не в нагрузку, а возвращается из нагрузки к источнику ЭДС. Такой возврат энергии источнику питания возможен, так как энергия периодически запасается в магнитном и электрическом полях элементов цепи, входящих в состав нагрузки. Если нагрузка состоит из резистивных элементов, энергия накапливаться в нем не может. В этом случае нет сдвига фаз между напряжением и током. Среднее значение мгновенной мощности за период называется *активной мощностью* или иногда просто мощностью:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U \cdot I \cdot \cos(\varphi). \quad (2.4)$$

Активная мощность, получаемая нагрузкой, не может быть отрицательной (рисунок 2.6). Активная мощность измеряется в ватах [Вт].

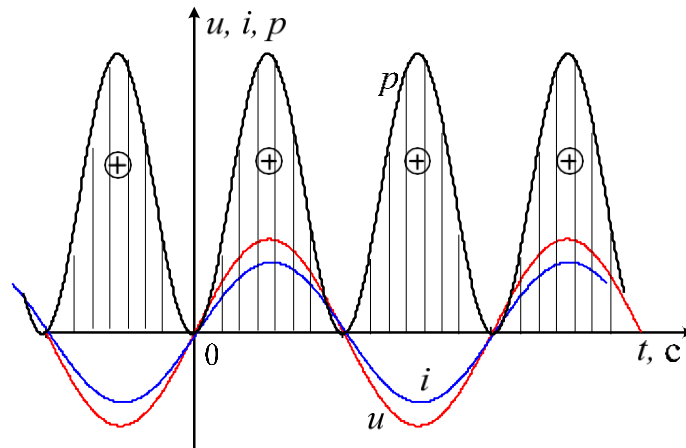


Рисунок 2.6 – Графики изменения мгновенных значений активной мощности и синусоидальных напряжения и тока, совпадающих по фазе

При $\varphi = 0^\circ$ будет наблюдаться наибольшее значение активной мощности равное произведению $U \cdot I$. Эту величину принято называть *полной мощностью* и обозначать буквой $S = U \cdot I$. Единицей измерения полной мощности является вольтметр [В·А].

Отношение активной мощности P к полной S равно косинусу угла сдвига фаз между напряжением и током и называется коэффициентом мощности:

$$\frac{P}{S} = \frac{U \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{U \cdot I} = \cos(\varphi). \quad (2.5)$$

На практике желательно обеспечивать работу электрооборудования при высоком $\cos(\varphi)$, в идеале $\cos(\varphi) = 1$. Высокий $\cos(\varphi)$ приводит к уменьшению потерь при передаче энергии по линиям.

При расчетах электрических цепей находит применение так называемая *реактивная мощность*: $Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$, которая положительна при $\varphi > 0$ и отрицательна при $\varphi < 0$. Единицей измерения реактивной мощности является вар [Var]. За один период переменного тока Q дважды отдается генератором в цепь и дважды он получает ее обратно, т.е. реактивная мощность является энергией, которой обмениваются генератор и приемник.

Мощности P, S, Q можно представить прямоугольным треугольником с катетами P, Q и гипотенузой S , тогда справедлива следующая зависимость:

$$P^2 + Q^2 = S^2 \Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Резонансный режим работы цепей переменного тока.

В цепи переменного тока, содержащей один или несколько индуктивных или емкостных элементов, подключенных к источнику энергии возможен режим резонанса, при котором ток и напряжение на входе цепи будут совпадать по фазе. В резонансном режиме электрическая цепь ведет себя как активное сопротивление, поэтому ток и напряжение на его входе совпадают по фазе. Реактивная мощность электрической цепи в режиме резонанса равна нулю. Различают два основных вида резонансных режимов: *резонанс напряжений* и *резонанс токов*. Резонансный режим на практике используют для уменьшения сдвига фаз между напряжением на приемнике и током, потребляемым от генератора. Такая операция называется *компенсацией сдвига фаз*.

Резонанс напряжений возможен на неразветвленном участке электрической цепи, который содержит индуктивный L , емкостной C и резистивный R элементы, т.е. в последовательном колебательном контуре рисунок 2.7.

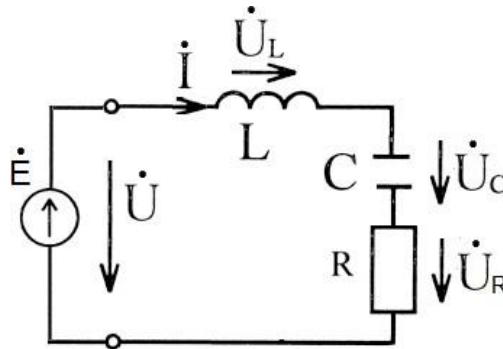


Рисунок 2.7 – Последовательный колебательный контур

По закону Ома комплексная величина тока в контуре определяется

$$I = I \cdot e^{j\psi_i} = \frac{U}{Z} = \frac{U \cdot e^{j\psi_U}}{Z \cdot e^{j\varphi}},$$

где $Z = R + j \cdot \omega \cdot L - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot C} \right)$ – комплексное входное сопротивление,

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}$ – его модуль (полное сопротивление),

$\varphi = \psi_U - \psi_i = \arctg \left(\frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R} \right)$ – его аргумент.

Действующее значение тока:
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Режим работы неразветвленного участка цепи, при котором ее ток и напряжение совпадают по фазе $\psi_u = \psi_i$, $\varphi = 0$, называется резонансом напряжений. В режиме резонанса напряжение на емкостном и напряжение на индуктивном элементах равны и находятся в противофазе рисунок 2.8.

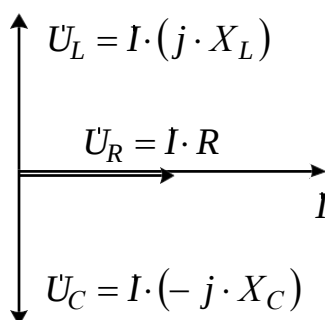


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма напряжений при последовательном резонансе

Резонансного режима можно достичь, изменяя частоту приложенного к цепи напряжения или параметры цепи: индуктивность катушки и емкость конденсатора. Величины угловой частоты ω_0 , индуктивности L_0 и емкости C_0 ,

в резонансном режиме: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; $L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}$; $C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}$.

Если напряжение U на зажимах цепи и активное сопротивление R цепи не изменяются, то ток при резонансе имеет наибольшее значение, равное $I_0 = \frac{U}{R}$ и

не зависящее от величин реактивных сопротивлений. Напряжения на емкостном и индуктивном элементах могут во много раз превысить

напряжение питания, если $\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}} > R$, где $\sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$ –

характеристическое (волновое) сопротивление колебательного контура.

Отношение $\frac{U_{Cp}}{U} = \frac{U_{Lp}}{U} = \frac{\rho}{R} = Q$ определяет кратность превышения напряжения на зажимах индуктивного и емкостного элементов над напряжением питания и называется добротностью контура.

Практическое значение имеют зависимости действующих или амплитудных значений токов и напряжений от частоты для цепей, в которых возможен резонанс. Эти зависимости называются резонансными кривыми (рисунок 2.9).

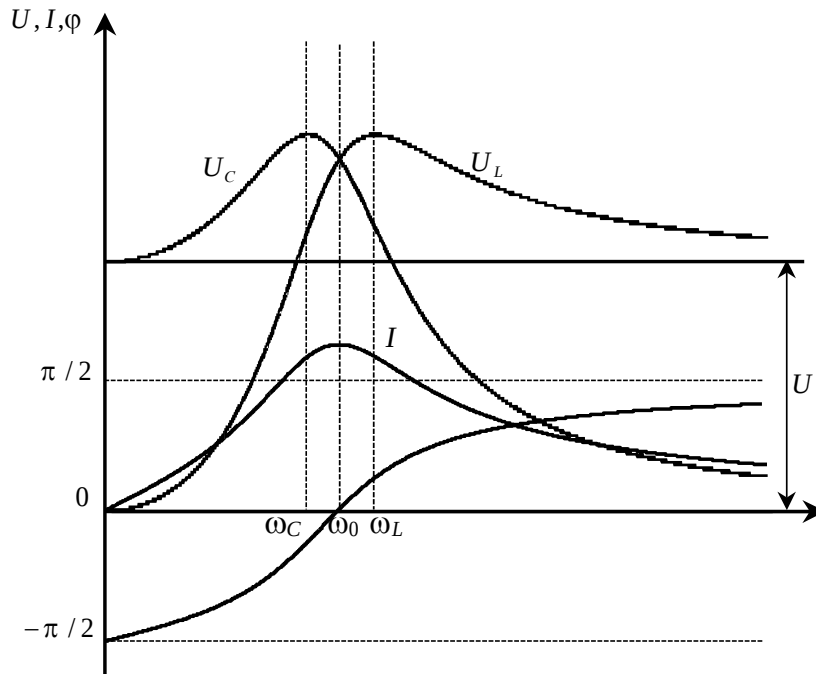


Рисунок 2.9 – Резонансные кривые

Для оценки избирательных свойств электрической цепи введено понятие ширины резонансной кривой или полосы пропускания контура, которую определяют как разность верхней ω_B и нижней ω_H частот, между которыми $\frac{I}{I_0} > \frac{1}{\sqrt{2}}$. Чем выше добротность Q , тем уже полоса пропускания контура (рисунок 2.10).

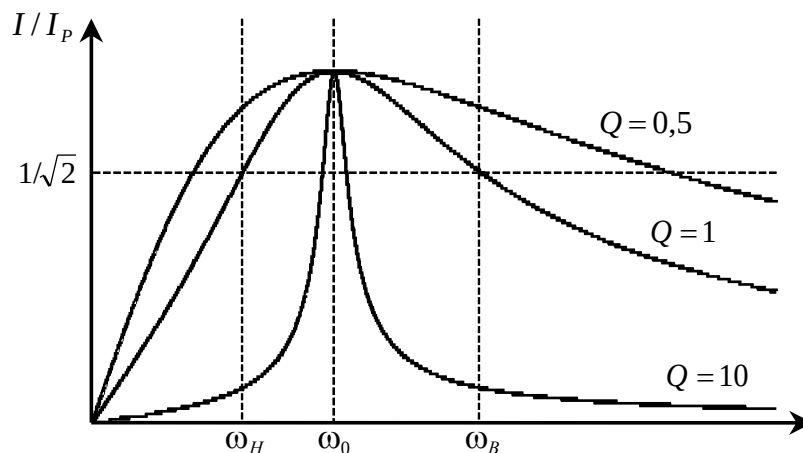


Рисунок 2.10 – Зависимость полосы пропускания контура от его добротности

На рисунке 2.11 представлены векторные диаграммы напряжений на элементах цепи до режима резонанса напряжений (а), в режиме резонанса напряжений (б) и после режима резонанса напряжений (в), соответственно. В режиме резонанса напряжений векторы напряжений на индуктивном и емкостном элементах $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_C$ больше вектора входного напряжения $\dot{U}$

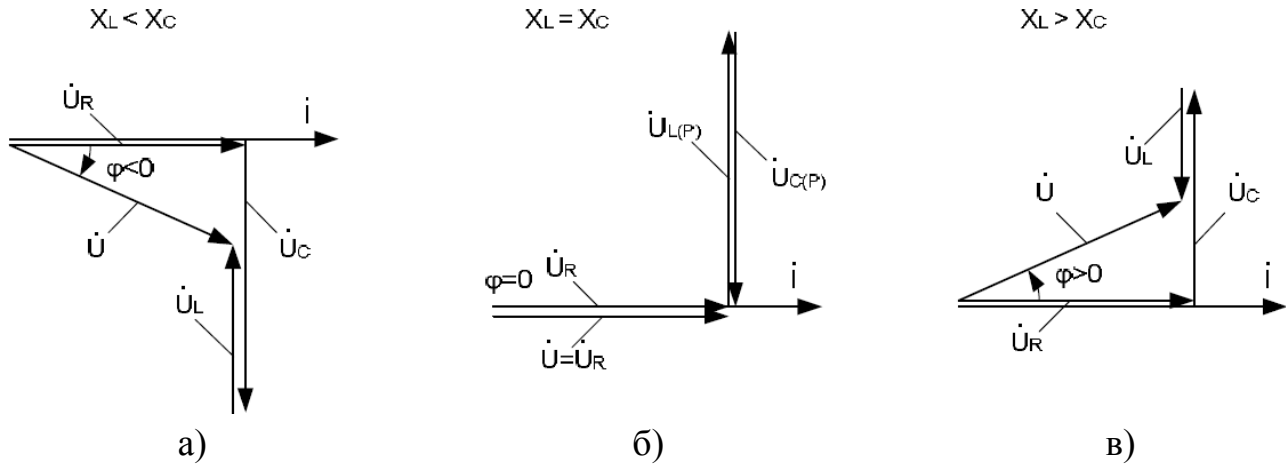


Рисунок 2.11

Резонанс токов возникает в параллельном колебательном контуре (рисунок 2.12).

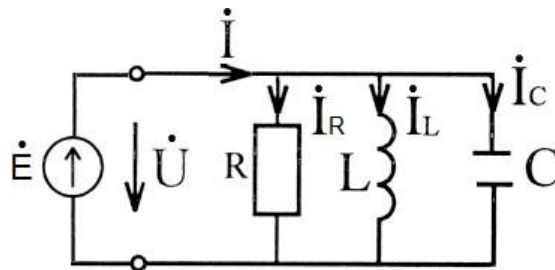


Рисунок 2.12 – Параллельный колебательный контур

При напряжении питания $\dot{U} = U \cdot e^{j\psi_U}$ комплексное значение общего тока будет равно:

$$\begin{aligned}
 \text{где } Y &= \frac{1}{R} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L} + \frac{1}{(-j \cdot \omega \cdot C)} = \frac{1}{R} - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L} + j \cdot (\omega \cdot C) = \\
 &= \frac{1}{R} - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right) = g - j \cdot (b - b) \text{ — комплексная проводимость цепи;} \\
 Y &= \sqrt{\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right)^2} \text{ — ее модуль (полная проводимость);}
 \end{aligned}$$

$\varphi = \psi_U - \psi_I$ — аргумент.

Действующее значение тока I

$$I = U \cdot Y = U \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C\right)^2}.$$

При угловой частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ индуктивная $b_L = \frac{1}{\omega \cdot L}$ и емкостная $b_C = \omega \cdot C$ проводимости ветвей одинаковы $b_L = b_C$, угол сдвига фаз тока и напряжения $\varphi = \psi_U - \psi_I = 0$. Полная проводимость цепи $Y = g = \frac{1}{R}$, и общий ток $I_0 = U \cdot g = \frac{U}{R}$. Если напряжение U на зажимах цепи и активная проводимость g цепи не изменяются, то общий ток при резонансе имеет наименьшее значение. Токи в индуктивном и емкостном элементах равны по величине и находятся в противофазе. Векторная диаграмма при резонансе токов представлена на рисунке 2.13.

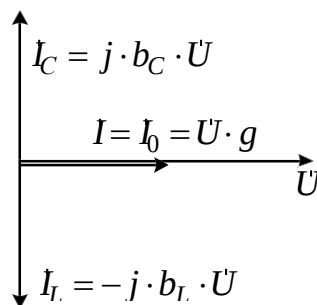


Рисунок 2.13 – Векторная диаграмма токов при параллельном резонансе

Если в ветвях с индуктивным и емкостным элементами включены резисторы R_L и R_C , то условием резонанса токов в цепи будет равенство индуктивной и емкостной проводимостей ветвей (рисунок 2.14):

$$\frac{\omega \cdot L}{R_L^2 + (\omega \cdot L)^2} = \frac{\frac{1}{\omega \cdot C}}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}, \text{ резонансная частота } \omega = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}.$$

Добротность для параллельного контура $Q = \frac{I_L}{I_0} = \frac{I_C}{I_0}$ определяет

кратность превышения тока в индуктивном и емкостном элементах над общим током в режиме резонанса. Резонансные свойства контура характеризуют также величиной, носящей название затухание контура $d = 1/Q$.

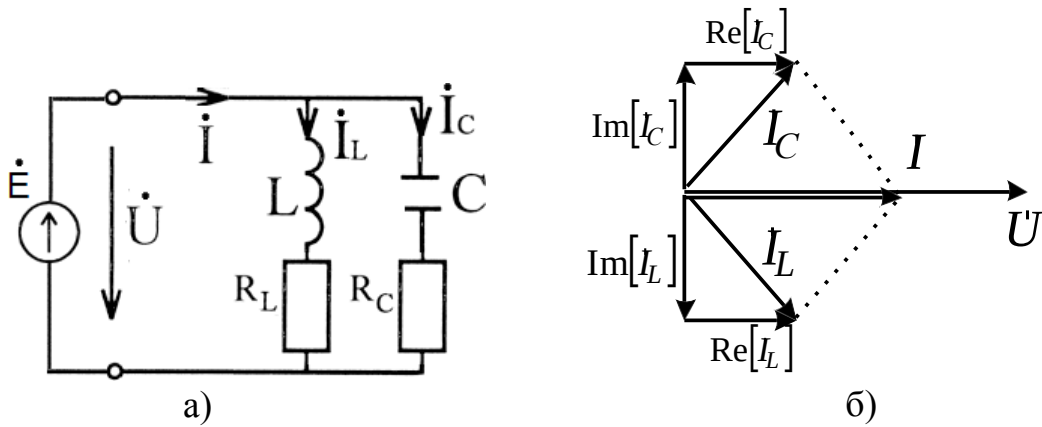


Рисунок 2.14 – Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б) параллельного колебательного контура в режиме резонанса

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) тока $I = f(\omega)$ и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi = f(\omega)$ параллельного контура приведены на рисунке 2.15.

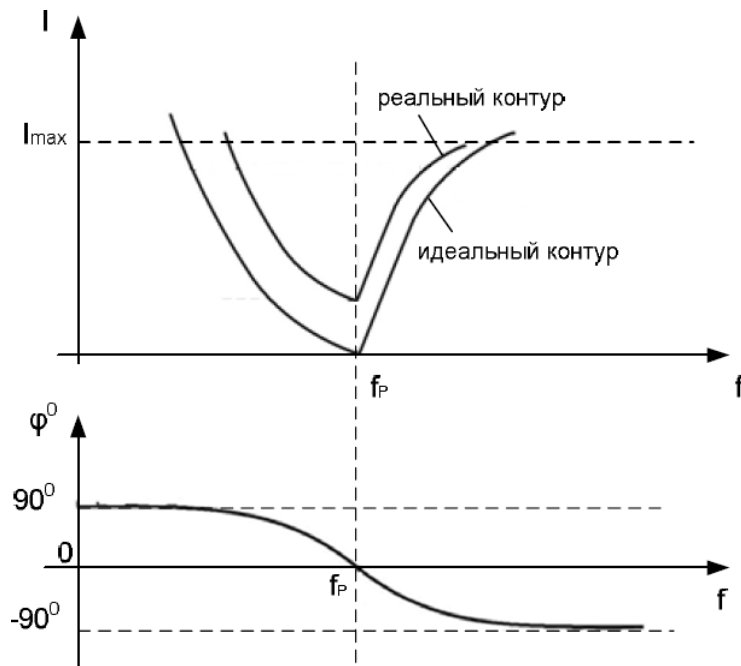


Рисунок 2.15

Оборудование и материалы

Аналогично лабораторной работы 1.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1.

Задания

Включение и подготовка к работе. Включите платформу **NI ELVIS II** при помощи выключателя, расположенного на торце устройства в задней части, рядом с разъемом для подключения кабеля питания (рисунок 1.11).

Затем включите выключатель питания платы (1) (рисунок 1.11), при этом должны загореться зеленый светодиод **PROTOTYPING BOARD POWER** (2) и красный светодиод **Питание** на плате.

Запуск программы и проведение лабораторных работ. Запуск программы осуществляется двойным щелчком по ярлыку Electronics Engineering Board 2 на рабочем столе или через стартовое меню Windows: Пуск -> Electronics Engineering Board 2.

При запуске программы на экран монитора выводится лицевая панель с элементами меню (рисунок 1.14).

Регистрация и вход. Для получения доступа к лабораторным работам пользователь должен зарегистрироваться (выбрать в меню элемент **Регистрация**) или **Войти**.

Нажимаем **Войти**. Для всех персональных компьютеров в появившемся диалоговом окне рисунок 2.16 в строке **Имя пользователя** необходимо написать ПКХ, где Х это № компьютера указанный на мониторе в правом верхнем углу. В строке **Пароль** нужно указать 1111.

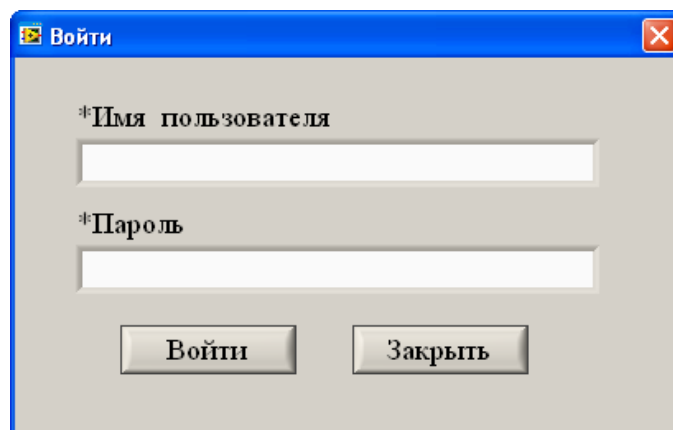


Рисунок 2.16

После входа в программу откроется **главное** меню (рисунок 2.17). Переход к выбранной лабораторной работе производится двойным щелчком по соответствующей строке меню.

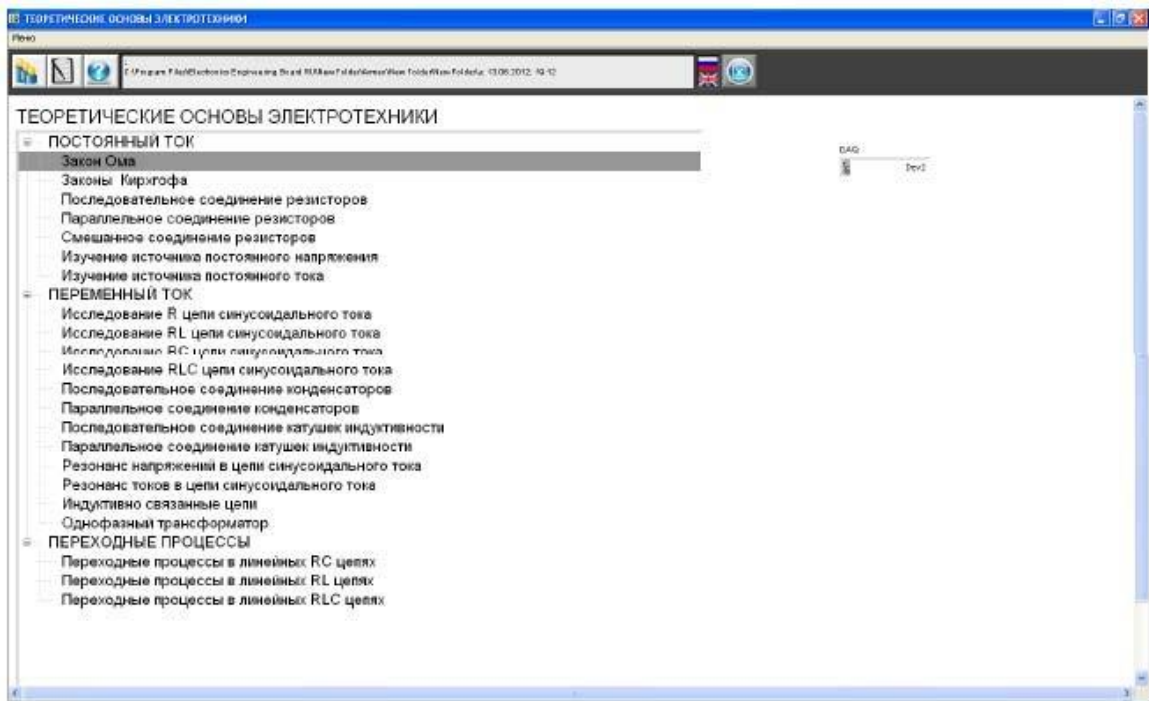


Рисунок 2.17 – Окно главного меню

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, студент должен:

1. Внимательно ознакомиться с требованиями по технике безопасности.
2. Ознакомиться с теоретическими материалами по теме.
4. Изучить методику проведения лабораторных работ.
5. Понимать принципы работы электрических схем.

