

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**для студентов по организации
самостоятельной работы по дисциплине
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

Направление подготовки	20.03.01 Техносферная безопасность
Профиль	Пожарная безопасность
Квалификация выпускника - бакалавр	

Ставрополь, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА.....	7
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С ЛИТЕРАТУРОЙ.....	7
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	8
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ДОМАШНЕЙ РАБОТЫ, ПРИМЕРНЫЙ КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ.....	28
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСПЕКТИРОВАНИЮ ПЕРВОИСТОЧНИКОВ.....	37
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Современные стандарты подготовки бакалавров предусматривают значительный объем внеаудиторной работы. Освоение программы курса предполагает получение как теоретических знаний по электротехнике, так и формирование навыков практической работы. Поэтому самостоятельная работа в рамках курса ориентирована как на теоретический, так и на практический аспект.

Самостоятельная работа студентов – это выполнение теоретических и практических заданий студентами по усвоению изучаемой дисциплины «Электротехника и электроника».

Специалист в области информационных технологий, как в процессе проектирования оборудования, так и в процессе его эксплуатации должен знать основные принципы работы электротехнических схем. Это позволит грамотно и эффективно использовать электроэнергетических установки, выбирать оптимальные и экономически обоснованные режимы их работы, избегать возникновения нештатных и аварийных ситуаций при эксплуатации подобного оборудования.

В настоящее время идет активное развитие электротехнической отрасли, появляются новое сложное оборудование. Поэтому инженер должен уметь его использовать как при проектировании электроэнергетического оборудования, так и в процессе эксплуатации.

Используя теоретические знания и пользуясь настоящими методическими указаниями, студент может самостоятельно выполнить домашнюю работу, усвоить методы расчета электрических цепей, что поспособствует более глубокому усвоению дисциплины «Электротехника и электроника».

Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний, полученных студентами на лекциях, подготовке к текущим лабораторным и практическим занятиям, промежуточным формам контроля знаний и к итоговому контролю.

Дидактические цели самостоятельных занятий:

- формирование профессиональных умений;
- формирование умений и навыков самостоятельного умственного труда;
- мотивирование регулярной целенаправленной работы по освоению специальности;
- развитие самостоятельности мышления;
- формирование убежденности, волевых черт характера, способности к самоорганизации;
- овладение технологическим учебным инструментом.

Самостоятельная работа включает те разделы курса, которые не получили достаточного освещения на лекциях по причине ограниченности лекционного времени и большого объема изучаемого материала.

Методическое обеспечение самостоятельной работы по дисциплине состоит из:

- 1) Определения учебных вопросов, которые студенты должны изучить самостоятельно;
- 2) Подбора необходимой учебной литературы, обязательной для проработки и изучения;
- 3) Поиска дополнительной научной литературы, к которой студенты могут обращаться по желанию, если у них возникает интерес в данной теме;
- 4) Определения контрольных вопросов, позволяющих студентам самостоятельно проверить качество полученных знаний;
- 5) Организации консультаций преподавателя со студентами для разъяснения вопросов, вызвавших у обучающихся затруднения при самостоятельном освоении учебного материала.

Самостоятельная работа студента – это особым образом организованная деятельность, включающая в свою структуру такие компоненты, как:

- уяснение цели и поставленной учебной задачи;
- четкое и системное планирование самостоятельной работы;

- поиск необходимой учебной и научной информации;
- освоение собственной информации и ее логическая переработка;
- использование методов исследовательской, научно-исследовательской работы

для решения поставленных задач;

- выработка собственной позиции по поводу полученной задачи;
- представление, обоснование и защита полученного решения;
- проведение самоанализа и самоконтроля

Виды самостоятельных работ по учебной дисциплине:

- работа с понятийным аппаратом;
- поисковая работа с различными источниками;
- составление аннотированного списка литературы по проблеме;
- работа с фрагментами исследовательской деятельности;
- анализ научных исследований по психологической проблематике;
- подготовка домашней работы по теме.