Лабораторная работа 2 «**Последовательное соединение потребителей однофазного переменного тока. Резонанс напряжений и токов в цепях синусоидального тока**» будет содержать четыре эксперимента из главного меню рисунок 2.17: «Исследование RL цепи синусоидального тока», «Исследование RC цепи синусоидального тока»; «Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока», «Резонанс токов в цепи синусоидального тока».

1 эксперимент: «Исследование RL цепи синусоидального тока».

Приборы и компоненты:

1. Сопротивление (зона резисторов на плате);
2. Индуктивность (зона индуктивностей на плате);
3. Источник синусоидального напряжения (функциональный генератор $\sim E$);
4. Вольтметры ($V1$, $V2$);
5. Амперметр ($A1$).

Подготовка к проведению эксперимента «Исследование RL цепи синусоидального тока».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

3. Из главного меню (рисунок 2.17) двойным щелчком выберите эксперимент «Исследование RL цепи синусоидального тока». Нажмите кнопку **Следующий** (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 2.18).

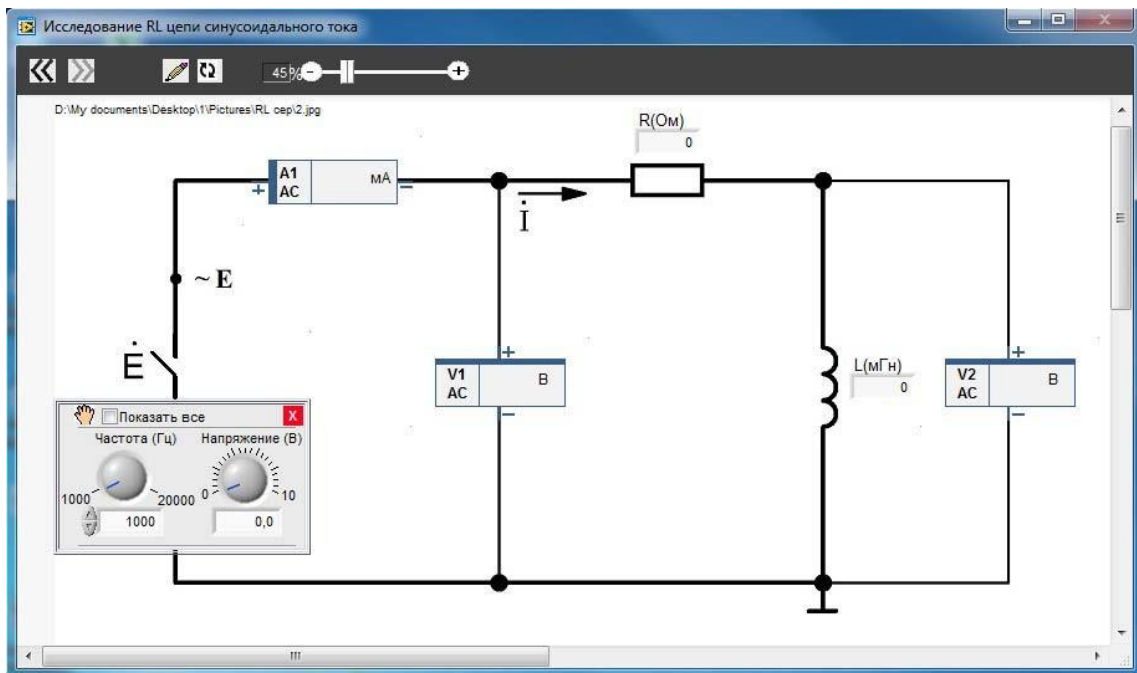


Рисунок 2.18 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на макетной плате электрическую цепь в соответствии со схемой на рисунке 2.18. Установите номиналы сопротивления и индуктивности в соответствии с заданным преподавателем вариантом (N) из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f [кГц]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\sim E_{pp}$ [В]	$1 \div 10$									
L [мГн]	0.47					1				
R [Ом]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

5. Введите в поле значения **R** и поле значения **L** на рабочем поле лицевой панели величины, соответствующие номиналам установленных на плате сопротивления и индуктивности согласно заданному варианту.

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование *RL* цепи синусоидального тока».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) и частоту (поле **Частота**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту из таблицы 2.1 и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение. Для этого нажмите кнопку (10) панели управления (рисунок 1.23), откроется окно инструмента **Осциллограммы** и согласно описанию ниже настройте вид осциллограмм.

Окно состоит из двух вкладок: **Осциллограммы** и **Временные диаграммы**.

Вкладка **Осциллограммы** (рисунок 2.19) состоит из следующих зон:

– зона отображения осциллограмм (1); – зона выбора сигнала (2); – зона управления осями, масштабирования, и синхронизации (3).

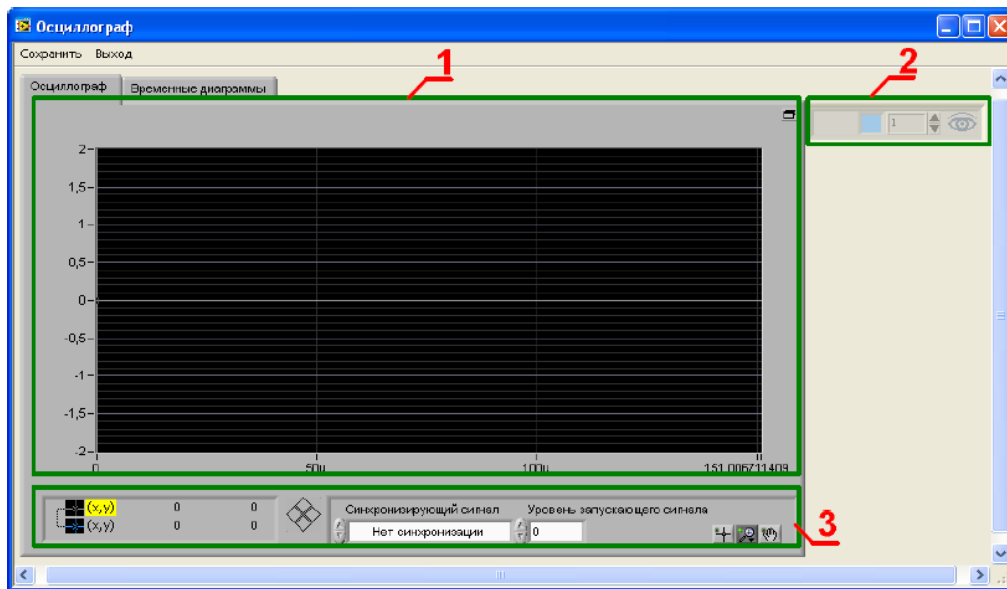


Рисунок 2.19 – Вкладка Осциллограммы

В зоне *отображения осциллограмм* (1) расположено окно, в котором в реальном масштабе времени отображаются осциллограммы выбранных измеряемых величин.

В правом верхнем углу окна расположена кнопка , щелчок по которой закрывает или открывает правую часть окна **Осциллограммы** (зона 2).

Зона *выбора сигнала* (2) содержит строку выбора и управления отображаемого сигнала (рисунок 2.20).

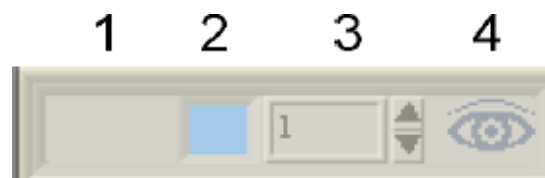


Рисунок 2.20 – Зона выбора сигнала: в поле 1 появятся названия всех иницированных в данной лабораторной работе приборов; в поле 2 доступно меню выбора цвета отображения; в поле 3 можно изменять цену деления шкалы для данного сигнала, при этом в поле индикации будет отображаться соответствующая цена деления; поле 4 позволяет скрывать или восстанавливать в окне отображения осциллограмму выбранного сигнала

В зоне *управления осями, масштабирования и синхронизации* (3) расположены кнопки и поля для работы с курсорами и масштабирования, а также настройки синхронизации осциллограмм и смены координатных осей.

Зона *управления осями и масштабирования* (рисунок 2.21):

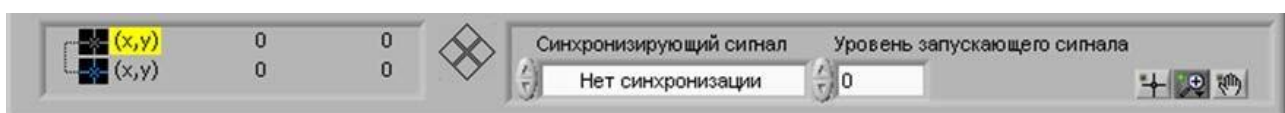


Рисунок 2.21 – Зона управления осями и масштабирования

В зоне расположены кнопки и поля для работы с курсорами, масштабирования графиков и смены координатных осей.

Поле выбора/отображения координат курсора (рисунок 2.22). Имеются два курсора. Курсор выбирается/отменяется щелчком по зонам рядом с изображением крестика (текущий курсор отмечается желтым цветом).

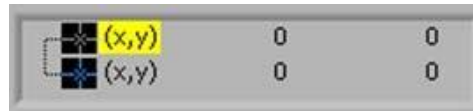


Рисунок 2.22 – Поле выбора/отображения координат курсора

Выбранный курсор можно переместить в любую точку окна вводом координаты в соответствующие поля. В эти поля отображаются координаты курсора, если изменить его положение другими способами.

Щелчки по квадратикам  приводят к смещению выбранного курсора в соответствующем направлении на 0,1 цены деления.

Меню масштабирования: .

Нажатие первой пиктограммы (с изображением крестика)  позволяет перетаскивать выбранный курсор. Это свойство можно также вызвать правым щелчком мыши по окну графиков. При нажатии на среднюю пиктограмму (с изображением увеличительного стекла)  открывается меню выбора масштаба (рисунок 2.23).

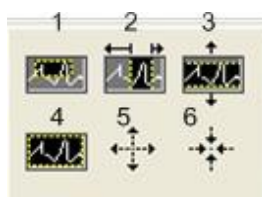


Рисунок 2.23 – Меню выбора масштаба: 1 – позволяет выбрать мышью произвольную прямоугольную область на графике и растянуть ее по диагонали на желаемый масштаб; 2 – позволяет выбрать мышью произвольную горизонтальную область на графике и растянуть ее по горизонтали на желаемый масштаб; 3 – позволяет выбрать мышью произвольную вертикальную область на графике и растянуть ее по вертикали на желаемый масштаб; 4 – позволяет автоматически выбрать оптимальный масштаб для отображения всех данных; 5 – позволяет увеличивать масштаб одновременно по горизонтали и вертикали последовательными щелчками мыши; 6 – позволяет уменьшать масштаб одновременно по горизонтали и вертикали последовательными щелчками мыши

Нажатие третьей пиктограммы (с изображением ладони)  позволяет перетаскивать всю картинку относительно осей координат при помощи курсора мыши в любом направлении.

Выбор синхронизирующего сигнала и настройка порога:

Щелчком по кнопкам слева от поля синхронизации выбирается источник сигнала синхронизации. В качестве синхронизирующего может быть применяться сигнал с любого из инициированных в данной лабораторной работе измерителей. В качестве синхронизирующего зачастую используется сам исследуемый сигнал.

Щелчком по кнопкам или вводом непосредственно в поле данных определяется пороговый уровень сигнала, при котором запускается механизм синхронизации. Для стабильной синхронизации необходимо установить такое значение уровня запускающего сигнала, чтобы выбранный в качестве синхронизирующего сигнал имел пересечение с заданным уровнем. Если в синхронизирующем сигнале отсутствует постоянная составляющая, уровень запускающего сигнала может быть установлен в «0».

Правый щелчок мышью в зонах отображения графиков (рисунок 2.24), осциллограмм, и векторных диаграмм открывает меню управления с элементами *Автомасштабирование*, *Фиксация*, *Курсор*, и *Лог файл*:

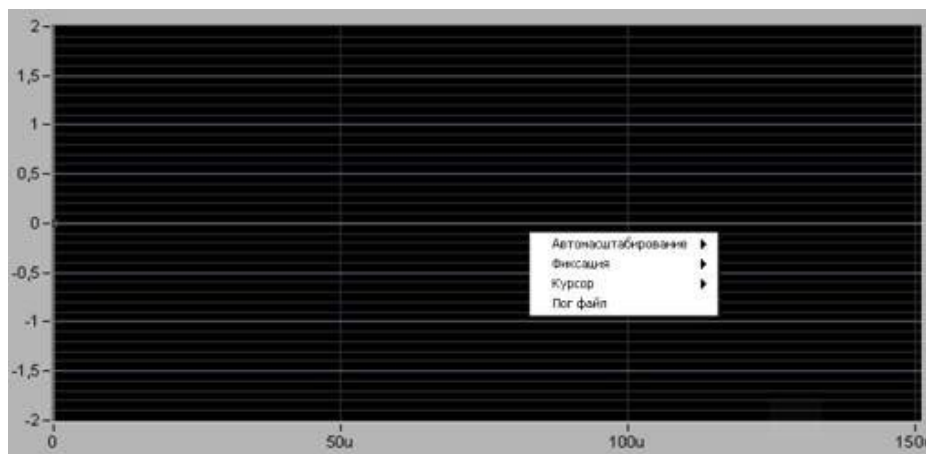


Рисунок 2.24 – меню управления с элементами *Автомасштабирование*, *Фиксация*, *Курсор*, и *Лог файл*: элемент **Автомасштабирование** > **Y** (или **X**) > **Вкл.** (или **Выкл.**) включает или выключает автоматическое масштабирование по осям **Y** или **X**, соответственно; элемент **Фиксация** > **Вкл.** (или **Выкл.**) включает или выключает фиксацию картинки на экране; элемент **Курсор** > **Показать** (или **Скрыть**) включает или выключает появление курсора на экране; элемент **Лог файл** позволяет сохранить все точки зафиксированных осциллограмм в виде таблицы, для последующего анализа

В результате настройки осциллограмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** на экране должны появиться графики зависимости измеряемых величин (пример на рисунке 2.25).

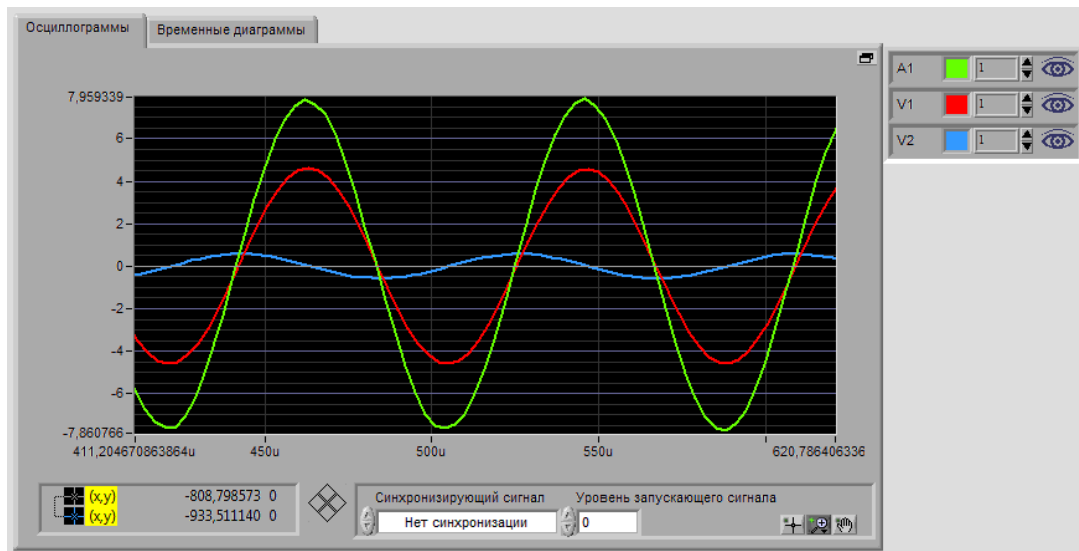


Рисунок 2.25 – Пример осциллограмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1**

После настройки осциллограмм напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение.

5. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение. Для этого нажмите кнопку (11) панели управления (рисунок 1.23), откроется окно инструмента **Векторные диаграммы** и согласно описанию ниже настройте их вид.

Окно **Векторные диаграммы** предназначено для отображения векторов измеряемых синусоидальных величин, получаемых в процессе эксперимента (рисунок 2.26).

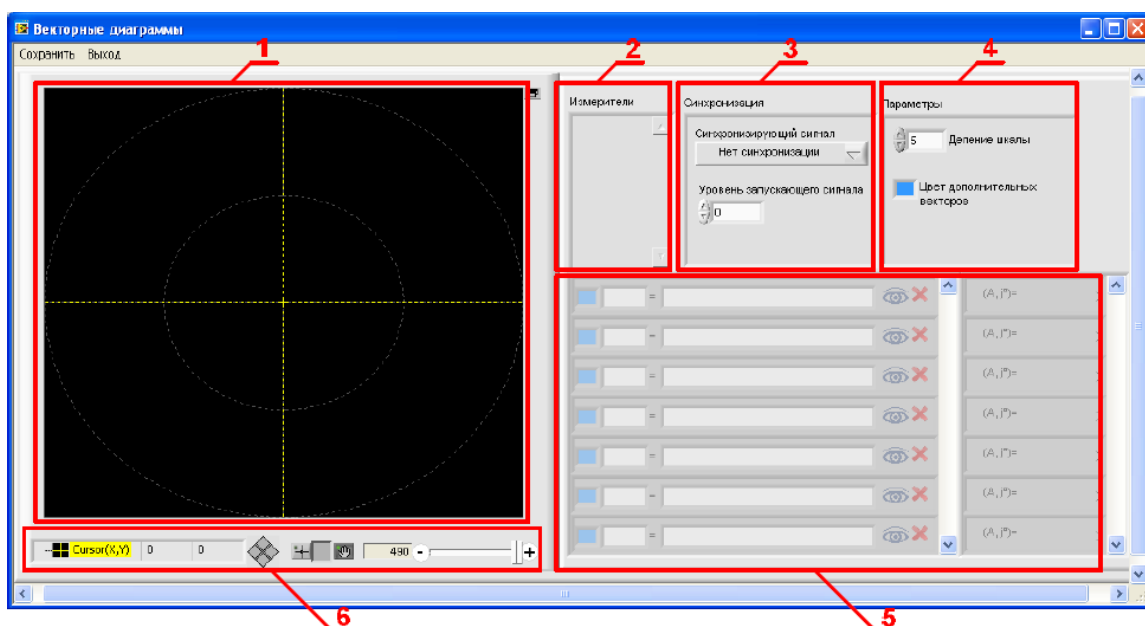


Рисунок 2.26 – Окно Векторные диаграммы

Окно состоит из следующих зон:

– зона отображения векторов (1); – зона выбора измерителей (2); – зона синхронизации (3); – зона параметров шкалы (4); – зона определения векторов (5); – зона управления осями и масштабирования (6).

В зоне отображения векторов (1) расположено окно, в котором в угловых координатных осях, в реальном масштабе времени отображаются векторы выбранных измеряемых величин.

Все вектора отображаются в виде стрелок, размер и угловая координата которых определяются из строк в зоне (6).

В правом верхнем углу окна расположена кнопка , щелчок по которой закрывает или открывает правую часть окна **Векторные диаграммы** (зоны 2, 3, 4, 5).

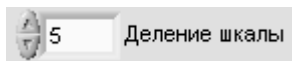


– вводом значения в поле или перемещением ползунка устанавливается максимальный радиус шкалы векторов.

Зона выбора измерителей (2) содержит список **Измерители** всех инициализированных измерителей данной лабораторной работы.

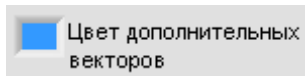
Зона синхронизации (3) содержит элементы настройки синхронизации изображения.

Зона параметров (4) позволяет:



Деление шкалы

– установить шаг деления шкалы;



Цвет дополнительных векторов

– выбрать цвет для дополнительно отображаемых векторов,

если в строку определения вектора (5) введена сумма векторов.

Зона определения векторов (5) содержит строки для ввода и редактирования векторов (рисунок 2.27).



Рисунок 2.27 – Строка ввода и редактирования вектора

Расшифровка полей строки ввода и редактирования вектора. Поле (1) меню выбора цвета отображения вектора; поле (2) имя вектора (например, если вектор представляет из себя сумму векторов); поле 3 величина, определенная в данном поле, будет отображена в виде вектора в окне отображения векторов.

Если из списка **Измерители** перетащить мышью имя измерителя, то в окне отображения появится вектор, величина которого равна амплитуде или действующему значению (в зависимости от настройки измерителя) измеряемой величины. В данном поле можно также производить математические действия над векторами, используя имена измерителей или имена, назначенные в поле (2).

Примечание. В поле определения векторов возможны следующие математические действия:

1. Поворот вектора: справа от имени вектора, в скобках, указывается угол поворота в градусах (например, **A1(45)**, или **A1(-45)**).

2. Изменение величины вектора в k-раз: перед именем вектора указывается значение k, после чего ставится "*" (например, **10*A1**, или **0.1*A1**).

3. Операции с векторами: оператор вводится между именами векторов (например, **A1+V1** или **10*A1+A1(45)+0.5*V1(-90)**).

Поле (4) позволяет скрывать или восстанавливать вектор, определенный в поле (3). Поле 5 удаляет вектор, определенный в поле (3). Поле 6 отображает угловые координаты вектора, определенного в поле (3): величину (в единицах, определенных в измерителе), фазу в градусах. Следует отметить, что в возрастании частоты точность вычисления фазы вектора измеряемого сигнала падает, и при частотах выше 10кГц может составить примерно $\pm 2.5^\circ$.

В результате настройки векторных диаграмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** на экране должны появиться вектора измеряемых величин (пример на рисунке 2.28). После настройки векторных диаграмм напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** сохраните изображение.

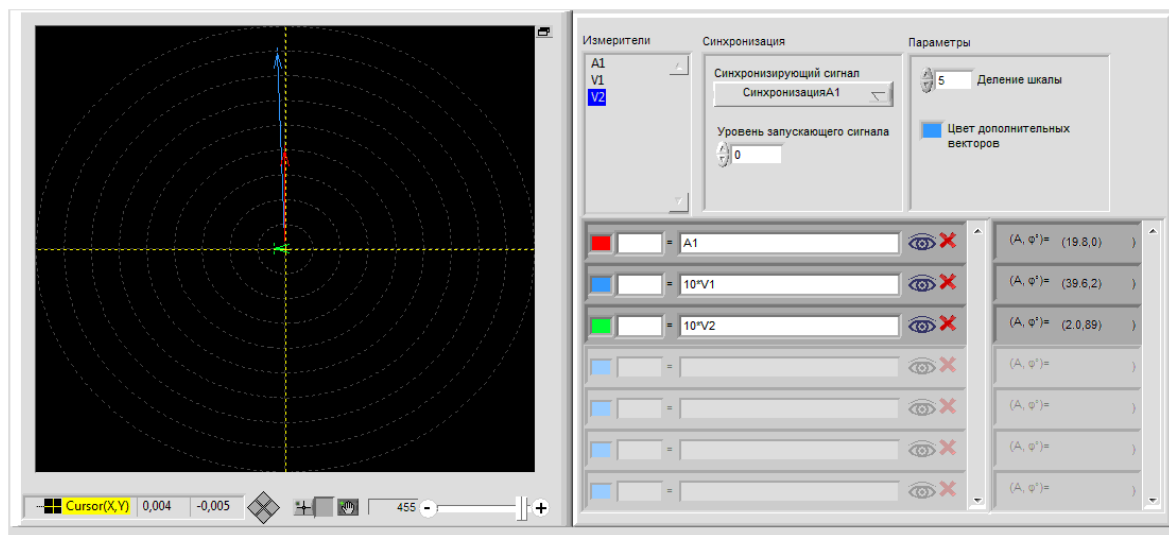


Рисунок 2.28— Пример векторных диаграмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1**

По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи. Амплитуды и фазы векторов (A, φ) выводятся рядом с полями векторов в окне **Векторная диаграмма**. Убедитесь в том, что угол между вектором напряжения на индуктивности (**V2**) и током (**A1**) составляет примерно 90° .

6. По окончании сохраните файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

7. Повторите сделанные измерения и вычисления (п.п.3-6) для всех вариантов, заданных преподавателем. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**.

8. Нажмите **Стоп**.

9. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

2 эксперимент: «Исследование **RC** цепи синусоидального тока».

Приборы и компоненты:

1. Сопротивление (зона резисторов на плате);
2. Конденсатор (зона конденсаторов на плате);
3. Источник синусоидального напряжения (функциональный генератор $\sim E$);
4. Вольтметры (**V1**, **V2**);
5. Амперметр (**A1**).

Подготовка к проведению эксперимента «Исследование RC цепи синусоидального тока».

1. Закройте **Панель управления**, нажав на крестик в правом верхнем углу. В результате будет доступно **Главное меню** (рисунок 1.20).
2. Из главного меню (рисунок 2.17) двойным щелчком выберите эксперимент «Исследование RC цепи синусоидального тока». Нажмите кнопку **Следующий** ($>>$) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 2.29).

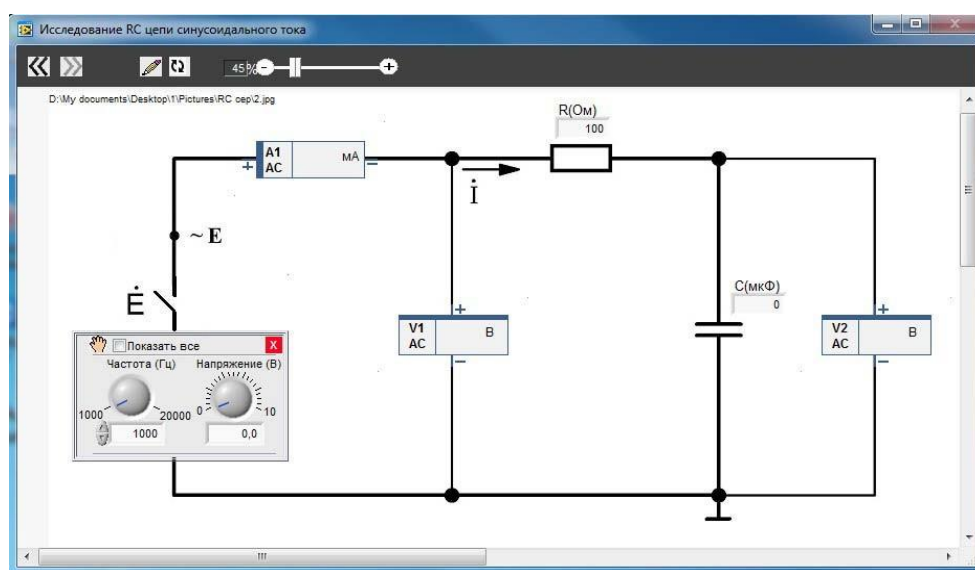


Рисунок 2.29 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на макетной плате электрическую цепь в соответствии со схемой на рисунке 2.29. Установите номиналы сопротивления и емкости в соответствии с заданным преподавателем вариантом (N) из таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

N	1	2	3	4	5	6	7
$f[\text{кГц}]$	14	12	10	8	6	4	2
$\sim E_{pp} [\text{В}]$	$3 \div 10$						
$C[\text{мкФ}]$	0.022		0.1		1		
$R[\text{Ом}]$	100	200	300	400	500	600	700

5. Введите в поле значения R и поле значения C на рабочем поле лицевой панели величины, соответствующие номиналам установленных на плате сопротивления и емкости согласно заданному варианту.
6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование RC цепи синусоидального тока».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) и частоту (поле **Частота**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту из таблицы 2.2 и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2).

5. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2). По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи. Амплитуды и фазы векторов (A ,) выведены рядом с полями определения векторов в окне **Векторная диаграмма**. Убедитесь в том, что угол между вектором напряжения на емкости (**V2**) и током (**A1**) составляет примерно -90° .

6. По окончании сохраните файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

7. Повторите проделанные измерения и вычисления (п.п.3-6) для всех вариантов, заданных преподавателем. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**.

8. Нажмите **Стоп**.

9. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

3 эксперимент: «Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока».

Приборы и компоненты:

1. Сопротивление (зона резисторов на плате);
2. Конденсатор (зона конденсаторов на плате);
3. Индуктивность (зона индуктивностей на плате);
4. Источник синусоидального напряжения (функциональный генератор $\sim E$);
5. Вольтметры (**V1**, **V2**, **V3**);
6. Амперметр (**A1**).

Подготовка к проведению эксперимента «Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока».

1. Закройте **Панель управления**, нажав на крестик в правом верхнем углу. В результате будет доступно **Главное меню** (рисунок 1.20).

2. Из главного меню (рисунок 2.17) двойным щелчком выберите эксперимент «Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока». Нажмите кнопку **Следующий** (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 2.30).

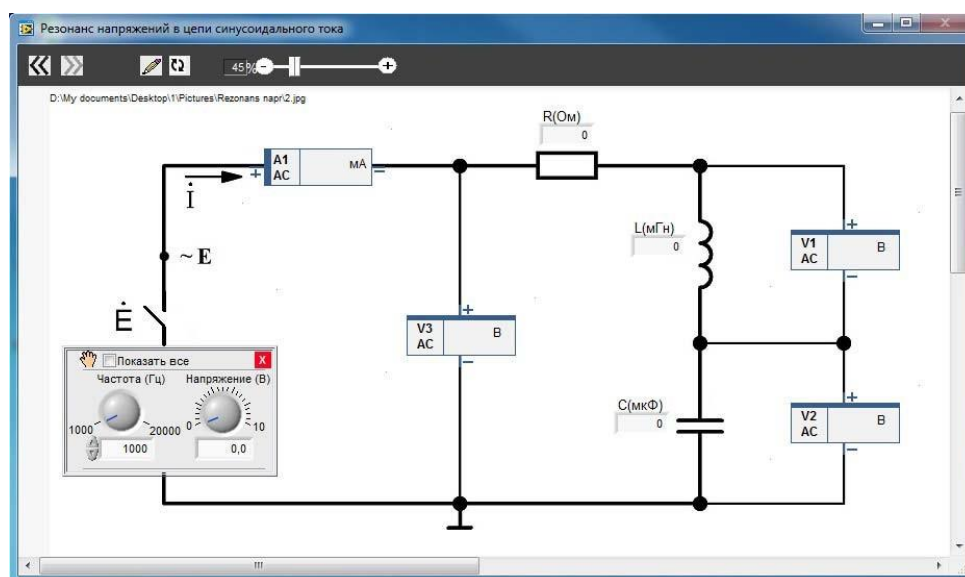


Рисунок 2.30 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунок 2.30. Установите номиналы сопротивления, индуктивности и емкости, в соответствии с заданным преподавателем вариантом (N) из таблицы 2.3.

Таблица 2.3 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sim E_{pp}$ [В]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R [Ом]	100 ÷ 500						100 ÷ 200	100	100	
L [мГн]	10						1		0.47	
C [мкФ]	0.1		0.022		0.01		1	0.1	1	

5. Введите в поле значения **R**, поле значения **L** и поле значения **C** на рабочем поле лицевой панели величины, соответствующие номиналам установленных на плате сопротивления, индуктивности и емкости цепи согласно заданному варианту.

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции и **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту, начальную частоту (2кГц, поле **Частота**) и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Пошагово (с шагом – 2 кГц) поднимайте частоту от 2 кГц до 18 кГц. Нажимая **Запись**, записывайте показания приборов на каждом шаге. Необходимо убедиться в том, что в файл **MS Excel** записаны данные измерительных приборов на каждом шаге. При подходе к резонансной частоте, уменьшите шаг так, чтобы зафиксировать эту точку. В режиме резонанса напряжений в исследуемой цепи, показания **A1** будут иметь максимальное значение. Таким образом, нужно найти значения частоты при шаге 2 кГц при которой показания **A1** начнут уменьшаться. Затем вернуться на предыдущую частоту и постепенно увеличивая частоту на 100 Гц найти максимальное значение тока **A1** и записать эту точку в файл **MS Excel**.

5. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжений **V1**, **V2**, **V3** и тока **A1** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной.

6. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжений **V1**, **V2**, **V3** и тока **A1** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной. По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи в точке резонанса. Амплитуды и фазы векторов (**A**,) выведены рядом с полями определения векторов в окне **Векторная диаграмма**. Убедитесь в том, что угол между вектором общего напряжения (**V3**) и током (**A1**) в точке резонанса близок к нулю.

7. Повторите сделанные измерения и вычисления (п.п.3-6) для всех вариантов, заданных преподавателем. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовке отчета о лабораторной работе.

8. Нажмите **Стоп**.

9. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

4 эксперимент: «Резонанс токов в цепи синусоидального тока».

Приборы и компоненты:

1. Сопротивление (зона резисторов на плате);
2. Конденсатор (зона конденсаторов на плате);
3. Индуктивность (зона индуктивностей на плате);
4. Источник синусоидального напряжения (функциональный генератор $\sim E$);
5. Вольтметр (**V1**);
6. Амперметры (**A1**, **A2**, **A3**).

Подготовка к проведению эксперимента «Резонанс токов в цепи синусоидального тока».

1. Закройте **Панель управления**, нажав на крестик в правом верхнем углу. В результате будет доступно **Главное меню** (рисунок 1.20).

2. Из главного меню (рисунок 2.17) двойным щелчком выберите эксперимент «Резонанс токов в цепи синусоидального тока». Нажмите кнопку **Следующий** (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 2.30).

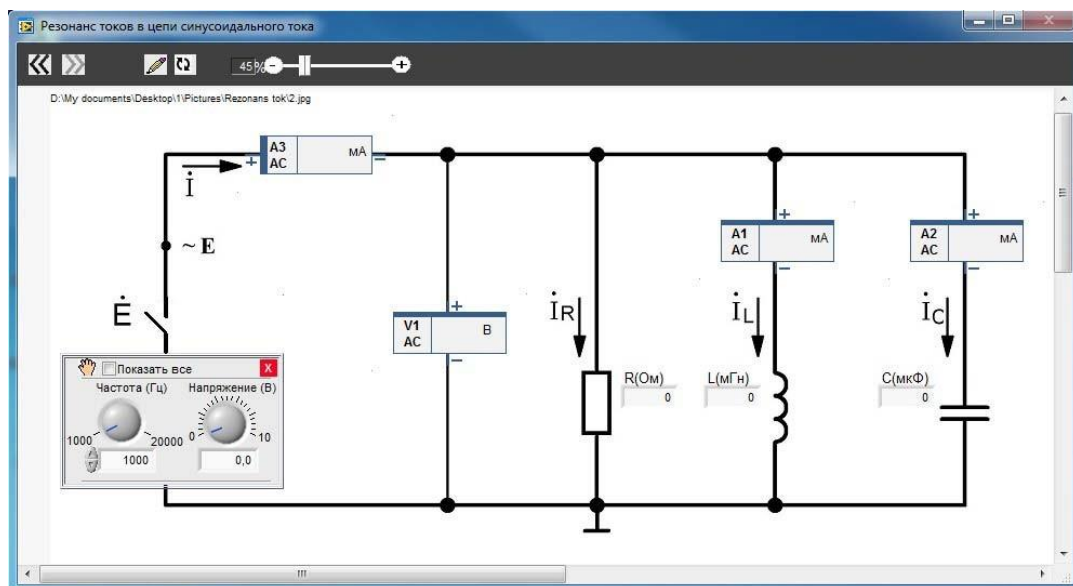


Рисунок 2.31 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунок 2.31. Установите номиналы сопротивления, индуктивности и емкости, в соответствии с заданным преподавателем вариантом (N) из таблицы 2.4.

Таблица 2.4 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sim E_{pp}$ [В]	10	9	8	7	6	5	4	3	10	9
R [Ом]	1000 ÷ 2000									
L [мГн]	10						1		0.47	
C [мкФ]	0.1		0.022		0.01		1	0.1	1	

5. Введите в поле значения **R**, поле значения **L** и поле значения **C** на рабочем поле лицевой панели величины, соответствующие номиналам установленных на плате сопротивления, индуктивности и емкости цепи согласно заданному варианту.

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Резонанс токов в цепи синусоидального тока».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту, начальную частоту (2кГц, поле **Частота**) и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Пошагово (с шагом – 2 кГц) поднимайте частоту от 2 кГц до 18 кГц. Нажимая **Запись**, записывайте показания приборов на каждом шаге. Необходимо убедиться в том, что в файл **MS Excel** записаны данные

измерительных приборов на каждом шаге. При подходе к резонансной частоте, уменьшите шаг так, чтобы зафиксировать эту точку. В режиме резонанса токов в исследуемой цепи, показания A_3 будут иметь минимальное значение. Таким образом, нужно найти значения частоты при шаге 2 кГц при которой показания A_3 начнут увеличиваться. Затем вернуться на предыдущую частоту и постепенно увеличивая частоту на 100 Гц найти минимальное значение тока A_3 и записать эту точку в файл **MS Excel**.

5. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжения **V1** и токов **A1, A2, A3** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной.

6. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжения **V1** и токов **A1, A2, A3** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной. По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи в точке резонанса. Амплитуды и фазы векторов (A, φ) выведены рядом с полями определения векторов в окне **Векторная диаграмма**. Убедитесь в том, что угол между векторами тока (**A1**) и тока (**A2**) в точке резонанса близок к 180° .

7. Повторите сделанные измерения и вычисления (п.п.3-6) для всех вариантов, заданных преподавателем. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовки отчета о лабораторной работе.

8. Нажмите **Стоп**.

9. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).

Обработка экспериментальных данных

Необходимо провести расчёты в соответствии с требованиями раздела пошаговый порядок выполнения экспериментов лабораторной работы.

Для 1 эксперимента необходимо:

1. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$. Результаты расчетов занести в таблицу 2.5.

Таблица 2.5

N	Установить				Измерить				Рассчитать					
	f	R	L	~Err	V1	V2	A1	$\varphi_u - \varphi_i$	Z(эксп.)	X _L (уст.)	Z(уст.)	Погрешность	cosφ	P
	[кГц]	[Ом]	[мкФ]	[В]	[В]	[В]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	[Вт]
1														
2														
3														

Для 2 эксперимента необходимо:

2. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$. Результаты расчетов занести в таблицу 2.6.

Таблица 2.6

N	Установить				Измерить				Рассчитать					
	f	R	C	~Err	V1	V2	A1	$\varphi_u - \varphi_i$	Z(эксп.)	X _C (уст.)	Z(уст.)	Погрешность	cosφ	P
	[кГц]	[Ом]	[мкФ]	[В]	[В]	[В]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	[Вт]
1														
2														
3														

Для 3 эксперимента необходимо:

3. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$,

$Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$, а также резонансный ток $I_P = \frac{U}{R}$ и частоту $f_P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$. Результаты расчетов занести в таблицу 2.7.

4. По полученным данным (таблица 2.7) постройте амплитудно-частотную характеристику для тока в цепи. Сравните расчетные значения резонансной частоты с полученной в ходе эксперимента.

Таблица 2.7

N	Установить					Измерить					Рассчитать								
	f	R	L	C	~Err	V1	V2	V3	A1	$\varphi_u - \varphi_i$	Z	X _c	X _L	Z	Погрешность Z	cosφ	f	I	Q
	[кГц]	[Ом]	[мГн]	[мкФ]	[В]	[В]	[В]	[В]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	Гц	[мА]	-
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			

Для 4 эксперимента необходимо:

5. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_{A1} - \varphi_{A2}$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}\right)^2}}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $Q = R \cdot \sqrt{C/L}$, а также резонансный ток $I_p = \frac{U}{R}$ и частоту $f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$. Результаты расчетов

занести в таблицу 2.8.

Таблица 2.8

N	Установить					Измерить					Рассчитать								
	f	R	L	C	~Err	V1	A1	A2	A3	$\varphi_{A1} - \varphi_{A2}$	Z	X _c	X _L	Z	Погрешность Z	cosφ	f	I	Q
	[кГц]	[Ом]	[мГн]	[мкФ]	[В]	[В]	[мА]	[мА]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	Гц	[мА]	-
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			

6. По полученным данным (таблица 2.8) постройте амплитудно-частотную характеристику для общего тока в цепи. Сравните расчетные значения резонансной частоты с полученной в ходе эксперимента.

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Что такое сдвиг фаз между током и напряжением? Чему он равен на R , L и C элементах? Нарисуйте векторные диаграммы.
2. Запишите закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением R , L и C ?
3. Дайте определение цепи синусоидального тока. Какими величинами определяется синусоидально изменяющаяся функция?
4. Что понимается под действующими значениями синусоидального тока?
5. Что понимают под «резонансом токов»? Условие возникновения данного режима. Нарисуйте векторные диаграммы режима резонанса токов.
6. Какой режим работы синусоидального тока носит название «резонанса напряжения»? Условие возникновения резонанса.
7. Напишите формулы для определения резонансной угловой частоты параллельного и последовательного контуров?
8. Что означает понятие добротности контура? частотные характеристики? резонансные кривые?
9. Какова величина действующего значения тока при резонансе напряжений и резонансе токов по отношению к режиму до резонанса?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная учебная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Серия «Высшее образование». – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Углубленный курс. Учебник для бакалавров. Изд.12, испр., доп., 2014. – 701 с. – ISBN 978-5-9916-3210-2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Трехфазные цепи. Исследование цепи трехфазного тока при различных схемах соединения нагрузки (4 ч)

Цель работы:

1. Измерение напряжений и токов в цепях трехфазной сети при подключении потребителя по схеме «звезда». Рассматриваются различные варианты: симметричные и несимметричные подключения, обрыв нейтральной линии, неравномерные нагрузки в плечах «звезды».

2. измерение напряжений и токов в цепях трехфазной сети при подключении потребителя по схеме «треугольник». Рассматриваются различные варианты для симметричных и несимметричных подключений при обрыве в цепи одного из линейных токов.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (владение методами проведения инженерных изысканий), ПК-17 (владение научно-технической информацией, отечественным и зарубежным опытом по профилю деятельности).

Теоретическое обоснование

Электрическая цепь, состоящая из системы трех синусоидальных ЭДС, имеющих одну и ту же частоту и сдвинутых по фазе одна относительно другой на угол $2\pi/3$ (120°), к которым с помощью соединительных проводов подключена нагрузка, называется трехфазной. Графики мгновенных значений *трехфазной симметричной системы ЭДС* с действующим значением каждой фазы $E_A = E_B = E_C = 220\text{ В}$ изображены на рисунке 3.1, соответствующая векторная диаграмма – на рисунке 3.2.

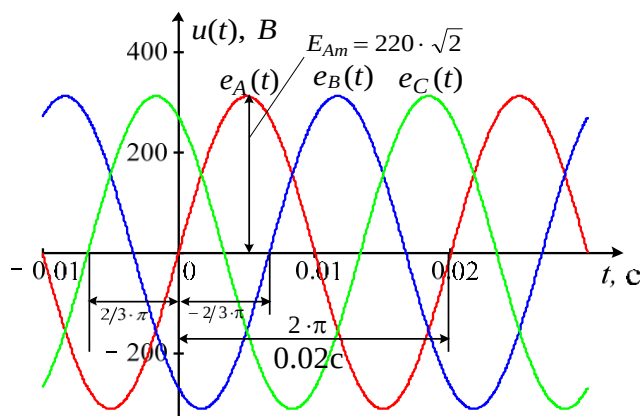


Рисунок 3.1 – Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС

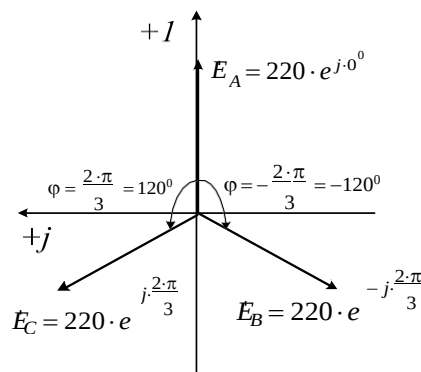


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС

На электрической схеме трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° . При соединении звездой одноименные зажимы трех обмоток объединяют в одну точку (рисунок 3.3), которую называют *нулевой точкой* генератора N .

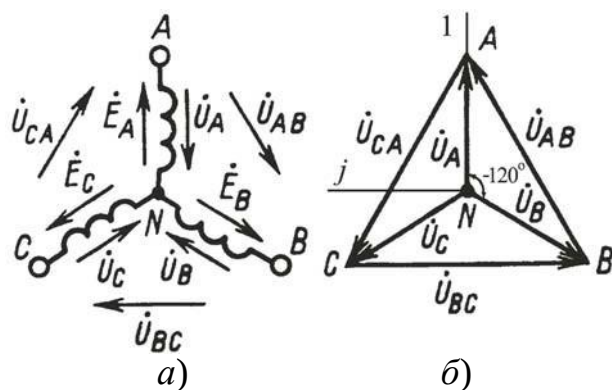


Рисунок 3.3 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора звездой (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

Обмотки генератора обозначают буквами A , B , C ; буквы ставят: A – у начала первой, B – у начала второй и C – у начала третьей фазы.

Таким образом, при соединении обмоток трехфазного генератора звездой (рисунок 3.3 а) линейные напряжения определяются через разности фазных напряжений:

$$U_{AB} = U_A - U_B; U_{BC} = U_B - U_C; U_{CA} = U_C - U_A. \quad (3.1)$$

Для симметричного генератора (источника) фазные напряжения

$$U_A = U_\phi; U_B = U_\phi \cdot e^{-j \frac{2\pi}{3}}; U_C = U_\phi \cdot e^{j \frac{2\pi}{3}}, \quad (3.2)$$

линейные напряжения (рисунок 3.3 б)

$$U_{AB} = U_\phi \cdot e^{j \frac{\pi}{6}}; U_{BC} = U_\phi \cdot e^{-j \frac{\pi}{2}}; U_{CA} = U_\phi \cdot e^{j \frac{5\pi}{6}}. \quad (3.3)$$

Между линейными и фазными напряжениями для симметричного источника существует зависимость:

$$U_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\phi. \quad (3.4)$$

При соединении обмоток генератора треугольником (рисунок 3.4) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. Геометрическая сумма ЭДС в замкнутом треугольнике равна нулю. Поэтому если к зажимам A , B , C не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

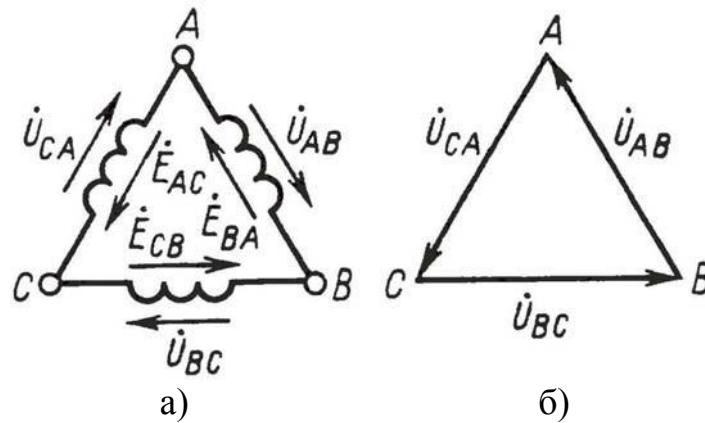


Рисунок 3.4 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора треугольником (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

При соединении обмоток трехфазного источника треугольником (рисунок 3.4 а) линейные напряжения равны фазным (рисунок 3.4 б)

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (3.5)$$

Выделяют следующие *схемы соединения трехфазного генератора с нагрузкой*. В случае соединения обмоток генератора звездой: звезда – звезда с нулевым проводом, звезда – звезда без нулевого провода, звезда – треугольник.

В случае соединения обмоток генератора треугольником, выделяют следующие *схемы соединения трехфазного генератора с нагрузкой*: треугольник – звезда, треугольник – треугольник.

Расчет трехфазных цепей синусоидального тока с симметричной несимметричной нагрузкой.

Трехфазные цепи являются разновидностью цепей синусоидального тока, и потому расчет и исследование процессов в них производят теми же методами и приемами. Для цепей трехфазного тока применим также символический метод расчета, построение векторных и топографических диаграмм. Векторные диаграммы облегчают нахождение углов между токами и напряжениями, делают все соотношения более наглядными и помогают находить возникающие ошибки при аналитическом расчете.