Контроль знаний студентов включает формы текущего и итогового контроля. Текущий контроль осуществляется в процессе изучения курса и включает в себя оценку работы студентов на лабораторных и практических занятиях (собеседование, тестирование), а также подготовку домашнего задания.

Учебно-тематический план дисциплины

№	Раздел (тема) дисциплины	Реализуемые компетенции	Контактная работа обучающихся с преподавателем, часов				Самостоятельная работа, часов
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Групповые консультации	
4 семестр							
1	Электрические цепи постоянного тока и методы их расчета.	УК – 2 ОПК-1					
2	Электрические цепи синусоидального тока и методы их расчета.	УК – 2 ОПК-1					
3	Трехфазные электрические цепи.	УК – 2 ОПК-1					
4	Нелинейные и магнитные цепи.	УК – 2 ОПК-1					
5	Электрические машины.	УК – 2 ОПК-1					
6	Основы электроники. Электрические измерения.	УК – 2 ОПК-1					
	ИТОГО за 2 курс						
	ИТОГО						

ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Коды реализуемых компетенций	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
				СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
5 семестр						
УК – 2 ОПК-1	Подготовка к практическому занятию	отчет	Собеседование			
УК – 2 ОПК-1	Самостоятельное изучение литературы	конспект	Собеседование			
УК – 2 ОПК-1	Подготовка к лабораторной работе	отчет	Собеседование			
УК – 2 ОПК-1	Подготовка к лекции	конспект	Собеседование			
УК – 2 ОПК-1	Подготовка к зачету	зачёт	Собеседование			
Итого за семестр				76.5		
Итого				76.5		

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Комплексное изучение предлагаемой студентам учебной дисциплины «Электротехника и электроника» предполагает овладение материалами лекций, учебников, программы, творческую работу студентов в ходе проведения практических и лабораторных занятий, а также систематическое выполнение заданий для самостоятельной работы.

В ходе лекций раскрываются основные вопросы в рамках рассматриваемых тем, делаются акценты на наиболее сложные и интересные положения изучаемого материала, которые должны быть приняты студентами во внимание. Материалы лекций являются основой для подготовки студентов к лабораторным и практическим занятиям.

Работа с конспектом лекций

Просмотрите конспект сразу после занятий. Отметьте материал конспекта лекций, который вызывает затруднения для понимания. Попробуйте найти ответы на затруднительные вопросы, используя предлагаемую литературу. Если самостоятельно не удалось разобраться в материале, сформулируйте вопросы и обратитесь на текущей консультации или на ближайшей лекции за помощью к преподавателю.

Каждую неделю отводите время для повторения пройденного материала, проверяя свои знания, умения и навыки по контрольным вопросам и тестам.

Выполнение лабораторных и практических занятий по дисциплине «Электротехника и электроника»

На первом занятии получите у преподавателя задания по курсу, планы подготовки к практическим и лабораторным занятиям. Обзаведитесь всем необходимым методическим обеспечением.

Перед лабораторным и практическим занятиями изучите теорию вопроса, предполагаемого к исследованию, ознакомьтесь с опытом других исследователей в этом направлении, подготовьте протокол проведения работы, в который занесите:

- название работы; цель работы; ход работы.

Оформление лабораторных работ часто требует наличия справочной литературы, которую необходимо иметь при себе на занятии.

Оформление отчетов должно производиться после окончания работы непосредственно на занятии, при наличии свободного времени или дома.

Для подготовки к защите отчета следует проанализировать экспериментальные результаты, сопоставить их с известными теоретическими положениями или эмпирическими справочными данными, обобщить результаты исследований в виде лаконичных выводов по работе.

Целью лабораторных занятий является:

- закрепление методов приложения теории к решению практических задач анализа и синтеза психологического знания;
- проверка уровня понимания студентами вопросов, рассмотренных на лекциях и по учебной литературе, степени и качества усвоения материала;
- обучение навыкам освоения методики эксперимента и работы с нормативно-справочной литературой;
- восполнение пробелов в пройденной теоретической части курса и оказание помощи в его усвоении.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Изучение и анализ литературных источников является обязательным видом самостоятельной работы студентов. Изучение литературы по избранной теме имеет своей задачей проследить характер постановки и решения определенной проблемы различными авторами, аргументацию их выводов и обобщений, провести анализ и систематизировать полученный материал на основе собственного осмысления с целью выяснения современного состояния вопроса.

Проработка отобранного материала обязательно должна идти с одновременным ведением записей прочитанного и своих замечаний. Запись может иметь как форму конспекта, так и выписок, а также картотеку положений, тезисов, идей, методик, что в дальнейшем облегчит классификацию и систематизацию полученного материала. Такого рода записи являются лучшим способом накопления и первичной обработки материал, одной из обязательных форм организации умственного труда.

Планом удобно пользоваться при подготовке к устному выступлению по выбранной теме. Каждый пункт плана должен раскрывать одну из сторон избранной темы, а весь план должен охватывать ее целиком.

Тезисы предполагают сжатое изложение основных положений текста в форме утверждения или отрицания. Они являются более совершенной формой записей и представляют основу для дискуссии. К тому же их легко запомнить.

Аннотация – краткое изложение содержания – дает общее представление о работе.

Резюме кратко характеризует выводы, главные итоги произведения.

Конспект является наиболее распространенной формой ведения записей. Основную ткань конспекта составляют тезисы, дополненные доказательствами и рассуждениями. Конспект может быть текстуальным, свободным или тематическим. Текстуальный представляет собой цитатник с сохранением логики работы и структуры текста. Свободный конспект основан на изложении материала в том порядке, который более удобен автору. В этом смысле конспект представляет собирание воедино мыслей, разбросанных по всей книге. Тематический конспект может быть составлен по нескольким источникам, где за основу берется тема, интерпретируемая по-разному.

Экономии времени дает использование при записях различного рода сокращений, аббревиатуры и т.д. многие используют для регистрации исследуемых тем систему карточек. Преимущество карточек в том, что тема там излагается очень сжато, и они очень удобны в использовании, т.к. их можно разложить на столе, перегруппировать и без труда найти искомую тему.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дают студенту возможность оперативной оценки своей подготовленности по данной теме и определения готовности к изучению следующей темы. Контрольные вопросы направлены на то, чтобы студент мог проверить понимание понятийного аппарата учебной дисциплины, смог воспроизвести фактический материал, раскрыть причинно-следственные, временные связи, а так же мог выделять главное, сравнивать, доказывать, конкретизировать, обобщать и систематизировать знания.

Самостоятельное занятие 1

Тема 1. Электрические цепи постоянного тока.

Цель занятия: изучить последовательность расчета электрических цепей постоянного тока с помощью законов Кирхгофа и Ома.

В результате изучения представленной темы необходимо знать:

Общие сведения об электрических цепях: определение, классификация. Электрический ток его определение, направление, сила тока, плотность. Электрическая проводимость и сопротивление проводников. Зависимость сопротивления от температуры. Законом Ома для участка и полной цепи. Основные элементы электрических цепей: источники и приемники электрической энергии, их мощность и К.П.Д. назначение вспомогательных элементов цепи режиму работы электрической цепи: холостой ход, нормальный, рабочий, короткого замыкания. Закон Джоуля – Ленца. Нагрев проводов. Выбор сечения проводов в зависимости от допустимого тока. Условное обозначение на электрическую схему. Участки схем электрических цепей: ветвь, узел, контур. Потеря напряжения в линиях электропередачи. Расчет электрических цепей с помощью знаков, Ома и Кирхгофа. Понятие о расчете сложных цепей.

Студент должен знать:

- единицы измерения силы тока, потенциала, напряжения.
- закон Ома для участка и полной цепи;
- схемы включения амперметра и вольтметра в электрической цепи;
- закон Джоуля – Ленца;
- первое и второе правила Кирхгофа.