Симметричный режим. Для симметричного приемника, соединенного звездой (рисунок 3.5 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$, напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_{nN}$ равно нулю, а токи в фазах

$$I_A = \frac{U_A}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}; \quad I_B = \frac{U_B}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}; \quad I_C = \frac{U_C}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}, \quad (3.6)$$

где $\underline{Z}_л$ – сопротивление симметричной линии на фазу. По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 3.5 б):

$$I_A = I_B = I_C = \frac{U_\phi}{|\underline{Z} + \underline{Z}_л|}. \quad (3.7)$$

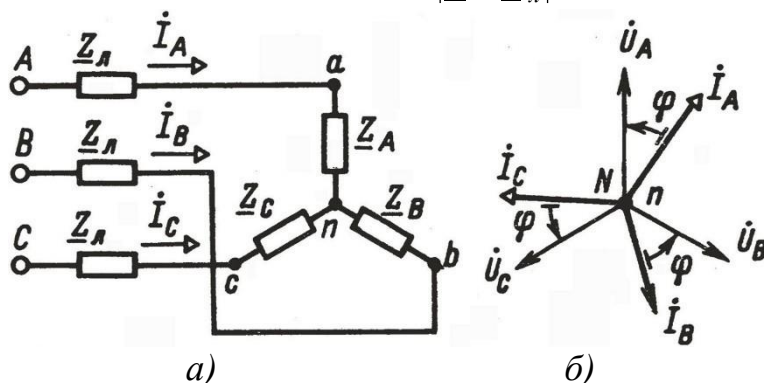


Рисунок 3.5 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

Для симметричного приемника, соединенного треугольником (рисунок 3.6 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}$. Если $\underline{Z}_л = 0$, то фазные токи приемника равны:

$$I_{ab} = U_{AB} / (\underline{Z}); \quad I_{bc} = U_{BC} / (\underline{Z}); \quad I_{ca} = U_{CA} / (\underline{Z}). \quad (3.8)$$

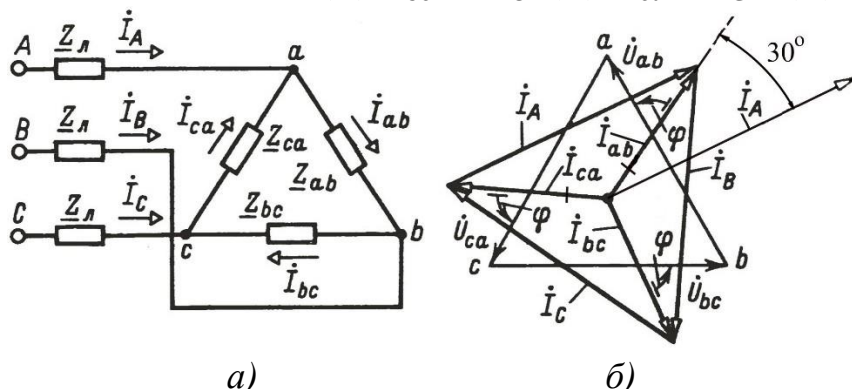


Рисунок 3.6 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 3.6 б):

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi = U_\phi / |\underline{Z}|. \quad (3.9)$$

Линейные токи приемника определяются разностью фазных токов:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}. \quad (3.10)$$

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 3.6 б),

$$I_A = \sqrt{3} \cdot I_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}}; I_B = I_A \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}; I_C = I_A \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}. \quad (3.11)$$

Если $\underline{Z}_n \neq 0$, то (после преобразования треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду) линейные токи

$$I_A = \frac{U_A}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_n}; I_B = \frac{U_B}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_n}; I_C = \frac{U_C}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_n}. \quad (3.12)$$

Фазные токи определяются через линейные:

$$I_{ab} = \frac{I_A}{\sqrt{3}} e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}; I_{bc} = I_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}; I_{ca} = I_{ab} \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}. \quad (3.13)$$

Несимметричный режим. При соединении приемника звездой с нейтральным проводом (рисунок 3.7)

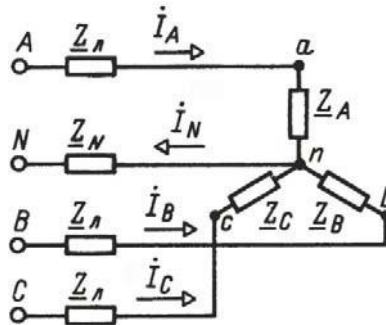


Рисунок 3.7 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов

$$U_{nN} = \frac{U_A \cdot \underline{Y}_A + U_B \cdot \underline{Y}_B + U_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (3.14)$$

где $\underline{Y}_A = 1/(\underline{Z}_A + \underline{Z}_L)$; $\underline{Y}_B = 1/(\underline{Z}_B + \underline{Z}_L)$; $\underline{Y}_C = 1/(\underline{Z}_C + \underline{Z}_L)$; $\underline{Y}_N = 1/\underline{Z}_N$.

Линейные токи и ток в нейтральном проводе

$$I_A = \frac{U_A - U_{nN}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L}; I_B = \frac{U_B - U_{nN}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_L}; I_C = \frac{U_C - U_{nN}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_L}; I_N = \frac{U_{nN}}{\underline{Z}_N}. \quad (3.15)$$

По первому закону Кирхгофа

$$I_N = I_A + I_B + I_C. \quad (3.16)$$

Для приемника, соединенного звездой без нейтрального провода и заданных линейных напряжений источника, токи можно определить без предварительного расчета напряжения смещения нейтрали:

$$\begin{aligned} U_{An} &= \frac{U_{AB} \cdot \underline{Y}_B - U_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; & U_{Bn} &= \frac{U_{BC} \cdot \underline{Y}_C - U_{AB} \cdot \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \\ U_{Cn} &= \frac{U_{CA} \cdot \underline{Y}_A - U_{BC} \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$I_A = U_{An} / (\underline{Z}_A + \underline{Z}_L); \quad I_B = U_{Bn} / (\underline{Z}_B + \underline{Z}_L); \quad I_C = U_{Cn} / (\underline{Z}_C + \underline{Z}_L). \quad (3.18)$$

При соединении приемника треугольником (рисунок 3.6 а) и $\underline{Z}_L = 0$ фазные токи определяются согласно (3.8), линейные – (3.10).

Если $\underline{Z}_L \neq 0$, то треугольник сопротивлений можно преобразовать в эквивалентную звезду и для этого соединения рассчитать линейные токи, как показано выше.

Фазные токи определяются по предварительно найденным фазным напряжениям приемника:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= \underline{Z}'_A \cdot I_A - \underline{Z}'_B \cdot I_B; & U_{bc} &= \underline{Z}'_B \cdot I_B - \underline{Z}'_C \cdot I_C; \\ U_{ca} &= \underline{Z}'_C \cdot I_C - \underline{Z}'_A \cdot I_A; \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$I_{ab} = U_{ab} / (\underline{Z}_{ab}); \quad I_{bc} = U_{bc} / (\underline{Z}_{bc}); \quad I_{ca} = U_{ca} / (\underline{Z}_{ca}), \quad (3.20)$$

где $\underline{Z}'_A, \underline{Z}'_B, \underline{Z}'_C$ – сопротивления лучей звезды, эквивалентной треугольнику.

Мощность трехфазной цепи и способы ее измерения.

Симметричный режим. Активная, реактивная и полная мощности симметричного приемника независимо от вида соединения:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \phi, \quad (3.21)$$

$$Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \phi, \quad (3.22)$$

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L, \quad (3.23)$$

где ϕ – сдвиг по фазе между фазными напряжением и током.

Несимметричный режим. Активная, реактивная и полная мощности несимметричного приемника независимо от вида соединения равны сумме соответствующих мощностей трех фаз.

Измерение мощности. Для измерения активной мощности, передаваемой от источника к приемнику, в трехфазной цепи с нейтральным проводом при несимметричном режиме включают ваттметры в каждую фазу (рисунок 3.8).

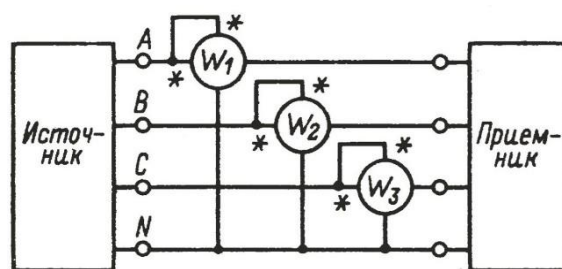


Рисунок 3.8 – Схема для измерения мощности трехфазной цепи с нейтральным проводом

Активная мощность равна сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}. \quad (3.24)$$

В случае симметричного режима достаточно одного ваттметра, при этом мощность

$$P = 3 \cdot P_W. \quad (3.25)$$

При отсутствии нейтрального провода активную мощность измеряют двумя ваттметрами, включенными по схеме, показанной на рисунке 3.9 а (и при симметричном, и при несимметричном режимах). Активная мощность равна алгебраической сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2}. \quad (3.26)$$

Для измерения реактивной мощности той же трехфазной системы применяют схему включения ваттметров, показанную на рисунке 6.9 б. Реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_{W1} + P_{W2}). \quad (3.27)$$

При симметричном режиме реактивную мощность можно измерить одним ваттметром, включенным по схеме рисунок 3.9 в. В этом случае

$$Q = \sqrt{3} \cdot P_W. \quad (3.28)$$

Полная мощность для каждой фазы определяется из треугольника мощностей, также как и для цепей однофазного тока.

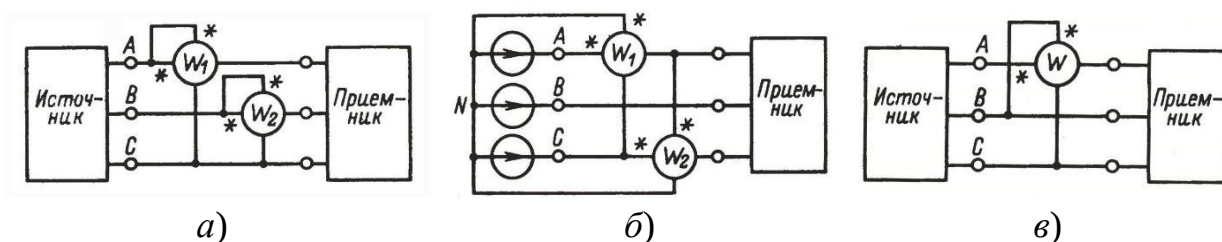


Рисунок 3.9 – Схемы для измерения трехфазной активной мощности в цепи без нейтрального провода (а) и реактивной мощности при несимметричной (б) и симметричной нагрузке (в)

Оборудование и материалы

1. Лабораторная работа выполняется на специально разработанной макетной плате «**Силовая электроника**» для рабочей станции **NI ELVIS II** сопряженной с ПЭВМ. В дальнейшем будем эту систему называть лабораторный стенд (рисунок 3.10).

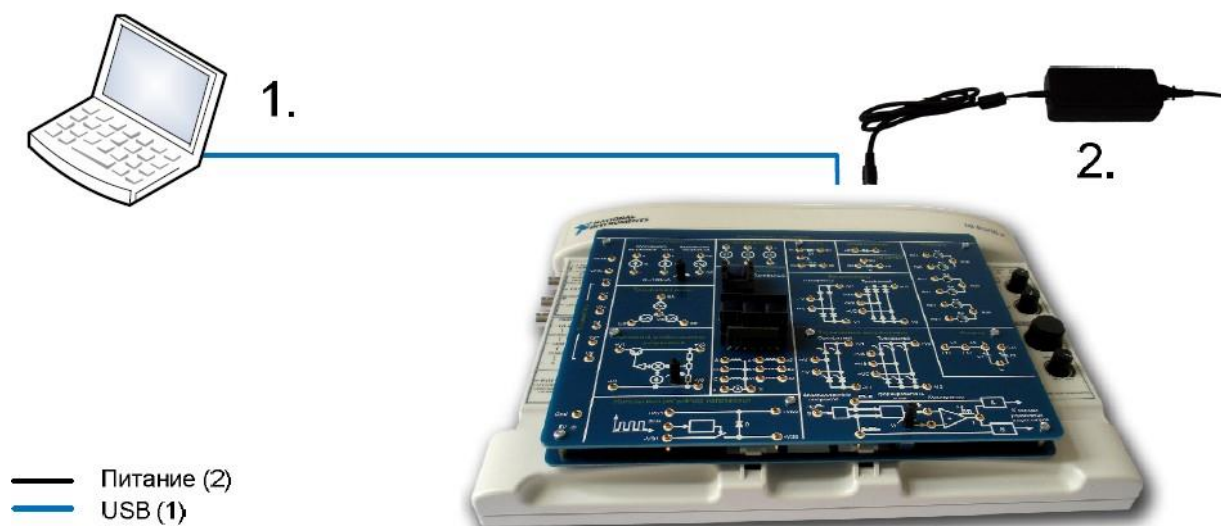


Рисунок 3.10 –Лабораторный стенд с макетной платой «Силовая электроника» подключаемый к ПЭВМ: 1 – персональный компьютер (ПЭВМ); 2 – Блок питания обеспечивающий электропитание NI ELVIS II и макетной платы

2. В стандартной комплектации лабораторного стенда имеются соединительные провода 19 шт.

3. Для работы лабораторного стенда необходимо также иметь следующее оборудование и программное обеспечение. **Системные требования к персональному компьютеру:** Pentium-4 и выше, ОЗУ минимум 256МБ, свободное пространство на жестком диске не менее 200МБ. Видеокарта и монитор Поддерживающее разрешение экрана не менее 1024x768 точек. **Необходимое программное обеспечение.** Операционная система: MS Windows 7. Microsoft Office 2010. Для чтения документации: Adobe Reader 9.0 или выше. Программное обеспечение **NI ELVIS II+** (или «**NI ELVIS II**»). Программное обеспечение **Power Electronics** для проведения лабораторных работ.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1.

Задания

Описание макетной платы лабораторного стенда.

На плате установлены электронные компоненты и контактные площадки измерительных приборов, но нет заранее собранных электрических схем (рисунок 3.11).

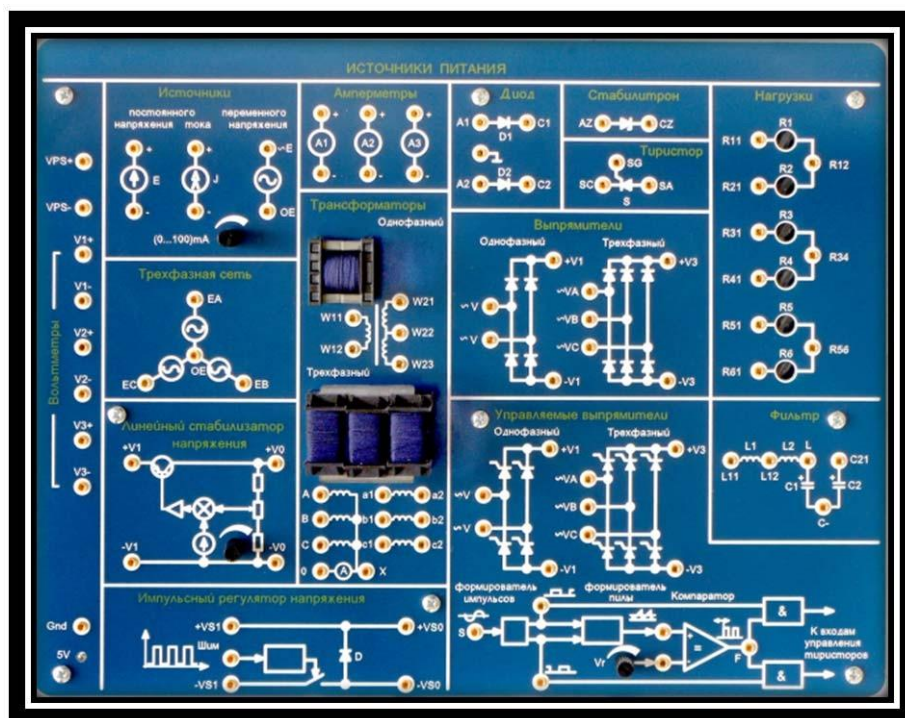


Рисунок 3.11 – Макетная плата «Силовая электроника»

В лабораторной работе будут использоваться только отдельные зоны (рисунок 3.12).

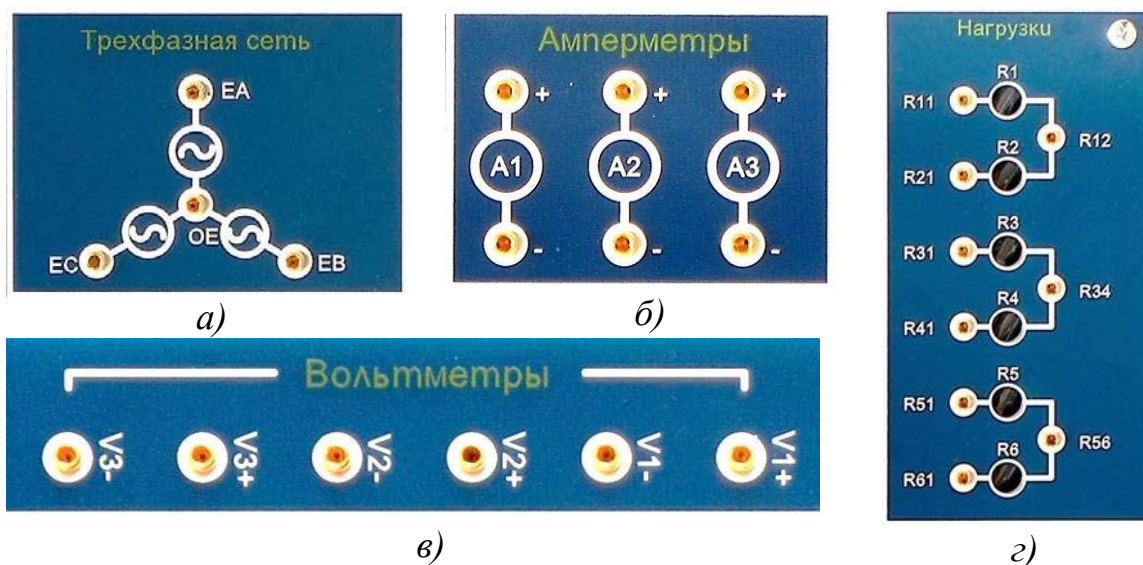


Рисунок 3.12 – Зоны на макетной плате: а) зона трехфазной сети; б) зона амперметров; в) зона вольтметров; г) зона нагрузочных резисторов

Работа с макетной платой лабораторного стенда.

Электрические подключения производятся при помощи соединительных проводов, вставляемых в контактные гнезда на плате согласно схеме, приведенной на лицевой панели каждой лабораторной работы.

Включение и подготовка к работе. Аналогично лабораторной работе 1.

Запуск программы и проведение лабораторных работ. Запуск программы осуществляется двойным щелчком по ярлыку Power Electronics на рабочем столе или через стартовое меню Windows: Пуск -> Power Electronics -> Power Electronics.

При запуске программы на экран монитора выводится лицевая панель с элементами меню **Регистрация** и **Выход** (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Начальное окно программы

Перед тем, как начать выполнение лабораторных работ студент может зарегистрироваться (выбрать в меню элемент **Регистрация**). В этом случае после проведения лабораторной работы результаты могут быть сохранены вместе с регистрационными данными студента.

При выборе этого пункта меню откроется окно регистрации (рисунок 3.14). Введите в соответствующие поля курс, группу, кафедру, имя и фамилию, а затем нажмите кнопку **РЕГИСТРАЦИЯ**. Недопустимо использовать в полях тексты в юникоде, а также символы '?', '/', '\', '|', '*', '&', '<', '>', '+', '=', ':', ' '.

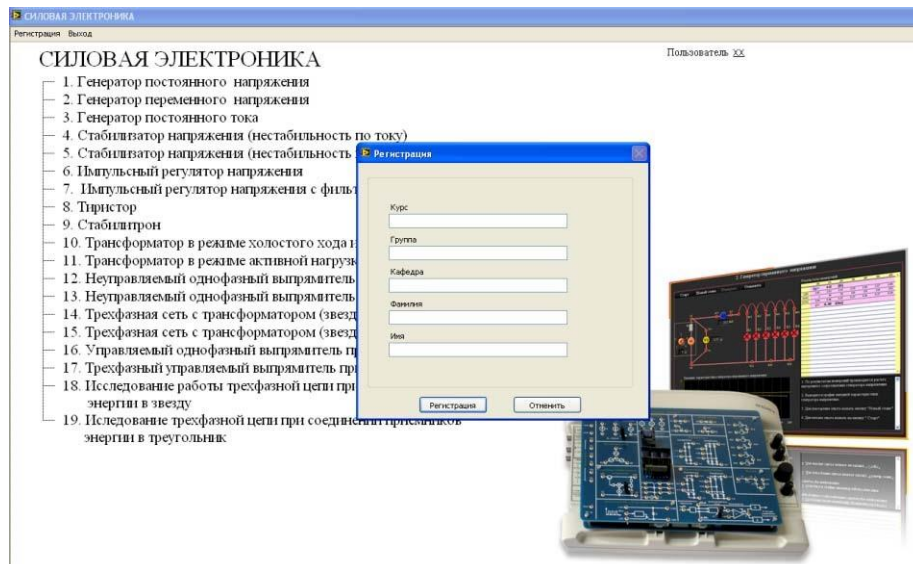


Рисунок 3.14 – Окно регистрации

В случае, если питание платформы NI ELVIS II не было включено, программа выведет сообщение ошибки. Проверьте состояние выключателя, расположенного на торце устройства в задней части платформы NI ELVIS II.

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, студент должен:

1. Внимательно ознакомиться с требованиями по технике безопасности.
2. Ознакомиться с теоретическими материалами по теме.
4. Изучить методику проведения лабораторных работ.
5. Понимать принципы работы электрических схем.

Лабораторная работа 3 **«Трехфазные цепи. Исследование цепи трехфазного тока при различных схемах соединения нагрузки»** будет содержать два эксперимента из главного меню рисунок 3.13: «Исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии в звезду», «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник». Объем измерений для различных схем задается преподавателем.

1 эксперимент: «Исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии в звезду». Приборы и компоненты:

1. Трехфазная сеть;
2. Нагрузки;
- 3 Амперметры (A1, A2, A3);
4. Вольтметр (V1, V2, V3).

Подготовка к проведению эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии в звезду».

1. Убедитесь, что рабочая станция **NI ELVIS II** включена (выключатель питания станции находится в положении **I**, см. Рисунок 1.11).
2. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).
3. Из главного меню (рисунок 3.14) двойным щелчком выберите эксперимент «Исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии в звезду». На рисунке 3.15 показан пример окно данного эксперимента, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

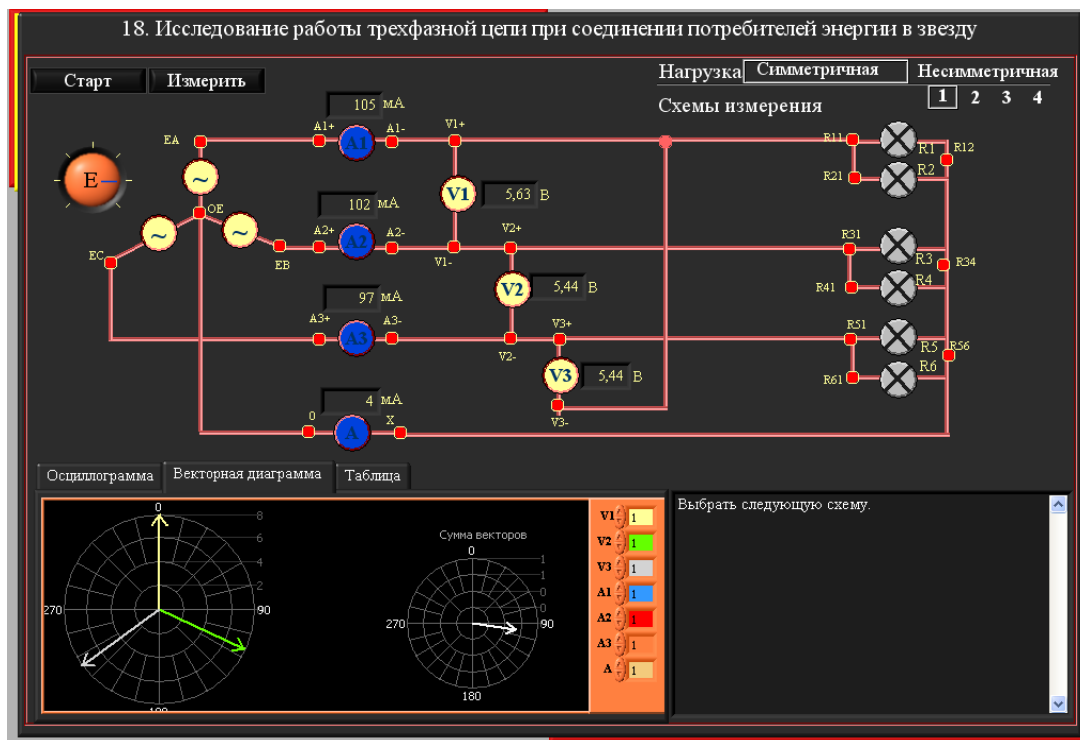


Рисунок 3.15 – Окно эксперимента измерения №1 симметричного режима

Кнопка **Старт** приводит систему в состояние готовности, на лицевую панель выводится электрическая схема выбранной лабораторной работы.