уметь:

- составлять простейшие электрические схемы;
- применять законы Ома для расчета электрических цепей;
- выбирать методы расчета в зависимости от типа цепей тока;
- производить преобразование цепей с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов.
- составлять уравнения Кирхгофа для расчета электрических цепей;
- составлять исходные уравнения для расчетов сложной цепи постоянного тока, в том числе уравнение баланса мощностей;

Самостоятельная работа студентов.

по индивидуальным заданиям определить эквиваленты сопротивление электрической цепи со смешанным соединением элементов.

- произвести расчет электрических цепей по законам Ома и составить баланс мощностей.
- получив схему сложной электрической цепи рассчитать токи по закону Кирхгофа.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Как производится расчет сложной электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа?
2. Записать уравнения по первому и второму законам Кирхгофа для электрических схем по заданию преподавателя.
3. Каковы основные соотношения при последовательном и параллельном соединении потребителей постоянного тока?

Самостоятельное занятие 2

Тема 1.2. Методы расчета линейных электрических цепей постоянного тока

Цель занятия: изучить основные методы расчета электрических цепей постоянного тока.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Последовательность расчета методом эквивалентного генератора
2. Последовательность расчета методом двух узлов.
3. Последовательность расчета методом контурных токов
4. Последовательность расчета методом узловых потенциалов

Самостоятельное занятие 3

Тема 2. Анализ и расчет линейных однофазных электрических цепей переменного тока

Цель занятия: изучить основные методы расчета электрических цепей синусоидального тока.

В результате изучения представленной темы необходимо знать: Параметры и формы представления переменного тока и напряжения. Активное сопротивление, индуктивность и емкость в цепи переменного тока. Временные и векторные диаграммы токов и напряжений. Использование законов Ома и правила Кирхгофа для расчета электрических цепей переменного тока. Резонанс напряжений и токов. Активная, реактивная и полная мощность в цепи переменного тока. Коэффициент мощности и его значение.

Студент должен знать:

- параметры и формы представления переменного тока;
- электрические схемы, включая напряжение;
- элементов в цепи переменного тока;
- закон Ома и правило Кирхгофа для цепей переменного тока;
- условия возникновения и особенности резонанса напряжения и тока в цепях переменного тока;
- связь между активной, реальной и полной мощностями;
- способы повышения коэффициента мощности.

уметь:

- находить параметры переменного тока и напряжения по их графической форме представления;
- рассчитать токи переменного тока;
- строить векторную диаграмму разветвленной и неразветвленной цепей переменного тока;
- определять активную, реактивную и полную мощности и коэффициент мощности в цепях переменного тока;
- строить векторные диаграммы для различных режимов электрических цепей;

Самостоятельная работа студентов.

Законспектировать пример расчета разветвленной цепи переменного тока. Описать методы повышения коэффициента мощности на электроустановках.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что называют резонансом в электрических цепях?
2. Что называют колебательным контуром?
3. Какие виды резонанса вы знаете?
4. Условие возникновения резонанса токов.
5. Условие возникновения резонанса напряжения.

Самостоятельное занятие 4

Тема 3. Анализ и расчет линейных трехфазных электрических цепей переменного тока

Цель занятия: изучить основные теоретические положения трехфазных электрических цепей.

В результате изучения представленной темы необходимо знать:

Общие сведения о трехфазных электрических цепях. Сведение обмоток трехфазного генератора и потребителей звездой и треугольником. Симметричная и несимметричная нагрузка. Трехпроводная и четырехпроводная линия. Роль нулевого провода. Расчет трехфазных цепей с использованием законов Ома и векторных диаграмм. Мощность трехфазной цепи.