Кнопка **Измерить** начинает выполнение опыта. При этом формируются необходимые входные сигналы для подачи на входы электрической схемы, после чего проводятся соответствующие измерения в определенных точках схемы. Результаты измерений записываются в соответствующие поля таблицы на лицевой панели; на основании полученных значений строятся графики.

Кнопка **Отменить** отменяет последнее выполненное действие.

На лицевой панели имеются измерительные приборы – амперметры (обозначаются символом А) и вольтметры (обозначаются символом V). При наведении курсора мыши на соответствующий индикатор на экране появляется изображение соответствующей стрелочной панели с показаниями прибора. Кроме показаний стрелочных приборов, также существует возможность вывода на экран осциллограмм соответствующих величин. Это возможно, на измерительных приборах у которых изначально более темный цвет. При щелчке мышью по измерительному прибору темного цвета в процессе выполнения лабораторной работы (после нажатия кнопки старт), его цвет изменяется на светлый, а на лицевой панели появляется осциллограмма с соответствующими показаниями. При последующем щелчке мышью по измерительному прибору светлого цвета состояние лицевой панели возвращается в исходное положение.

В лабораторной работе имеется круговой регулятор, при помощи которого можно выставить напряжение исследуемой трехфазной сети.

Окна осциллограмм и векторных диаграмм имеют поля для выбора масштаба.

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 3.15, приведенным на экране для схемы измерения №1 симметричного режима.

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии в звезду».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Выставьте круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине заданной преподавателем.

3. Нажмите кнопку **Измерить**, при этом формируются необходимые входные сигналы для подачи на входы электрической схемы, после чего проводятся соответствующие измерения в определенных точках схемы.

4. Для отображения значений измерительных приборов, необходимо нажать на их изображение на лицевой панели эксперимента. Для схемы измерения №1 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.15.

5. Выбрать из **Меню** на лицевой панели, элемент **Сохранить**, предназначенный для сохранения результатов эксперимента (включая образ лицевой панели и регистрационные данные студента, дату и время). В этом случае на основании регистрационных данных и наименования проведенной лабораторной работы формируется название файла, который сохраняется в папке **My Documents\Power Electronics**.

6. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

7. Выберите схему измерения №1 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.16

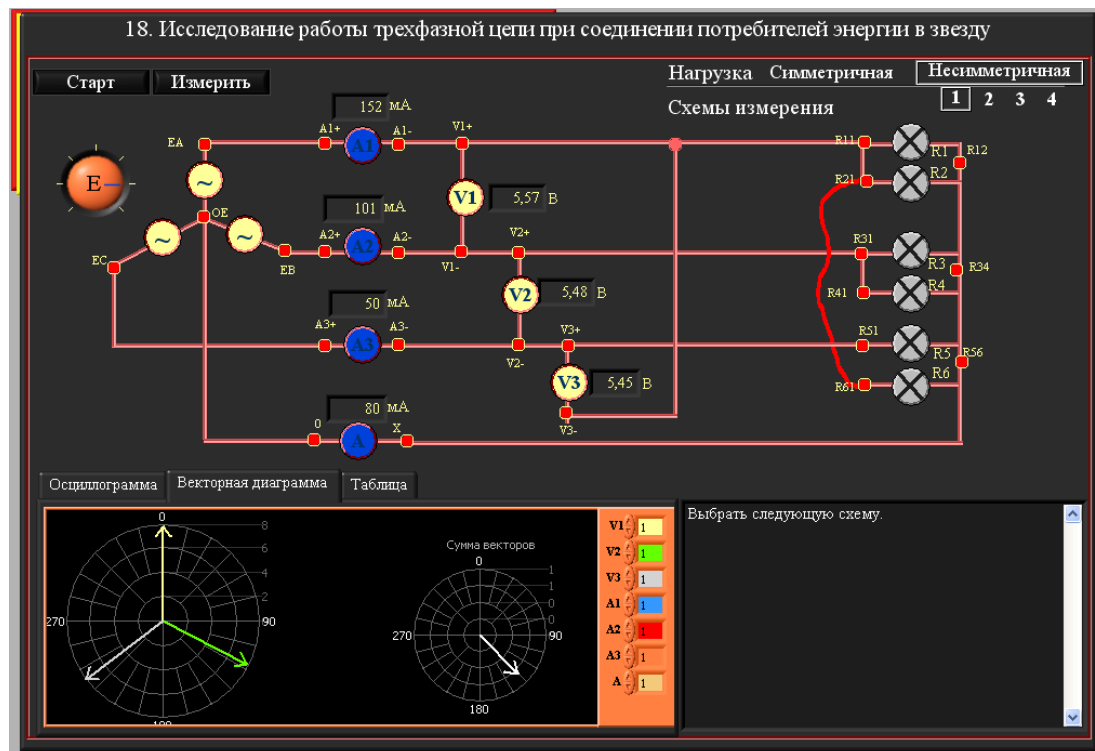


Рисунок 3.16 – Окно эксперимента схемы измерения №1 несимметричного режима

8. Измените схему на плате в соответствии с рисунком 3.16.

Внимание! Любые электрические соединения должны производиться при отключенном питании платы (выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы).

9. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

10. Установите круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине, заданной преподавателем.

11. После завершения монтажа включите питание платы и следуйте инструкциям на экране, в правом нижнем углу лицевой панели.

12. Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

13. Выберите схему измерения №2 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.17. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

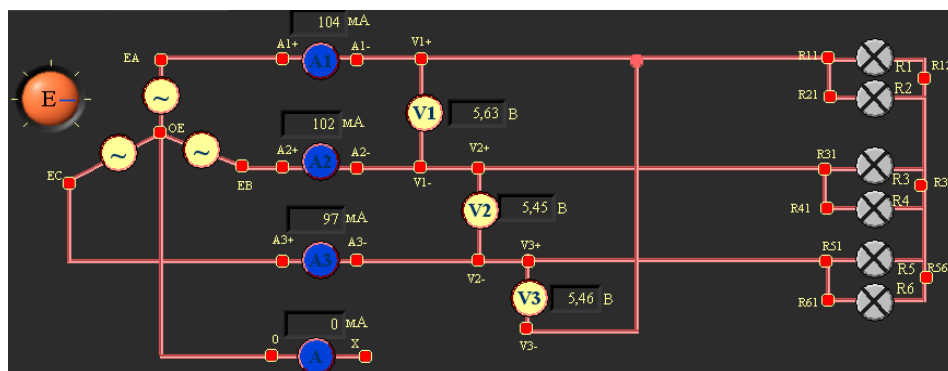


Рисунок 3.17

14. Выберите схему измерения №2 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.18. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

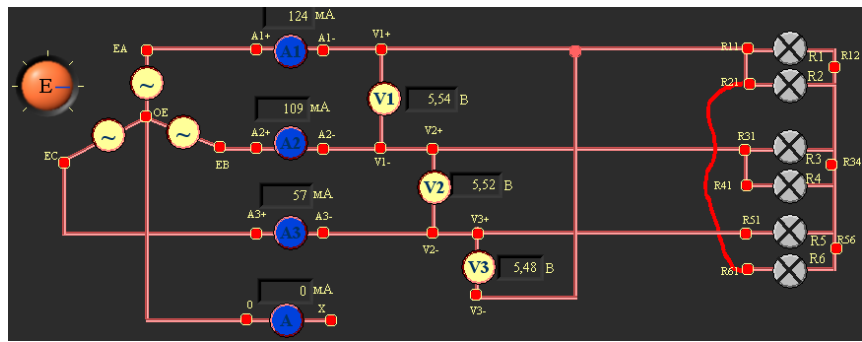


Рисунок 3.18

15. Выберите схему измерения №3 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.19. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

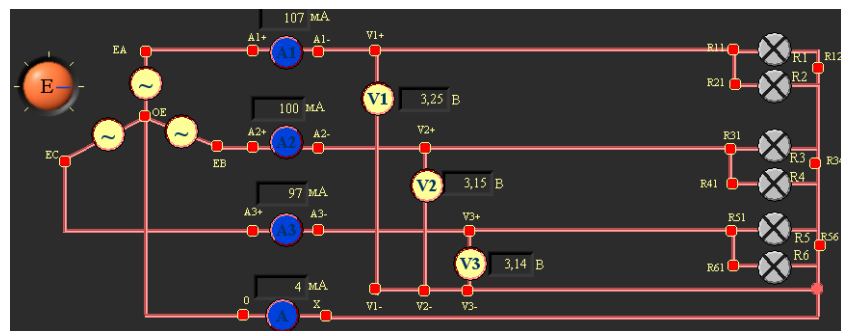


Рисунок 3.19

16. Выберите схему измерения №3 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.20. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

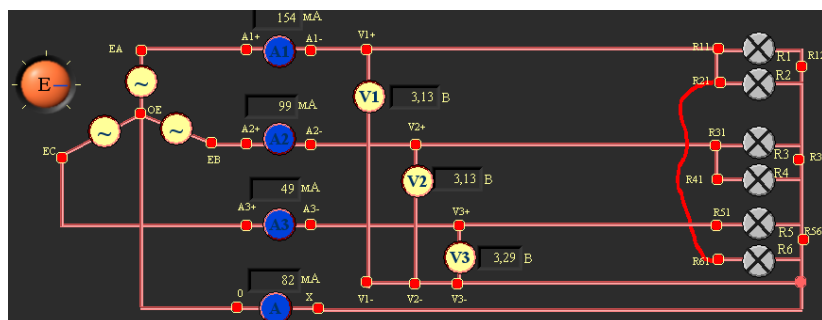


Рисунок 3.20

17. Выберите схему измерения №4 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.21. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

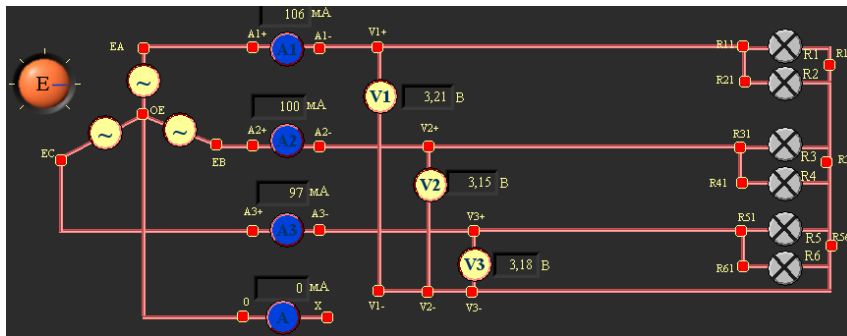


Рисунок 3.21

18. Выберите схему измерения №4 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.22. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

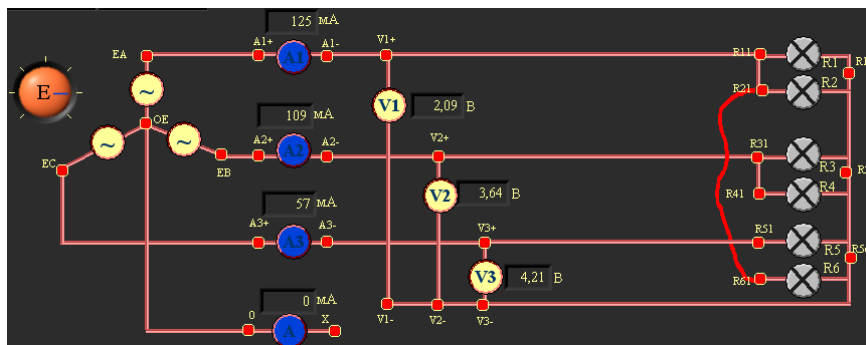


Рисунок 3.22

2 эксперимент: «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник». Приборы и компоненты:

1. Трехфазная сеть;
2. Нагрузки;
- 3 Амперметры (A1, A2, A3);
4. Вольтметр (V1, V2, V3).

Подготовка к проведению эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник».

1. Убедитесь, что рабочая станция **NI ELVIS II** включена (выключатель питания станции находится в положении **I**, см. Рисунок 1.11).
2. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).
3. Из главного меню (рисунок 3.14) двойным щелчком выберите эксперимент «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник». На рисунке 3.23 показан пример окно данного эксперимента.

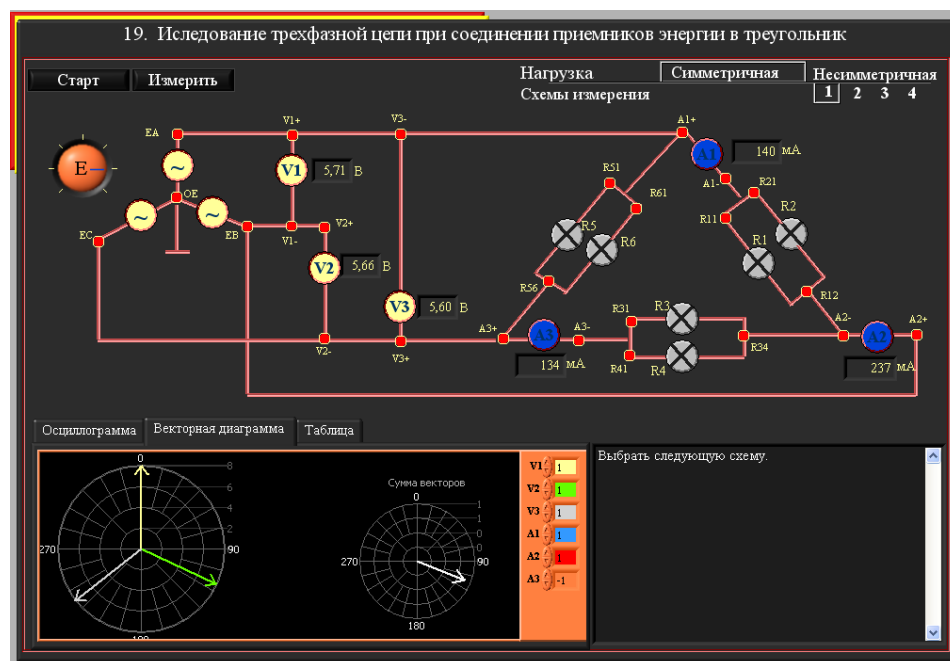


Рисунок 3.23 – Окно эксперимента измерения №1 симметричного режима

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 3.23, приведенным на экране для схемы измерения №1 симметричного режима.

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **I** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Выставьте круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине заданной преподавателем.

3. Нажмите кнопку **Измерить**. Для отображения значений измерительных приборов, необходимо нажать на их изображение на лицевой панели эксперимента. Для схемы измерения №1 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.23.

4. Сохранить результаты эксперимента в папке *My Documents\Power Electronics*.

5. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

6. Выберите схему измерения №1 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.24.

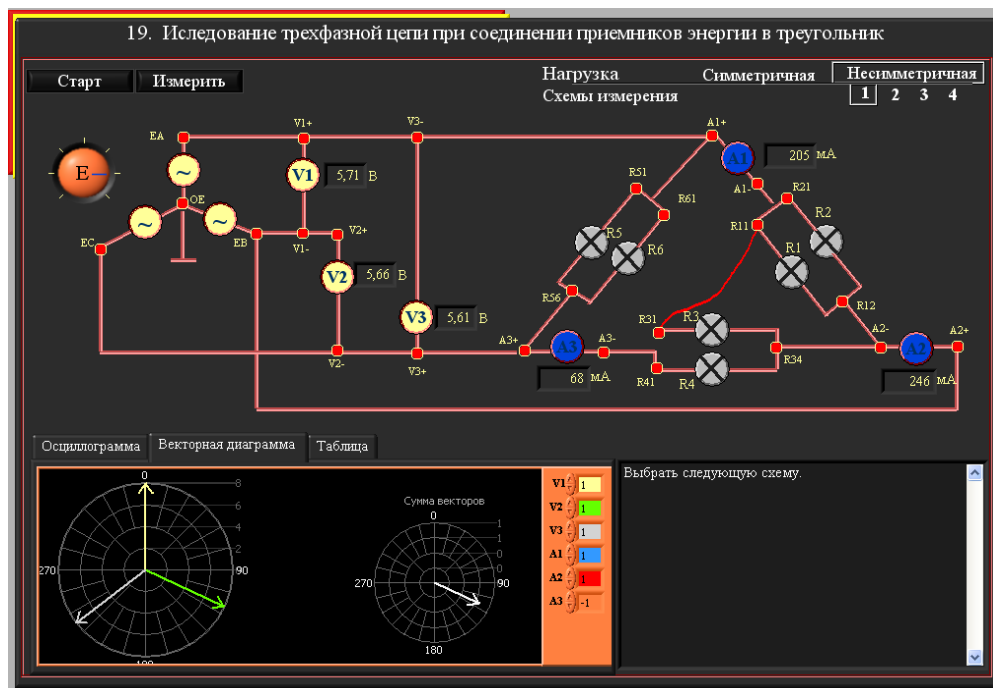


Рисунок 3.24 – Окно эксперимента схемы измерения №1 несимметричного режима

7. Измените схему на плате в соответствии с рисунком 3.24.

Внимание! Любые электрические соединения должны производиться при отключенном питании платы (выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы).

8. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

9. Установите круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине, заданной преподавателем.

10. После завершения монтажа включите питание платы и следуйте инструкциям на экране, в правом нижнем углу лицевой панели.

12. Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

13. Выберите схему измерения №2 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.25. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

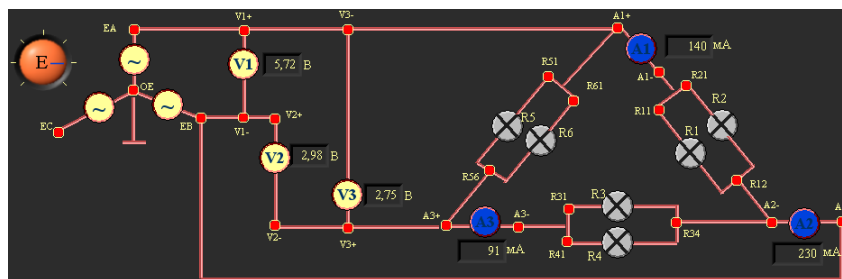


Рисунок 3.25

14. Выберите схему измерения №2 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.26. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

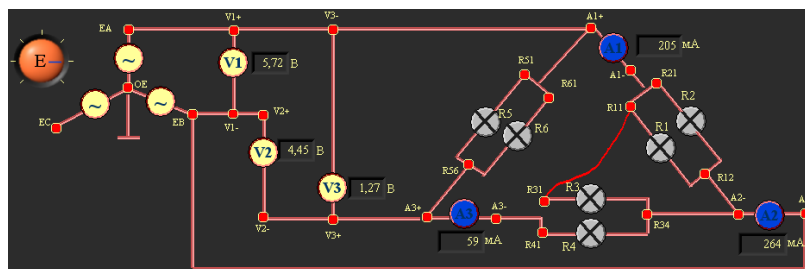


Рисунок 3.26

15. Выберите схему измерения №3 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.27. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

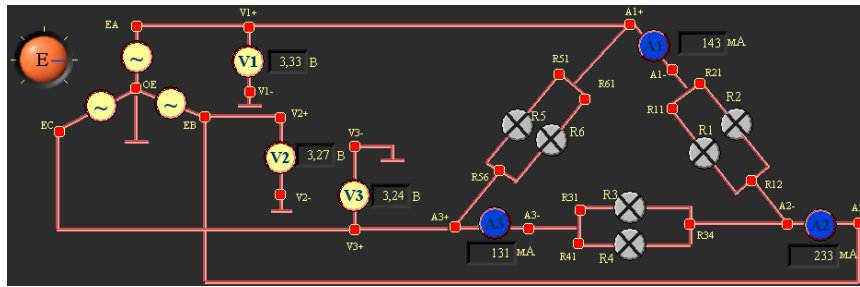


Рисунок 3.27

16. Выберите схему измерения №3 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.28. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

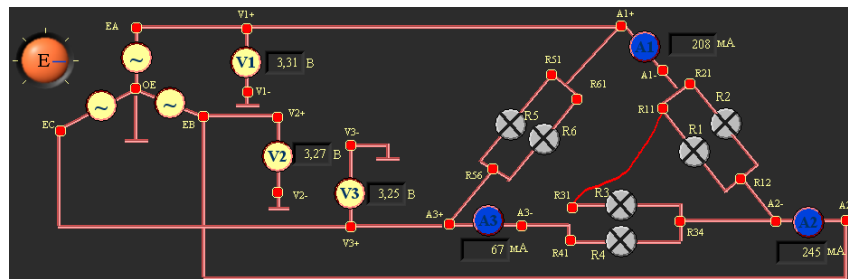


Рисунок 3.28

17. Выберите схему измерения №4 симметричного режима, окно эксперимента как на рисунке 3.29. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите пункты 3-5.

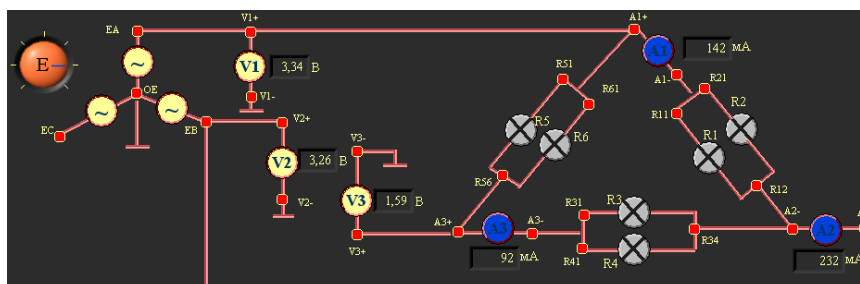


Рисунок 3.29

18. Выберите схему измерения №4 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.30. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено. Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

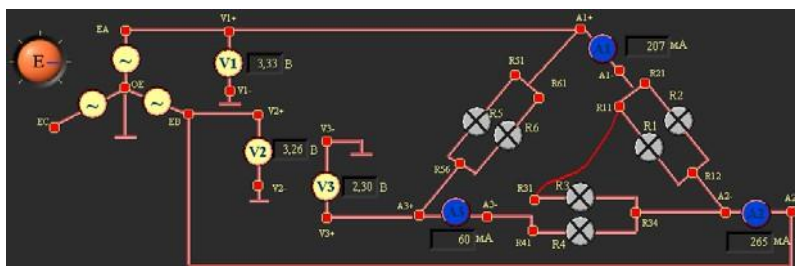


Рисунок 3.30

Обработка экспериментальных данных

Для 1 эксперимента необходимо:

1. По данным 1 эксперимента рассчитайте нагрузочные сопротивления.

Результаты расчетов занести в таблицу 3.1.

2. Определите общую активную мощность всей цепи во всех заданных режимах, активную мощность каждой фазы. Результаты занести в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Результаты исследования режимов трехфазной цепи

№ режима	Сопротивление фаз, Ом			Мощность фаз, Вт			Мощность всей цепи, Вт
	R_A	R_B	R_C	P_A	P_B	P_C	P
1 симметричный							
1 не симметричный							
2 симметричный							
2 не симметричный							
3 симметричный							
3 не симметричный							
4 симметричный							
4 не симметричный							

Для 2 эксперимента необходимо:

1. По данным 2 эксперимента рассчитайте нагрузочные сопротивления.

Результаты расчетов занести в таблицу 3.2.

2. Определите общую активную мощность всей цепи во всех заданных режимах, а также активную мощность каждой фазы. Результаты расчетов занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты исследования режимов трехфазной цепи

№ режима	Сопротивление фаз, Ом			Мощность фаз, Вт			Мощность всей цепи, Вт
	R_{AB}	R_{BC}	R_{CA}	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P
1 симметричный							
1 не симметричный							
2 симметричный							
2 не симметричный							
3 симметричный							
3 не симметричный							
4 симметричный							
4 не симметричный							

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Какие соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении фаз нагрузки по схемам «звезда» и «треугольник»?
2. Изобразите схему соединения потребителей в «треугольник» с указанием положительных направлений фазных и линейных токов. Включить в схему вольтметры для изменения напряжений.
3. Чему равен угол сдвига фаз между фазными и линейными токами при симметричной нагрузке?
4. От каких факторов зависит угол сдвига фаз между фазными напряжениями и токами?
5. Запишите в комплексной форме симметричную трехфазную систему ЭДС?
6. Что такое напряжение смещения нейтрали и как его рассчитывать?
7. Как производится расчет трехфазных электрических цепей в общем случае?
8. Как строятся векторные диаграммы трехфазных электрических цепей?
9. Как влияет «обрыв» линейного провода на работу трехфазного потребителя, включенного по схеме «треугольник».

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная учебная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Серия «Высшее образование». – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Углубленный курс. Учебник для бакалавров. Изд.12, испр., доп., 2014. – 701 с. – ISBN 978-5-9916-3210-2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Исследование характеристик и параметров однофазного трансформатора (4 ч)

Цель работы:

1. Исследование однофазного трансформатора методом холостого хода (опыт ХХ) и короткого замыкания (опыт КЗ).
2. Снятие внешней характеристики трансформатора при различных типах нагрузок.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-10 (владение основами проектирования деталей и конструкций в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных прикладных расчетных и графических программных пакетов), ПК-21 (навыки опытной проверки оборудования и средств технологического обеспечения).

Теоретическое обоснование

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы находят широкое применение для передачи и распределения электрической энергии, в различных технологических целях, для питания различных цепей в радиоэлектронной, вычислительной и телевизионной аппаратуре, устройств связи, автоматики, телемеханики и т.д.

Функционально трансформаторы бывают разных типов: *понижающие напряжение, повышающие* напряжение, изолирующие, согласующие, выходные, и т.д.

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных обмоток (катушек), охваченных общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод из ферромагнитного материала. Различают одно- и трёхфазные трансформаторы.

При подключении первичной обмотки $A - X$ силового трансформатора к сети (рисунок 4.1) первичный ток i_1 , проходя по её виткам w_1 , возбуждает в сердечнике синусоидальный магнитный поток Φ .

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4.1)$$

где Φ_m – амплитуда потока, ω – угловая частота питающего напряжения u_1 .

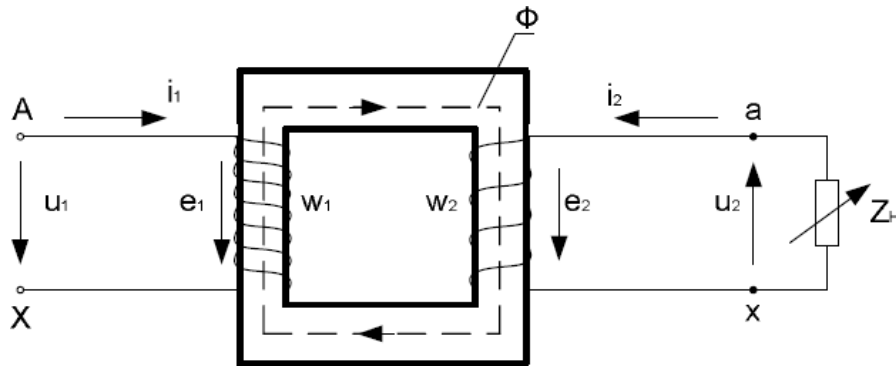


Рисунок 4.1 – Схема двухобмоточного трансформатора

Пронизывая витки w_1 первичной и витки w_2 вторичной обмоток, этот поток наводит в них ЭДС:

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi \cdot \sin(\omega \cdot t)) = -\omega \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (4.2)$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi \cdot \sin(\omega \cdot t)) = -\omega \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (4.3)$$

где Ψ_1 , Ψ_2 – потокосцепление первичной и вторичной обмотки, соответственно.

Действующие значения этих ЭДС:

$$E_1 = \frac{\omega \cdot w_1 \cdot \Phi}{\sqrt{2}} = \pi \sqrt{2} f \cdot w_1 \cdot \Phi = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi, \quad (4.4)$$

$$E_2 = \frac{\omega \cdot w_2 \cdot \Phi}{\sqrt{2}} = \pi \sqrt{2} f \cdot w_2 \cdot \Phi = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi. \quad (4.5)$$

Со вторичной обмотки снимается напряжение u_2 , которое подаётся потребителю электрической энергии Z_H .

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенной нагрузке ($Z_H = \infty$) является его током холостого хода I_0 . Его выражают в процентах по отношению к номинальному току первичной обмотки I_{1H} . Ток холостого хода I_0 (%) в силовых трансформаторах составляет (2...5) %, а в маломощных трансформаторах может составить (10...20) % от номинального тока I_{1H} .

$$I_0 (\%) = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\%.$$

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют коэффициентом трансформации трансформатора

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (4.6)$$

Для определения коэффициента трансформации k , параметров схемы замещения (рисунок 4.2) и потерь мощности в трансформаторе проводят опыты **холостого хода (ХХ)** и **короткого замыкания (КЗ)**.

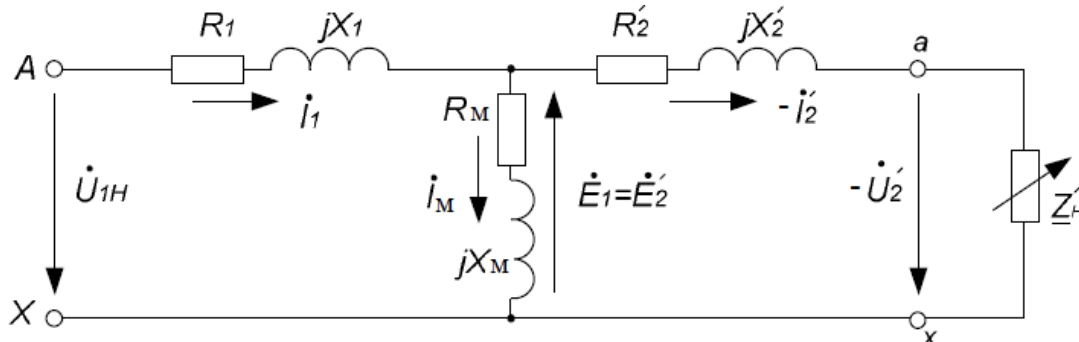


Рисунок 4.2 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

На рисунке 5.2 приняты следующие обозначения: R_1 , X_1 – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки; $R_2' = k^2 \cdot R_2$, $X_2' = k^2 \cdot X_2$, – приведенные к числу витков первичной обмотки активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки; R_M , X_M – активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания; U_1 – первичное напряжение; $U_2' = k \cdot U_2$, $I_2' = I_2 / k$ – приведенные к числу витков первичной обмотки напряжение и ток вторичной обмотки.

Опыт холостого хода. К первичной обмотке с помощью регулятора напряжения (РН) подводят номинальное напряжение $U_0 = U_{1H}$, а ко вторичной – вольтметр (рисунок 4.3).

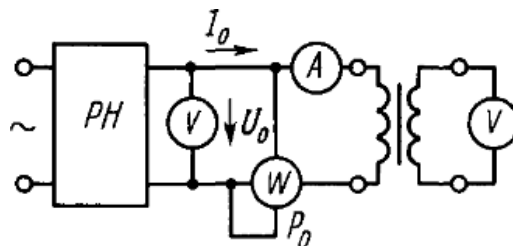


Рисунок 4.3 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

Измерив ток холостого хода I_0 и мощность P_0 можно рассчитать сопротивления:

$$Z_0 = U_{1H} / I_0, R_0 = P_0 / I_0^2, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (4.7)$$

а также коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{1H}}{U_{20}} \quad (4.8)$$

и коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = P_0 / I_0 U_{1H}. \quad (4.9)$$

Схема замещения трансформатора (рисунок 4.4) в режиме холостого хода приводится к виду, представленному на рисунке 4.4.

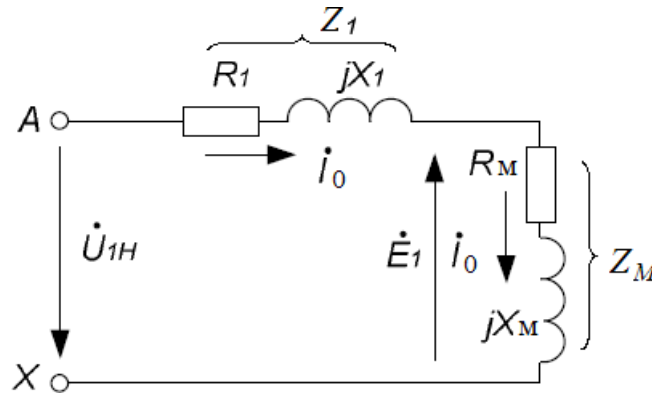


Рисунок 4.4 – Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

При холостом ходе справедливы следующие соотношения:

$$Z_0 = Z_1 + Z_M; R_0 = R_1 + R_M; X_0 = X_1 + X_M. \quad (4.10)$$

Учитывая, что в силовых трансформаторах R_1 и X_1 во много раз меньше R_M и X_M , можно сказать, что

$$Z_0 \approx Z_M; R_0 \approx R_M; X_0 \approx X_M. \quad (4.11)$$

По этой же причине мощность холостого хода трансформатора P_0 равна магнитным потерям в магнитопроводе. Эти потери также называют потерями в стали трансформатора.

Уравнение, описывающее схему замещения трансформатора в режиме холостого хода, имеет вид:

$$U_{1H} = R_1 I_0 + jX_1 I_0 + Z_M I_0 = R_1 I_0 + jX_1 I_0 + (-E_1) = R_0 I_0 + jX_0 I_0. \quad (4.12)$$

Построим соответствующую векторную диаграмму (рисунок 4.5).

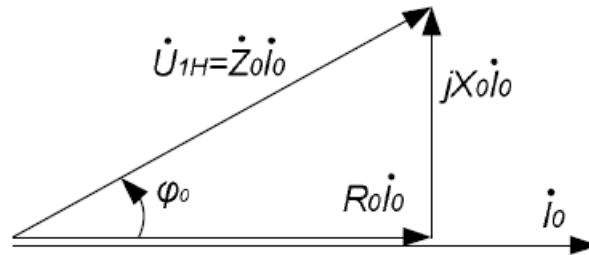


Рисунок 4.5 – Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Опыт короткого замыкания. Вторичные обмотки замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам во избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение $U_1 = U_K$ с таким расчетом, чтобы по обмоткам проходил номинальный ток (рисунок 4.6). В отличие от аварийного короткого замыкания трансформатора, возникающего случайно при работе при напряжении $U_1 = U_{1H}$, такой режим работы совершенно безопасен.

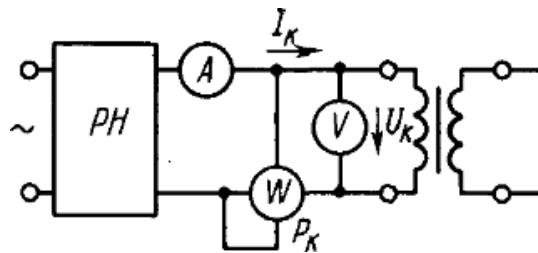


Рисунок 4.6 – Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Номинальные токи в первичной и вторичной обмотках можно определить по формулам:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}}, \quad I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}},$$

где S_H – номинальная мощность трансформатора.

Измерив напряжение U_K , ток I_K и активную мощность P_K , определяют параметры схемы замещения трансформатора при коротком замыкании.

$$Z_K = U_K / I_K, \quad R_K = P_K / I_K^2, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (4.13)$$

В паспорте трансформатора часто указывается величина напряжения короткого замыкания, выраженная в процентах:

$$\Delta U_K (\%) = \frac{U_K}{U_{1H}} 100\%.$$

Согласно схеме замещения (рисунок 4.2):

$$Z_K = Z_1 + \frac{Z_M \cdot Z_2'}{Z_M + Z_2'}. \quad (4.14)$$

Так как Z_M во много раз больше Z_2' , то в знаменателе Z_2' можно пренебречь, тогда

$$Z_K = Z_1 + Z_2'; \quad R_K = R_1 + R_2'; \quad X_K = X_1 + X_2'. \quad (4.15)$$

Обычно принимают

$$Z_1 = Z_2' = 0,5Z_K; \quad R_1 = R_2' = 0,5R_K; \quad X_1 = X_2' = 0,5X_K. \quad (4.16)$$

Таким образом, в режиме короткого замыкания мощность расходуется на электрические потери в обмотках трансформатора, т.е. на нагрев обмоток. Эти потери также называют потерями в меди трансформатора.

Учитывая (4.15) схему замещения трансформатора (рисунок 4.2) в режиме короткого замыкания можно привести к виду, представленному на рисунке 4.7.

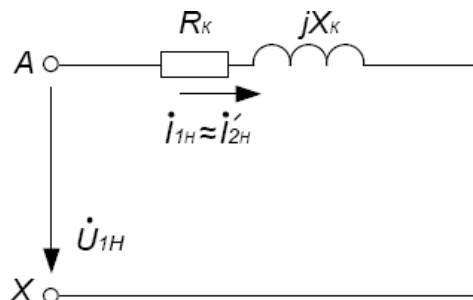


Рисунок 4.7 – Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Согласно схемы замещения (рисунок 4.7) уравнение напряжения в режиме короткого замыкания имеет вид:

$$\dot{U}_K = R_K \dot{I}_K + jX_K \dot{I}_K. \quad (4.17)$$

Соответствующая векторная диаграмма представлена на рисунке 4.8.

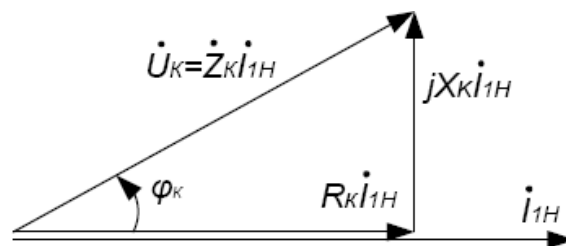


Рисунок 4.8 – Векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания

Полные потери мощности в трансформаторе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P = P_0 + P_K. \quad (4.18)$$

Мощность, передаваемая потребителям P_2 , равна мощности, потребляемой трансформатором из сети P_1 за вычетом потерь ΔP :

$$P_2 = P_1 - \Delta P = P_1 - P_0 - P_K. \quad (4.19)$$

Тогда в номинальном режиме коэффициент полезного действия трансформатора равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_K} 100\%. \quad (4.20)$$

Опыт определения внешней характеристики. К первичной обмотке подводят номинальное напряжение, а ко вторичной – изменяемую нагрузку. Изменяя сопротивление нагрузки, измеряют напряжение и ток вторичной обмотки.

Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока нагрузки, т.е. $U_2 = f(I_2)$, носит название внешней характеристики трансформатора (рисунок 4.9).

Вторичное напряжение равно:

$$U_2 = E'_2 - Z_2 I_2 = E'_2 - (R_2 + jX_2) I_2 \approx U_{20} - Z_2 I_2. \quad (4.21)$$

При увеличении тока нагрузки вторичное напряжение уменьшается как за счет увеличения падения напряжения $Z_2 I_2$ на его вторичной обмотке, так и за счет уменьшения ЭДС E'_2 (вследствие некоторого уменьшения магнитного потока Φ при соответствующем увеличении тока I_1). Однако при активно-емкостной нагрузке при увеличении тока напряжение U_2 увеличивается.

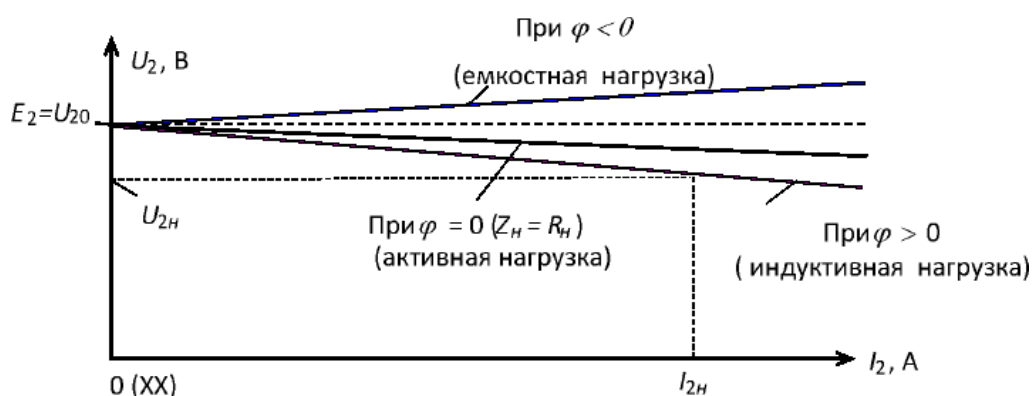


Рисунок 4.9 – Внешние характеристики трансформатора

Оборудование и материалы

Аналогично лабораторной работы 1.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1.

Задания

Включение и подготовка к работе. Включите платформу **NI ELVIS II** при помощи выключателя, расположенного на торце устройства в задней части, рядом с разъемом для подключения кабеля питания (рисунок 1.11).

Затем включите выключатель питания платы (1) (рисунок 1.11), при этом должны загореться зеленый светодиод **PROTOTYPING BOARD POWER** (2) и красный светодиод **Питание** на плате.

Запуск программы и проведение лабораторных работ. Запуск программы осуществляется двойным щелчком по ярлыку Electronics Engineering Board 2 на рабочем столе или через стартовое меню Windows: Пуск -> Electronics Engineering Board 2.

При запуске программы на экран монитора выводится лицевая панель с элементами меню (рисунок 1.14).

Регистрация и вход. Для получения доступа к лабораторным работам пользователь должен зарегистрироваться (выбрать в меню элемент **Регистрация**) или **Войти**.

Нажимаем **Войти**. Для всех персональных компьютеров в появившемся диалоговом окне рисунок 4.10 в строке **Имя пользователя** необходимо написать пкX, где X это № компьютера указанный на мониторе в правом верхнем углу. В строке **Пароль** нужно указать 1111.

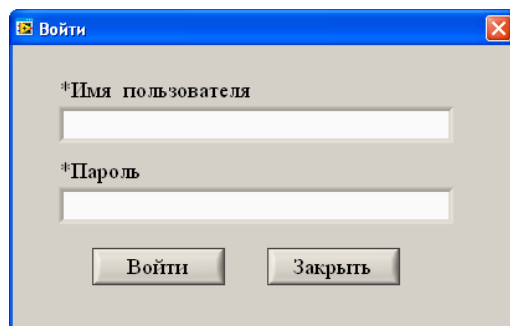


Рисунок 4.10

После входа в программу откроется **главное** меню (рисунок 4.11).
Переход к выбранной лабораторной работе производится двойным щелчком по соответствующей строке меню.

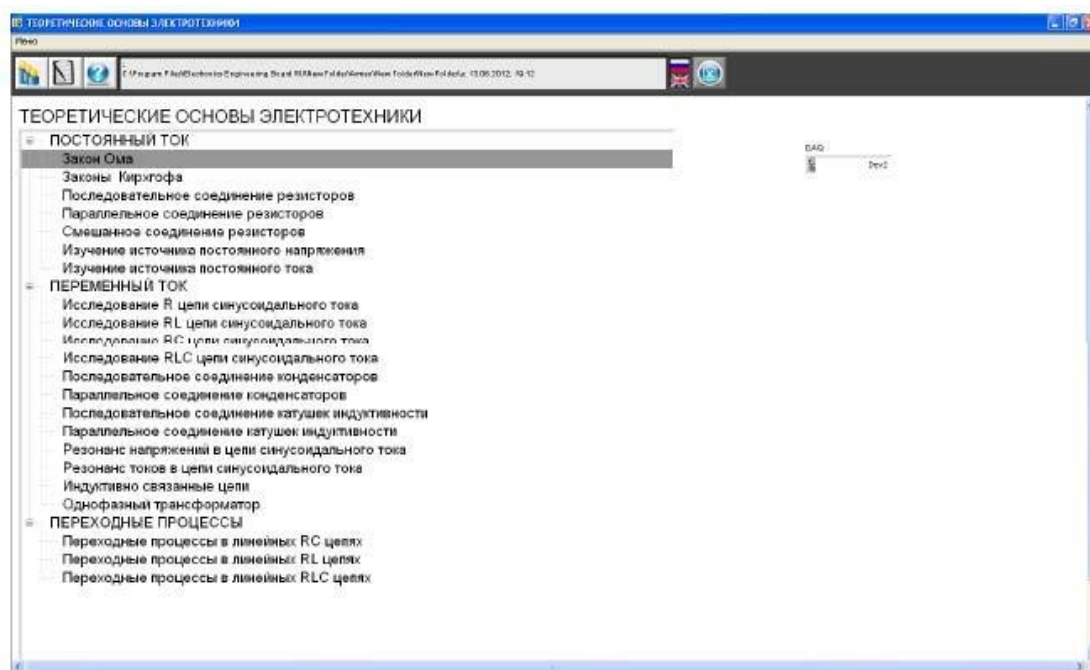


Рисунок 4.11 – Окно главного меню

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, студент должен:

1. Внимательно ознакомиться с требованиями по технике безопасности.
2. Ознакомиться с теоретическими материалами по теме.
4. Изучить методику проведения лабораторных работ.
5. Понимать принципы работы электрических схем.

Лабораторная работа 3 «**Исследование характеристик и параметров однофазного трансформатора**» будет содержать эксперимент «Однофазный трансформатор» из главного меню рисунок 4.11.

1 Эксперимент: «Однофазный трансформатор».

Приборы и компоненты:

1. Индуктивности **L1** и **L2** из набора **Inductors**;
2. Конденсаторы (зона конденсаторов на плате);
3. Сопротивления из набора **Resistors**;
4. Источник синусоидального напряжения (функциональный генератор $\sim E$);
5. Вольтметры (**V1**, **V2**);
6. Амперметры (**A1**, **A2**).

Подготовка к проведению эксперимента «Однофазный трансформатор».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **О** (выключен).

3. Из главного меню (рисунок 4.11) двойным щелчком выберите эксперимент «Однофазный трансформатор». Нажмите кнопку *Следующий* (>>) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 4.12).

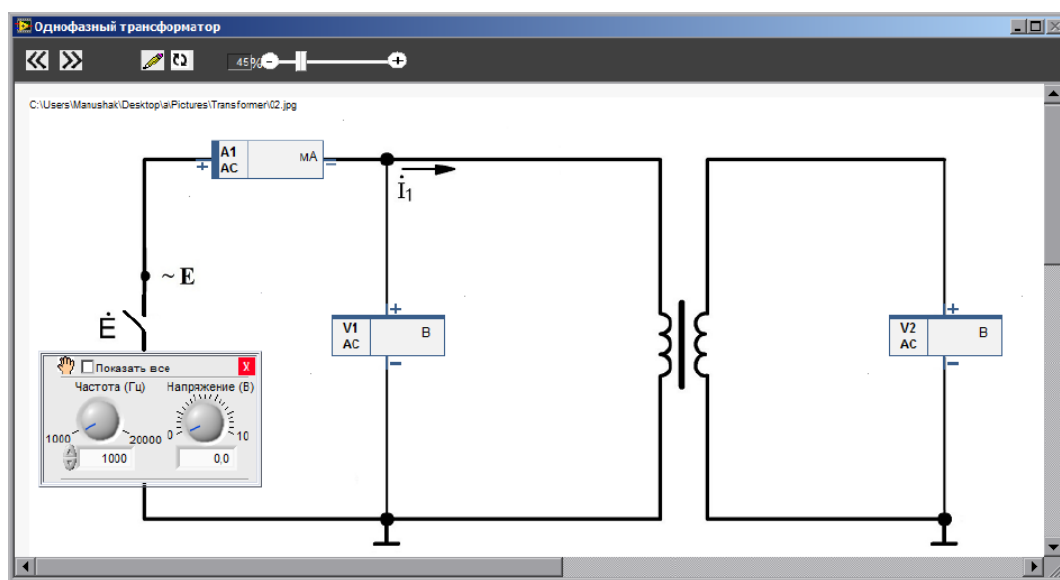


Рисунок 4.12 – Схема электрической цепи опыта холостого хода

4. Соберите на макетной плате электрическую цепь в соответствии со схемой на рисунке 4.12.

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Однофазный трансформатор».

1. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **И** (включен). Загорятся светодиод **Питание** на плате и индикатор включения питания на панели **NI ELVIS II**.

2. Чтобы начать измерения нажмите на панели управления кнопку (1) **Старт/Стоп**, затем поставьте галочку в поле (3) **Смещ. 0**.

3. Установите номиналы напряжения (поле **Напряжение**) и частоту (поле **Частота**) источника из таблицы 4.1. *Примечание.* При включенном свойстве измерителя **PP** (размах синусоиды) амплитуда измеряемого сигнала равна половине отображаемого на индикаторе значения.

Таблица 4.1 – Варианты (*N*) параметров элементов для эксперимента

$U_{1\text{ном.}}$	[В]	3,00
$U_{2\text{ном.}}$	[В]	0.7
$I_{1\text{ном.}}$	[мА]	4.2
$I_{2\text{ном.}}$	[мА]	16.8
$f_{\text{ном.}}$	[кГц]	10
R (нагр.)	[Ом]	20 ÷ 100
L (нагр.)	[мГн]	0.47
C (нагр.)	[мкФ]	1

4. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение.

5. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение.

6. Вращая ручку **Напряжение**, опустите напряжение источника до нуля.

7. Нажмите кнопку **Следующий** на рабочем поле и видоизмените цепь на плате в соответствии с новой схемой (рисунок 4.13). Теперь, вторичная обмотка трансформатора – замкнута накоротко.

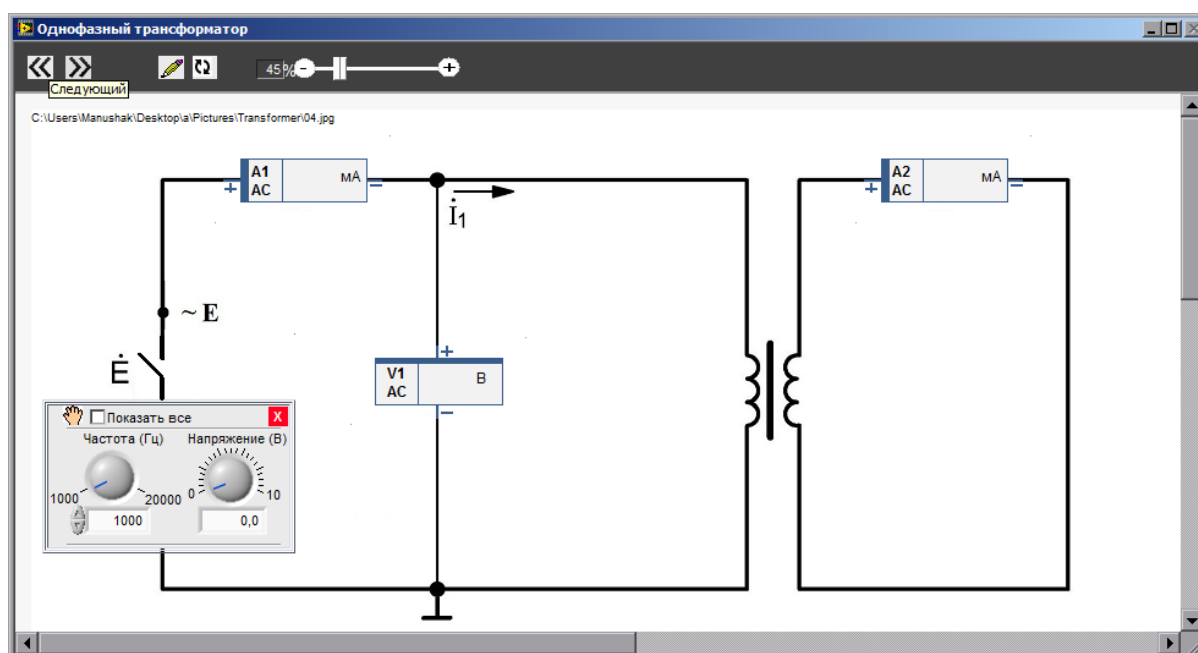


Рисунок 4.13 – Опыт короткого замыкания

8. Вращая ручку **Напряжение**, медленно поднимайте напряжение источника до тех пор, пока ток вторичной обмотки не достигнет номинального значения (таблица 4.1) и нажмите **Запись**.

9. Вращая ручку **Напряжение**, спустите напряжение источника до нуля.

10. Нажмите кнопку **Следующий** на рабочем поле и видоизмените цепь на плате в соответствии с новой схемой (рисунок 4.14). Теперь в цепь вторичной обмотки трансформатора включено переменное активное сопротивление (**x10 Ом**).

11. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

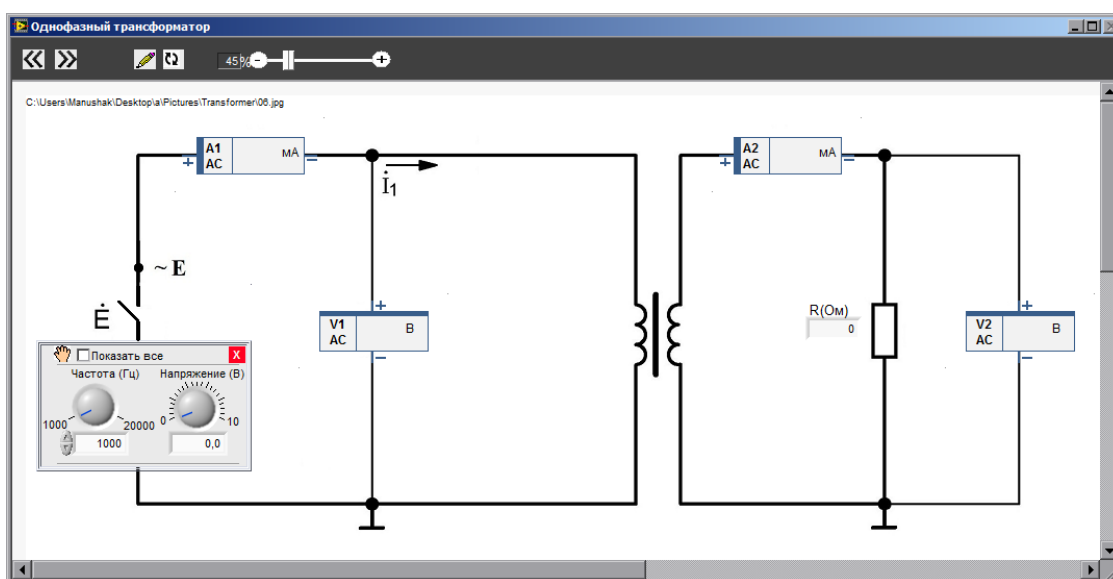


Рисунок 4.14 – Работа трансформатора на активную нагрузку

12. Установите номинальное напряжение (поле **Напряжение**) и частоту (поле **Частота**) источника из таблицы 4.1.

13. Разомкните один из контактов сопротивления и, нажав **Запись**, снимите точку холостого хода.

14. Верните контакт сопротивления на место и, вращая ручку **x10 Ом** на плате, пошагово устанавливайте ток вторичной обмотки от нуля до, примерно $1.25 \times I_{2\text{ном}}$ (4-5 точек). Нажимайте **Запись** на каждом шаге.

Внимание! В данной лабораторной работе, здесь и далее, при каждом изменении сопротивления нагрузки, перед тем как нажать **Запись**, вращая ручку $\sim E$ и сверяясь с вольтметром **V1**, восстанавливайте номинальное напряжение на первичной обмотке.

15. По окончании, нажмите кнопку *Следующий* (>>), изображение на экране должно соответствовать рисунку 4.15.

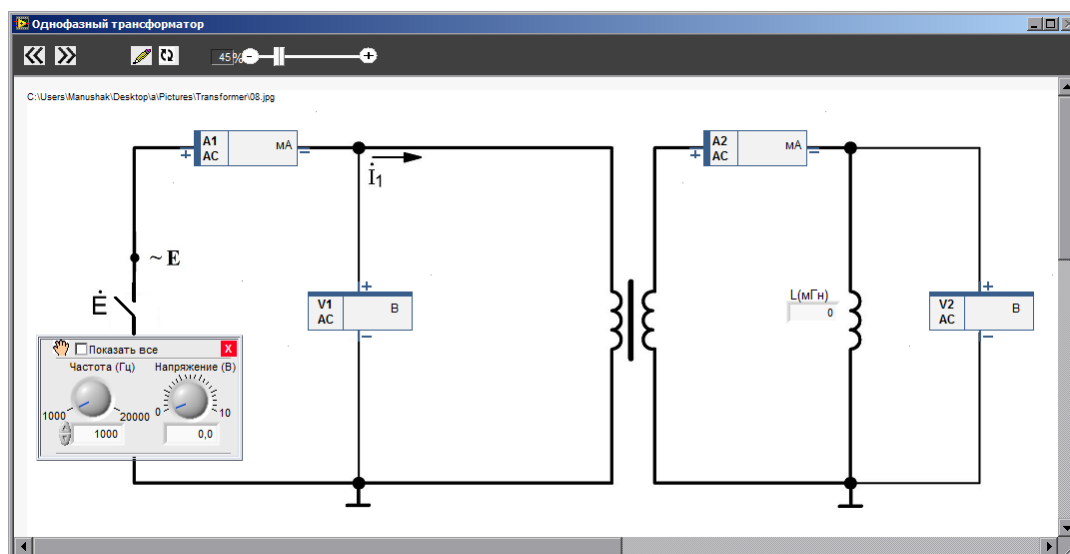


Рисунок 4.15 – Работа трансформатора на индуктивную нагрузку

16. Замените сопротивление в цепи вторичной обмотки трансформатора на индуктивность (зона индуктивностей на плате), в соответствии с таблицей 4.1, нажмите **Новый график**, затем – **Запись**.

17. По окончании, нажмите кнопку *Следующий* (>>), изображение на экране должно соответствовать рисунку 4.16.

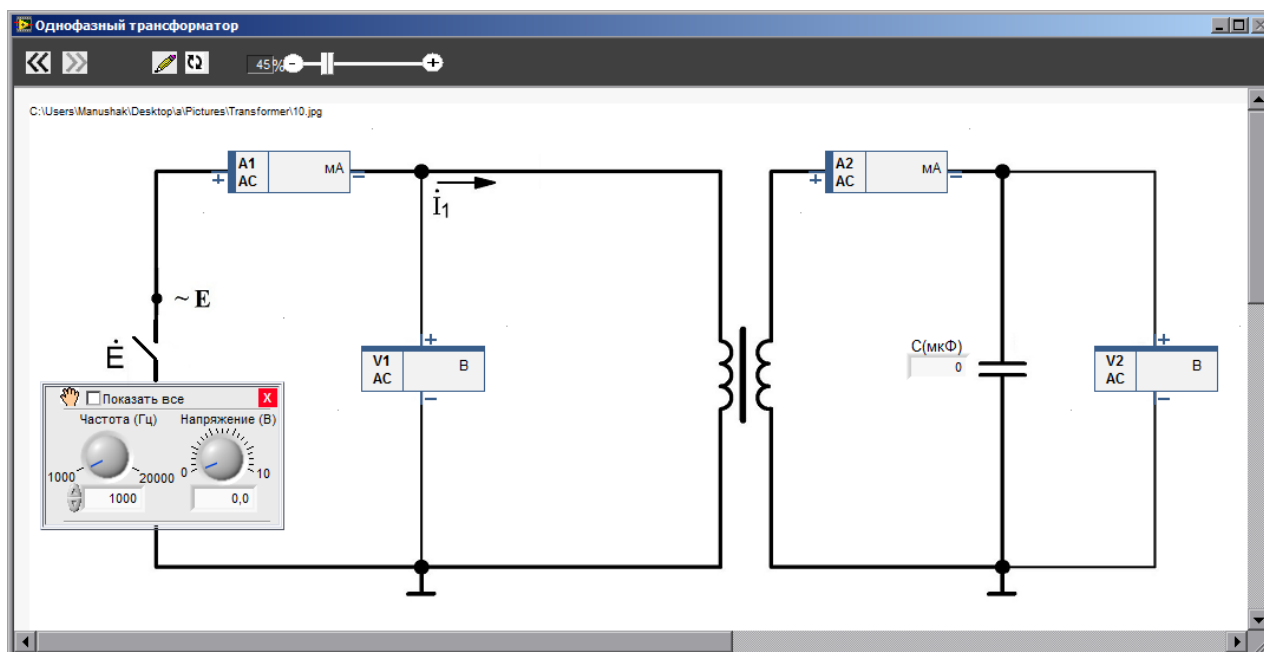


Рисунок 4.16 – Работа трансформатора на емкостную нагрузку

18. Замените индуктивность в цепи вторичной обмотки трансформатора на емкость (из набора **Capacitors**), в соответствии с таблице 4.1, нажмите

Новый график, затем – Запись.

19. По окончании, вызовите файл MS Excel, сохраните и нажмите Стоп.

Обработка экспериментальных данных

Для эксперимента «Однофазный трансформатор» необходимо:

1. На основе полученных в результате опытов ХХ и КЗ данных, рассчитайте параметры трансформатора и заполните оставшиеся поля таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты

N. Описание	Установить				Измерить					Рассчитать				
	R(нагр.)	V1	A1	f	V1	V2	A1	A2	$\varphi_u - \varphi_i$	n	cosφ	P	R	X
	[Ом]	[В]	[мА]	[кГц]	[В]	[В]	[мА]	[мА]	градус	-	-	[Вт]	[Ом]	[Ом]
1. Холостой ход														
2. Короткое замыкание														
3. Активная нагрузка 1.														
2.														
3.														
4.														
5.														
4. Индуктивная нагрузка														
5. Емкостная нагрузка														

Формулы для расчета. Коэффициент трансформации: $k = \frac{U_{10}}{U_{20}}$. Полная,

активная и реактивная мощности холостого хода: $S_0 = U_{10} \cdot I_0$, $P_0 = S_0 \cdot \cos \varphi_0$,

$Q_0 = S_0 \cdot \sin \varphi_0$. Активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки:
 $R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$, $X_0 = \frac{Q_0}{I_0^2}$. Полная, активная и реактивная мощности короткого

замыкания: $S_K = U_K \cdot I_{1K}$, $P_K = S_K \cdot \cos \varphi_K$, $Q_K = S_K \cdot \sin \varphi_K$. Суммарное

активное сопротивление первичной и вторичной обмоток: $R_K = R_1 + R_2 = \frac{P_K}{I_K^2}$,

$X_K = X_1 + X_2 = \frac{Q_K}{I_K^2}$.

2. Построить внешние характеристики трансформатора при различном характере нагрузки.

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Назначение и принцип действия трансформатора?
2. Изобразите схему замещения однофазного трансформатора.

3. Почему магнитный поток трансформатора практически не зависит от нагрузки?
4. Каково выражение действующих ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора?
5. Какие величины определяются в опытах холостого хода и короткого замыкания?
6. Как опытным путем определить коэффициент трансформации?
7. Изобразите векторную диаграмму трансформатора в режиме холостого хода?
8. Изобразите векторную диаграмму трансформатора в нагрузочном режиме?
9. Назовите области применения трансформаторов напряжения и тока?
10. Что произойдет с обмоткой и магнитопроводом трансформатора, если при разомкнутой вторичной обмотке его первичную обмотку включить на напряжение 220 В, вместо номинального 127 В?
11. При какой нагрузке внешняя характеристика трансформатора возрастает? Объясните почему?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная учебная литература

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Кононенко [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – Изд. 6-е – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 784 с. (Серия «Высшее образование». – ISBN 978-5-222-17568-2.

Дополнительная литература

1. Вольдек, А. И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. [и др.]: Питер, 2008. – 349 с. – (Учебник для вузов) – ISBN 978-5-469-01381-5.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по организации самостоятельной работы**

Введение

1. Самостоятельная работа как важнейшая форма учебного процесса
2. Цели и основные задачи самостоятельной работы
3. Виды самостоятельной работы
4. Организация самостоятельной работы
5. Общие рекомендации по организации самостоятельной работы
6. Методические рекомендации для студентов по отдельным формам самостоятельной работы
7. Критерии оценки самостоятельной работы

Основная задача высшего образования заключается в формировании творческой личности профессионала, способного к саморазвитию, самообразованию и инновационной деятельности.

Успешное усвоение дисциплин по различным образовательным программам предполагает активное, творческое участие обучающегося на всех этапах ее освоения путем планомерной, повседневной не только аудиторной, но и самостоятельной работы.

Самостоятельная работа студентов является одной из важнейших составляющих образовательного процесса. Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения обучающимися новых знаний, умений без непосредственного участия преподавателя, характеризующийся предметной направленностью, эффективным контролем и оценкой результатов деятельности обучающегося.

Объем самостоятельной работы (в часах) определен учебным планом.

Методические указания по организации самостоятельной работы студентов (далее – СРС) являются обязательной частью учебно-методических комплексов учебных дисциплин.

Методические указания по организации самостоятельной работы для студентов, наряду с методическими указаниями по выполнению лабораторных работ, практических занятий и работе с лекционным материалом; по формам текущего, промежуточного и итогового контроля; по выполнению курсовых работ/проектов, расчетно-графических работ, контрольных работ; по подготовке и защите выпускных квалификационных работ, составляют единый комплекс методического обеспечения УМК каждой учебной дисциплины.

Цель методических указаний СРС – определить роль и место самостоятельной работы студентов в учебном процессе; конкретизировать ее уровни, формы и виды; обобщить методы и приемы выполнения определенных типов учебных заданий; объяснить критерии оценивания.

1. Самостоятельная работа как важнейшая форма учебного процесса

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа обучающихся, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой обучающихся).

Самостоятельная работа обучающихся является важным видом учебной и научной деятельности. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРО должна стать эффективной и целенаправленной работой.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи высшего образования – «подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности».

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы обучающихся над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста обучающихся, воспитание творческой активности и инициативы.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие обучающихся в практических занятиях, лабораторных работах, выполнении контрольных и расчетно-графических работ, написание курсовых работ (проектов) и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа обучающихся играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. Они включают в себя:

- изучение и систематизацию официальных государственных документов - законов, постановлений, указов, нормативно-инструкционных и справочных материалов с использованием информационно-поисковых систем «Консультант-плюс», «Гарант», глобальной сети «Интернет»;

- изучение учебной, научной и методической литературы, материалов периодических изданий с привлечением электронных средств официальной, статистической, периодической и научной информации;

- подготовку докладов и рефератов, написание выпускных квалификационных работ;

- участие в работе студенческих конференций, комплексных научных исследованиях.

Самостоятельная работа приобщает студентов к научному творчеству, поиску и решению актуальных современных проблем.

2. Цели и основные задачи самостоятельной работы

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для деятельности.

Цели самостоятельной работы:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений;

- углубление и расширение теоретических знаний;

- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;

- развитие познавательных способностей, активности обучающихся, творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;

- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;

- развитие исследовательских умений.

Основными задачами СРМ являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;

- углубление и расширение теоретических знаний;

- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;

- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;

- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;

- развитие исследовательских умений;

- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовых и выпускной квалификационной работ, для эффективной подготовки к промежуточной аттестации - зачетам и экзаменам.

3. Виды самостоятельной работы

Самостоятельная работа студент включает:

- самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы;

- подготовка к лекциям;

- подготовка к практическим занятиям;

- подготовка к лабораторным работам;

- написание рефератов;

- выполнение контрольной работы;

- выполнение курсовой работы (проекта);

- выполнение расчетно-графической работы;

- подготовка исследовательской работы (написание статьи, доклада);

- подготовка выпускной квалификационной работы;

- подготовка к текущей и промежуточной аттестации;

- подготовка к государственной итоговой аттестации.

Для выполнения самостоятельной работы студентам необходимо ознакомиться с содержанием рабочей программы дисциплины, с целями и задачами дисциплины, ее связями с другими дисциплинами образовательной программы, методическими разработками по данной дисциплине, с графиком консультаций преподавателей кафедры, с перечнем ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

4. Организация самостоятельной работы

Самостоятельная работа студента – способ активного, целенаправленного приобретения новых знаний и умений без непосредственного участия в этом процессе преподавателей.

Организационные мероприятия, обеспечивающие развитие навыков самостоятельной работы студентов, воспитание их творческой активности и инициативы, а также, в целом, обеспечивающие нормальное функционирование самостоятельной работы студентов, должны основываться на следующих предпосылках:

- самостоятельная работа должна быть конкретной по своей предметной направленности;
- самостоятельная работа должна сопровождаться эффективным, непрерывным контролем и оценкой ее результатов.

Предметно и содержательно самостоятельная работа определяется федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки, основной образовательной программой, учебным планом, рабочими программами дисциплин.

Контроль самостоятельной работы и оценка ее результатов организуются как единство двух форм:

- самоконтроль и самооценка;
- внешний контроль и оценка со стороны преподавателей, государственных экзаменационных комиссий и др.

5. Общие рекомендации по организации самостоятельной работы

Организация самостоятельной работы студентов направлена на решение следующих задач:

- а) закрепление, обобщение и повторение пройденного учебного материала; применение полученных знаний в традиционных педагогических ситуациях и при решении задач высокого уровня неопределенности;
- б) совершенствование умений и навыков по изучаемой дисциплине; формирование межпредметных, общеучебных, исследовательских умений;
- в) активизация учебной и научно-исследовательской деятельности обучающихся, ее максимальная индивидуализация с учетом индивидуальных особенностей и академической успеваемости студентов;
- г) формирование готовности студентов к самообразованию в течение всей жизни.

Видами занятий для самостоятельной работы могут быть:

Для овладения знаниями:

- чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, конспектов лекций);
- составление плана текста, графическое изображение структуры текста;
- конспектирование текста; выписки из текста, работа со словарями и справочниками, ознакомление с нормативными документами;
- учебно-исследовательская работа, использование аудио и видеозаписей, компьютерной техники, интернета и др.

Для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекций, повторная работа над материалом;
- составление плана и тезисов ответа;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- ответы на контрольные вопросы;
- аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, контент-анализ);

- подготовка сообщения для выступления на конференции;
- подготовка рефератов, докладов;
- составление библиографии.

Для формирования умений:

- выполнение контрольных работ;
- выполнение чертежей, схем, расчетно-графических работ;
- проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности.

- подготовка курсовых и дипломных работ (проектов);

Для формирования компетенций:

- принятие решений по конкретной ситуации;
- грамотная формулировка задания для исполнения;
- организация контроля по сферам деятельности.

6. Методические рекомендации для студентов по отдельным формам самостоятельной работы

Система вузовского обучения подразумевает значительную самостоятельность студентов в планировании и организации своей деятельности.

6.1 Самостоятельное изучение основной и дополнительной литературы

Работа с литературой является основным методом самостоятельного овладения знаниями. Это сложный процесс, требующий выработки определенных навыков, поэтому студенту нужно обязательно научиться работать с книгой.

Осмысление литературы требует системного подхода к освоению материала. В работе с литературой системный подход предусматривает не только тщательное (иногда многократное) чтение текста и изучение специальной литературы, но и обращение к дополнительным источникам – справочникам, энциклопедиям, словарям. Эти источники – важное подспорье в самостоятельной работе студента, поскольку глубокое изучение именно их материалов позволит студенту уверенно «распознавать», а затем самостоятельно оперировать теоретическими категориями и понятиями, следовательно – освоить новейшую научную терминологию. Такого рода работа с литературой обеспечивает решение студентом поставленной перед ним задачи (подготовка к практическому занятию, выполнение контрольной работы и т.д.).

Выбор литературы для изучения делается обычно по предварительному списку литературы, который выдал преподаватель, либо путем самостоятельного отбора материалов. После этого непосредственно начинается изучение материала, изложенного в книге.

Наиболее надежный способ собрать нужный материал – составить план или конспект. *Конспект, план-конспект* – это последовательная фиксация отобранной и обдуманной в процессе чтения информации.

Цель – зафиксировать, переработать тот или иной научный текст. Они позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

План – это «скелет» текста, он компактно отражает последовательность изложения материала. План как форма записи обычно более подробно передает содержание частей текста, чем оглавление книги или подзаголовки статей. Самые важные места в книге отмечайте, используя для этого легко стирающийся карандаш или вкладные листки. Запись любых планов следует делать так, чтобы ее легко можно было охватить одним взглядом.

Вся рекомендуемая для изучения курса литература подразделяется на основную и дополнительную. К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия). Необходимость изучения дополнительной литературы диктуется прежде всего тем, что в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражение новые документы, события, явления, научные открытия последних лет. Поэтому дополнительная литература рекомендуется для более углубленного изучения программного материала.

6.2 Подготовка к лекциям и работа с конспектом лекций

При подготовке к лекции студенты должны предварительно ознакомиться с учебным материалом по данной теме и при конспектировании лекции акцентировать внимание на новых

теоретических положениях, правовых и иных данных, не нашедших отражения в учебной литературе.

Лекция имеет цель – систематизация основы научных знаний по дисциплине, сконцентрировать внимание обучающихся на наиболее актуальных проблемах.

В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные, наиболее сложные понятия темы, а также связанные с ней теоретические и практические проблемы. Дает рекомендации на практические занятия и указания на самостоятельную работу.

Предварительное не углубленное знакомство с материалом очередной лекции дает многое. Студенты получают общее представление о ее содержании и структуре, о главных и второстепенных вопросах, о терминах и определениях. Все это облегчает работу на лекции и делает ее целеустремленной.

Основные моменты лекционных занятий конспектируются. Отдельные темы предлагаются для самостоятельного изучения с обязательным составлением конспекта.

Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим обучающимся.

Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях.

Самостоятельную работу следует начинать с доработки конспекта, желательно в тот же день, пока время не стерло содержание лекции из памяти. С целью доработки необходимо в первую очередь прочитать записи, восстановить текст в памяти, а также исправить опiski, расшифровать не принятые ранее сокращения, заполнить пропущенные места, понять текст, вникнуть в его смысл. Далее прочитать материал по рекомендуемой литературе, разрешая в ходе чтения, возникшие ранее затруднения, вопросы, а также дополнения и исправляя свои записи. Записи должны быть наглядными, для чего следует применять различные способы выделений. В ходе доработки конспекта углубляются, расширяются и закрепляются знания, а также дополняется, исправляется и совершенствуется конспект.

Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

6.3 Подготовка к практическим занятиям

Целью практических занятий является получение базовых навыков по применению теоретических знаний. Это необходимо при решении всевозможных задач на различных этапах практической деятельности.

Задачи подготовки и проведения практических занятий:

- закрепление и углубление знаний;
- создание практических навыков и умений в практической деятельности и повседневной жизни для: поиска, первичного анализа и использования информации;
- анализа конкретных ситуаций и условий их реализации;
- изложения и аргументации собственных суждений по практической ситуации;
- развитие стремления и способности к самостоятельному исследованию изучаемых реальностей, их критической оценки.

Подготовка к практическим занятиям включает: изучение нормативных актов, учебной литературы, лекционного материала; подготовка рефератов.

Практические занятия по дисциплине проводятся в форме различных дискуссий (семинарских занятий) и (или) анализа конкретных ситуаций (выполнение практических заданий).

6.4 Подготовка к лабораторным работам

Лабораторные работы составляют важную часть теоретической и профессиональной практической подготовки студентов. Они направлены на формирование учебных и профессиональных практических умений.

На лабораторных занятиях задания выполняются по материалам согласно плану.

До начала лабораторных занятий обучающиеся должны пройти инструктаж по технике безопасности.

Перед выполнением лабораторной работы обучающийся должен изучить теоретический материал по теме лабораторной работы по основной и дополнительной литературе, ознакомиться с

ресурсами информационно - телекоммуникационной сети «Интернет». При этом обучающийся должен учесть рекомендации преподавателя и требования учебной программы.

В ходе подготовки к лабораторным занятиям необходимо ознакомиться с методическими указаниями; с порядком ее выполнения; освоить основные понятия; изучить алгоритмы; методы и технологии, необходимые для реализации этих алгоритмов; ответить на контрольные вопросы.

После выполнения работы производится обработка полученных результатов, составляется и защищается отчет. Без защиты отчета студент, как правило, не допускается к очередной работе.

6.5 Написание рефератов

Реферат представляет собой краткое изложение в письменной форме содержания научного труда по определенной теме, возможно выходящего за рамки учебной программы, а также изложение книги, статьи, исследования. Иными словами, реферат – это индивидуальная научная работа, раскрывающая содержание исследуемой проблемы с различных позиций и точек зрения, с формированием самостоятельных выводов.

Целью написания реферата является сообщение определенной информации для развития навыков научно-исследовательской работы.

В процессе подготовки реферата, обучающиеся, глубже постигают вопросы изучаемого предмета, поскольку:

- анализируются различные точки зрения, факты и события;
- ведется научно обоснованная полемика;
- обобщается материал;
- лаконично излагаются мысли;
- правильно оформляется работа с составлением плана, библиографии и систематизацией информации.

Подготовка реферата включает в себя:

- выбор и формулирование темы, которая должна обладать новизной, актуальностью и оригинальностью;
- подбор литературы и изучение основных источников;
- составление содержания, раскрывающего название работы;
- выписки из литературных источников с целью накопления теоретического и практического материала;
- написание реферата и его оформление;
- составление списка использованной литературы.

6.6 Выполнение контрольной работы

Контрольная работа является одной из составляющих учебной деятельности студента по овладению знаниями в области теплогазоснабжения и вентиляции. К ее выполнению необходимо приступить только после изучения тем дисциплины.

Целью контрольной работы является определения качества усвоения лекционного материала и части дисциплины, предназначенной для самостоятельного изучения.

Задачи, стоящие перед студентом при подготовке и написании контрольной работы:

1. закрепление полученных ранее теоретических знаний;
2. выработка навыков самостоятельной работы;
3. выяснение подготовленности студента к будущей практической работе.

Преподаватель готовит задания либо по вариантам, либо индивидуально для каждого студента. По содержанию работа может включать теоретический материал, задачи, тесты, расчеты и т.п. выполнению контрольной работы предшествует инструктаж преподавателя.

Ключевым требованием при подготовке контрольной работы выступает творческий подход, умение обрабатывать и анализировать информацию, делать самостоятельные выводы, обосновывать целесообразность и эффективность предлагаемых рекомендаций и решений проблем, чётко и логично излагать свои мысли. Подготовка контрольной работы следует начинать с повторения соответствующего раздела учебника, учебных пособий по данной теме и конспектов лекций.

6.7 Выполнение курсовой работы (проекта)

Курсовая работа (проект) - это самостоятельное исследование обучающимся определенной проблемы, комплекса взаимосвязанных вопросов, касающихся конкретной профессиональной ситуации.

Курсовая работа (проект) не должна составляться из фрагментов статей, монографий, пособий. Кроме простого изложения фактов и цитат, в курсовой работе (проекте) должно проявляться авторское видение проблемы и ее решения.

Рассмотрим основные этапы подготовки курсовой работы (проекта).

Выполнение курсовой работы (проекта) начинается с выбора темы.

Затем студент приходит на первую консультацию к руководителю, которая предусматривает:

- обсуждение цели и задач работы, основных моментов избранной темы;
- консультирование по вопросам подбора литературы;
- составление предварительного плана;
- составление графика выполнения курсовой работы (проекта).

Следующим этапом является работа с литературой. Необходимая литература подбирается студентом самостоятельно.

После подбора литературы целесообразно сделать рабочий вариант плана работы. В нем нужно выделить основные вопросы темы и параграфы, раскрывающие их содержание.

Составленный список литературы и предварительный вариант плана уточняются, согласуются на очередной консультации с руководителем.

Затем начинается следующий этап работы - изучение литературы. Только внимательно читая и конспектируя литературу, можно разобраться в основных вопросах темы и подготовиться к самостоятельному (авторскому) изложению содержания курсовой работы (проекта). Конспектируя первоисточники, необходимо отразить основную идею автора и его позицию по исследуемому вопросу, выявить проблемы и наметить задачи для дальнейшего изучения данных проблем.

Систематизация и анализ изученной литературы по проблеме исследования позволяют написать первую (теоретическую) главу.

Выполнение курсовой работы (проекта) предполагает проведение определенного исследования. На основе разработанного плана обучающийся осуществляет сбор фактического материала, необходимых цифровых данных. Затем полученные результаты подвергаются анализу, статистической, математической обработке и представляются в виде текстового описания, таблиц, графиков, диаграмм. Программа исследования и анализ полученных результатов составляют содержание второй (аналитической) главы.

В третьей (рекомендательной) части должны быть отражены мероприятия, рекомендации по рассматриваемым проблемам.

Рабочий вариант текста курсовой работы (проекта) предоставляется руководителю на проверку. На основе рабочего варианта текста руководитель вместе со студентом обсуждает возможности доработки текста, его оформление. После доработки курсовая работа (проект) сдается на кафедру для ее оценивания руководителем.

Защита курсовой работы (проекта) обучающихся проходит в сроки, установленные графиком учебного процесса.

При подготовке к защите курсовой работы (проекта) обучающийся должен знать основные положения работы, выявленные проблемы и мероприятия по их устранению, перспективы развития рассматриваемой экономической ситуации.

Защита курсовой работы (проекта) проводится на кафедре при наличии у обучающегося курсовой работы (проекта). Оценка - дифференцирована. Преподаватель оценивает защиту курсовой работы (проекта) и заполняет графу "оценка" в ведомости и в зачетной книжке.

Не допускаются к защите варианты курсовых работ (проектов), найденные в Интернет, сканированные варианты учебников и учебных пособий, а также копии ранее написанных работ.

6.8 Выполнение расчетно-графической работы

Расчетно-графическая работа является важным элементом учебного процесса, предусмотрена учебным планом.

Цель расчетно-графической работы – систематизация и закрепление теоретических знаний, и развитие практических навыков по решению задач в области теплогазоснабжения и вентиляции, выработка навыков анализа данных и формулирования выводов по полученным результатам.

Задачами расчетно-графической работы являются:

- развитие навыков самостоятельной работы в области решения практических задач;

- подбор и систематизация теоретического материала, являющегося основой для решения практической задачи, развитие навыков самостоятельной работы с учебной и методической литературой;

- проведение расчетов показателей по исходным данным и анализ полученных значений;

- формулирование выводов по полученным результатам.

Выполнение расчетно-графической работы проводится студентом по конкретному варианту задания, который необходимо уточнить у преподавателя.

Содержанием расчетно-графической работы является краткое изложение теоретического материала к каждой задаче, решение задачи по индивидуальному варианту, включающее в себя расчет основных показателей, анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Расчетно-графическая работа должна содержать:

1. Титульный лист.

2. Условие задачи.

3. Теоретическая часть по каждой задаче (1-3 страницы).

4. Практическая часть и выводы по каждой задаче.

5. Библиографический список (не менее 5 источников).

Условие задачи оформляется по центру заголовком «Задача №».

Текст условия задачи должен совпадать с текстом в методических указаниях, включая таблицы, при их наличии.

Далее излагается теоретический материал, лежащий в основе решения задачи, включающий в себя основные определения, формулы расчетов показателей и др.

В практической части излагается подробное решение задачи. При необходимости результаты оформляются в виде сводной таблицы.

К каждой задаче необходимо сформулировать выводы, проанализировав полученные результаты.

Расчетно-графическая работа должна выполняться в соответствии с установленным графиком. В процессе выполнения расчетно-графической работы допускаются консультации у преподавателя на практических занятиях.

Выполнение основных этапов контролируется преподавателем и учитывается при проведении текущего контроля по дисциплине и при оценке расчетно-графической работы.

6.9 Подготовка исследовательской работы (написание статьи, научного доклада)

Научный доклад представляет собой исследование по конкретной проблеме, изложенное перед аудиторией слушателей. Работа по подготовке научного доклада включает не только знакомство с литературой по избранной тематике, но и самостоятельное изучение определенных вопросов.

Научный доклад может быть подготовлен для выступления на семинарском занятии, конференции научного общества, или в рамках круглого стола. В любом случае успешное выступление во многом зависит от правильной организации самого процесса подготовки научного доклада.

Подготовка научного доклада включает несколько этапов работы:

- выбор темы доклада;

- подготовка материалов;

- работа над текстом доклада;

- подготовка к выступлению.

Подготовка к научному докладу начинается с выбора темы Вашего будущего выступления.

Не следует выбирать слишком широкую тему научного доклада. Это связано с ограниченностью докладчика во времени. Доклад должен быть рассчитан на 7-15 минут.

Работа по подбору материалов для доклада связана с изучением соответствующей тематики литературы.

В процессе работы над текстом доклада обучающиеся глубже постигают вопросы изучаемого предмета, поскольку:

- анализируются различные точки зрения, факты и события; ведется научно обоснованная полемика;

- обобщается материал; лаконично излагаются мысли;

- правильно оформляется работа с составлением плана, библиографии и систематизацией информации.

Текст научного доклада должен включать три основные части:

- введение – краткое знакомство слушателей с обсуждаемой в докладе проблемой;
- основную часть – логическое продолжение вопросов, обозначенных автором во введении.

В этой части доклада раскрывается тема выступления, приводятся необходимые доказательства (аргументы);

- заключение – обобщение основной мысли и идеи выступления. В заключении можно кратко повторить основные выводы и утверждения, прозвучавшие в основной части доклада.

Научный доклад представляет собой устное произведение и чтение вслух подготовленного текста недопустимо.

К секретам хорошего выступления можно отнести следующие моменты:

- до и после важных мыслей следует делать паузу;
- для большего акцента сказанного необходимо менять тон голоса и тембр речи. Это сделает Вашу речь более выразительной;
- необходимо иметь контакт с аудиторией.

6.10 Подготовка выпускной квалификационной работы

ВКР представляет собой самостоятельное логически завершенное исследование, связанное с решением научной или научно-практической задачи. При его выполнении студент должен показать способности и умения, опираясь на полученные знания, решать на современном уровне задачи профессиональной деятельности, грамотно излагать специальную информацию, докладывать и отстаивать свою точку зрения перед аудиторией.

Цель защиты ВКР – установление уровня подготовленности выпускника к выполнению профессиональных задач в соответствии с требованиями ФГОС ВО к квалификационной характеристике и уровню подготовки выпускника.

Студенту предоставляется право самостоятельного выбора темы ВКР. Для подготовки ВКР назначается научный руководитель и, при необходимости, консультанты.

ВКР состоит из текста (рукописи) и графических материалов, отражающих решение профессиональных задач в соответствии с избранной тематикой. Структура ВКР включает:

- титульный лист;
- задание, включая календарный план;
- содержание;
- введение;
- основной текст;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Руководитель выпускной работы выдает задание; оказывает помощь в организации и выполнении работы; проводит систематические консультации обучающегося; проверяет выполнение работы; дает письменный отзыв о работе.

Представление иллюстративного материала к публичной защите возможно в виде:

- плакатов и чертежей;
- раздаточного материала с иллюстрациями; с использованием:
- проекционной техники;
- компьютерной презентации.

Конкретные требования к содержанию, структуре, формам представления и объемам устанавливаются в соответствующих Положениях о выпускных квалификационных работах и методических указаниях по их подготовке и оформлению.

6.11 Подготовка к текущей и промежуточной аттестации

Система контроля включает в себя текущий и промежуточный контроль. Текущий контроль должен быть непрерывным. Формы текущего контроля устанавливаются по усмотрению преподавателя. Промежуточный контроль – это итог работы студента за семестр с учетом всех видов учебной работы.

Текущий контроль. Текущий контроль успеваемости обучающихся – это систематическая проверка учебных достижений обучающихся, проводимая в целях оценивания хода освоения дисциплин в соответствии с рабочей программой.

Текущий контроль успеваемости студентов очной формы обучения проводится по всем дисциплинам учебного плана в течение семестра:

- на лабораторных, семинарских, практических занятиях, по которым рабочими программами дисциплин предусмотрены отчетности;

- по всем формам самостоятельной работы студентов в заранее установленное время.

Текущий контроль успеваемости студентов осуществляется преподавателями кафедр, за которыми закреплены дисциплины учебного плана, и может проводиться в следующих формах:

- собеседование,
- контрольная работа,
- защита лабораторной работы,
- реферата,
- расчетно-графическая работа, и др.

Виды и сроки проведения текущего контроля успеваемости студентов устанавливаются рабочей программой дисциплины.

Текущий контроль успеваемости является элементом внутривузовской системы контроля качества подготовки обучающихся и способствует активизации познавательной деятельности студентов в ходе аудиторных занятий, при выполнении программ самостоятельной и индивидуальной работы.

Текущий контроль успеваемости должен учитывать выполнение обучающимися всех видов учебных занятий, предусмотренных учебным планом и рабочей программой дисциплины, самостоятельную, исследовательскую работу и посещаемость учебных занятий.

Анализ результатов текущего контроля студентов, обучающихся на основе рейтинговой оценки знаний, проводится 2 раза в семестр:

- в первом полугодии - на 1 ноября, на 10 декабря;
- во втором полугодии - на 1 апреля, на 20 мая.

Анализ результатов текущего контроля студентов, не участвующих в рейтинговой системе оценки знаний, проводится в институтах: к указанным выше датам итоги текущего контроля и количество пропущенных занятий (в часах) преподаватели, ведущие занятия, проставляют в листы текущего контроля успеваемости, которые анализируются и хранятся в институтах.

Промежуточная аттестация. Промежуточная аттестация призвана оценить уровень сформированности компетенций, полученных студентами в процессе изучения дисциплины, курсового проектирования и обеспечить контроль качества освоения образовательных программ.

Промежуточная аттестация проводится по завершении изучения какой - либо дисциплины.

Формами промежуточной аттестации являются зачет и экзамен.

При явке на промежуточную аттестацию обучающийся обязан предъявить зачетную книжку. Фамилия обучающегося должна значиться в зачетно-экзаменационной ведомости.

Зачеты студентам по изучаемым дисциплинам выставляются преподавателем, проводившим практические, семинарские или лабораторные занятия группы (подгруппы), на последнем занятии по результатам работы в семестре. Для студентов, обучающихся на основе рейтинговой системы оценки знаний, зачет выставляется автоматически при условии сдачи всех контрольных мероприятий, предусмотренных текущим контролем успеваемости.

6.12 Подготовка к государственной итоговой аттестации

В соответствии с образовательным стандартом по направлению подготовки и образовательной программой по направлению подготовок, в состав государственной итоговой аттестации входят:

- государственный экзамен;
- защита выпускной квалификационной работы.

Подготовка к государственному экзамену

Цель государственного экзамена – оценить глубину полученных знаний, практические навыки применения этих знаний при решении профессиональных задач (компетентность).

В связи с необходимостью объективной оценки степени сформированности компетенций выпускника, тематика экзаменационных вопросов и заданий должна быть комплексной и соответствовать избранным разделам из различных учебных дисциплин, формирующих конкретные компетенции.

Например, в экзаменационное задание (вопрос) могут входить элементы нескольких дисциплин (модулей) общенаучного, и профессионального циклов.

На государственном экзамене могут контролироваться как отдельные компетенции, так и элементы различных компетенций.

Государственный экзамен может проводиться в письменной, устной и смешанной форме. Экзаменационные билеты включают несколько вопросов из представленного перечня дисциплин. Один из вопросов рекомендуется делать комплексным, ситуационным или представляющим задание практического характера. Перед итоговым экзаменом предполагается предэкзаменационная консультация и выделение времени на подготовку к экзамену не менее 7 дней. Для подготовки студентов к государственному экзамену разрабатывается программа, где должна быть отражена процедура подготовки и проведения государственного экзамена, критерии оценки.

В содержание программы включается перечень вопросов и заданий, выносимых на экзамен, и позволяющих оценить результаты обучения.

Подготовка к защите ВКР

Выпускная квалификационная работа (ВКР) представляет собой самостоятельную и логически завершенную выпускную квалификационную работу, связанную с решением задач того вида (видов) деятельности, к которым готовится студент (научно-исследовательской, научно-педагогической, проектной, технологической, исполнительской, творческой, организаторской и другим).

Выпускник должен не только подготовить ВКР, но и уметь защитить ее на итоговой государственной аттестации.

При подготовке к защите необходимо:

- повторить основные требования руководящих документов на текущий год по теме ВКР;
- подготовить все графические иллюстрации; составить доклад для устного изложения;
- изучить отзыв и рецензию на ВКР, подготовить ответы на замечания рецензента и окончательно уточнить свой доклад;
- ознакомиться с новыми руководящими документами и литературой по вопросам ВКР, а также с последними изменениями по вопросам теплогазоснабжения и вентиляции;
- провести предварительную защиту.

Демонстрационные материалы представляются по согласованию с руководителем.

Подготовка выпускником доклада по выполненной ВКР является важным этапом подготовки к защите. К подготовке доклада приступают после оформления пояснительной записки (текстуальной части) ВКР, запланированных в задании графических документов и разработки иллюстративного материала.

По времени доклад должен занимать 10...12 минут. За это время можно изложить 5...8 страниц машинописного текста доклада.

В докладе отражается: актуальность темы работы; теоретические положения, на которых базируется ВКР; результаты проведенного анализа изучаемой проблемы; конкретные предложения по деятельности соответствующих органов; дается разъяснение и убедительное обоснование положений и выводов по этим вопросам, исходя из полученных результатов. Особое внимание необходимо сосредоточить на собственных разработках и предложениях.

Доклад при защите ВКР может быть построен по следующей схеме: вначале излагается наименование темы, актуальность, раскрывается цель и задачи исследования, затем в необходимой логической последовательности докладывается содержание важнейших узловых вопросов темы и делается заключение. При изложении основного содержания ВКР следует показать постановку задач на исследование заданных вопросов, методику решения поставленных задач, основные результаты и выводы, к которым пришел выпускник в ходе выполнения выпускной квалификационной работы.

Основные выводы и предложения обосновываются необходимыми расчетами и примерами из практики.

В заключительной части доклада указывается, как достигнуты цели ВКР, что сделано и разработано, что нового выпускник предложил в результате выполнения ВКР, основные результаты работы и где они могут быть использованы.

Доклад строят с учетом графического материала (Чертежи, схемы, диаграммы и т.д.). Текст доклада согласовывается с руководителем.

Написанный доклад представляется руководителю для просмотра.

Текст доклада отрабатывают таким образом, чтобы его можно было излагать на память. Чтение доклада нежелательно, оно может привести к снижению оценки выпускной квалификационной работы.

7. Критерии оценки самостоятельной работы

Компетенции (знания, умения и навыки) студентов оцениваются оценками:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно»;
- «зачтено»;
- «не зачтено».

Зачеты оцениваются отметкой: «зачтено», «не зачтено».

Зачеты с оценкой оцениваются по пятибалльной системе: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

По курсовым работам (проектам) в обязательном порядке выставляется зачет с оценкой.

Экзамены оцениваются по пятибалльной системе: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

Основные критерии оценивания компетенций:

Отметка «зачтено» ставится студентам, успешно обучающимся по данной дисциплине в семестре и не имеющим задолженностей по результатам текущего контроля успеваемости.

Отметка «не зачтено» ставится студенту, имеющему задолженности по результатам текущего контроля успеваемости по данной дисциплине.

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Отметка «неудовлетворительно» выставляется также, если обучающийся после начала экзамена отказался его сдавать.

Оценка «неудовлетворительно» проставляется только в экзаменационную ведомость, в зачетную книжку студента проставлять отметку «неудовлетворительно» не разрешается.

Критерии оценки уровня обученности и уровня сформированности компетенций по дисциплине устанавливает кафедра и отражает их в рабочей программе и фондах оценочных средств дисциплины.

Ответственность за единообразие требований, предъявляемых на экзаменах, несет заведующий кафедрой. По дисциплинам, изучаемым в течение двух и более семестров, итоговой оценкой является оценка, полученная на последнем экзамене.

Заключение

Самостоятельная работа всегда завершается какими-либо результатами. Таким образом, широкое использование методов самостоятельной работы, побуждающих к мыслительной и практической деятельности, развивает столь важные интеллектуальные качества человека, обеспечивающие в дальнейшем его стремление к постоянному овладению знаниями и применению их на практике.