Студент должен знать:

- принцип соединения обмоток генератора и потребителя энергии звездой и треугольником;
- что такое симметричная и несимметричная нагрузки;
- соотношение между линейными и фазными токами напряжениями при соединении звездой и треугольником (для обмоток генератора и потребителей);
- назначение нулевого провода;

уметь:

- строить векторные диаграммы токов и напряжений для симметричной и несимметричной нагрузок;
- соединять обмотки трехфазных генераторов трансформатором, потребителей звездой и треугольником;
- различать фазные и линейные величины при различных соединениях приемников электроэнергии;
- производить измерения токов и напряжений, трехфазных цепях.

Самостоятельная работа студентов.

Составить схему подсоединения однофазных и трехфазных потребителей и трехфазным цепям переменного тока.

Вычертить в конспекте векторную диаграмму трехфазной цепи со смещением нейтрали.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Чему равно напряжение смещения нейтрали при симметричной нагрузке?
2. Что означает симметричный трехфазный источник электрической энергии?
3. От каких факторов зависит угол сдвига фаз между фазными напряжениями и токами?
4. Что означает несимметричный трехфазный источник

Самостоятельное занятие 5

Тема 4. Анализ и расчет электрических цепей с нелинейными элементами и магнитных цепей.

Цель занятия: изучить основные методы анализа электрических цепей с нелинейными элементами и магнитных цепей.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод аналитической аппроксимации
2. В чем заключается метод кусочно-линейной аппроксимации
3. В чем заключается метод линеаризации
4. В чем заключаются итерационные методы расчета электрических цепей с нелинейными элементами

Самостоятельное занятие 6

Тема 5. Электромагнитные устройства, электрические машины и электрооборудование. Трансформаторы

Цель занятия: изучить принцип действия двухобмоточных трансформаторов. Назначение трансформаторов, их классификация.

Вклад Русских ученых Н.Н. Яблочкова и М.О. Доливо-Добровольского в создании и использовании трансформаторов. Однофазный трансформатор, его устройство принцип действия, условное обозначение, коэффициент трансформации. Внешняя характеристика трансформатора. Режим работы трансформатора: холостой ход, рабочее короткое замыкание. Потери энергии и К.П.Д. трансформатора. Понятие об измерительных, сварочных трансформаторах, автотрансформаторах.

Студент должен знать:

- устройство и принцип действия трансформатора;
- как определять параметры трансформаторов по паспортным данным;
- как определить потери мощности и К.П.Д. по результатам измерений;
- коэффициент трансформации по данным измерений токов и напряжений;

уметь:

- различать режимы работы трансформаторов;
- регулировать выходные напряжения с помощью автотрансформатора;
- различать трансформаторы по различным конструктивным признакам.

Самостоятельная работа студентов.

Изучить и законспектировать устройство и принцип действия сварочного трансформатора

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что такое идеализированный трансформатор?
2. Что такое коэффициент загрузки трансформатора?
3. На какие потери мощности влияет коэффициент загрузки трансформатора?
4. Для чего параметры вторичной обмотки приводят к первичной обмотке?

Самостоятельное занятие 7

Тема 5.2. Электромагнитные устройства, электрические машины и электрооборудование. Машины постоянного тока.

Цель занятия: изучить принцип действия машины постоянного тока.

Устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока. Магнитная и электрическая цепь. Обратимость машин. Генераторы постоянного тока. Классификация характеристики. Генератор с независимым и параллельным воздействием. Электродвигатели параллельного, последовательного и смешанного воздействия их применение. Пуск в ход, регулирования частоты вращения электродвигателей постоянного тока.

Студент должен знать:

- устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока;
- способы пуска электродвигателей постоянного тока.

уметь:

- определить типы и параметры машины постоянного тока по их маркировке;
- строить характеристики генераторов постоянного тока по данным измерений;
- подключить двигатель к сети, осуществлять его пуск и регулировку частоты вращения.

Самостоятельная работа студентов.

Законспектировать механические и рабочие характеристики ДПТ независимого и параллельного возбуждения.

Зарисовать схему включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Описать принцип работы генератора смешанного возбуждения.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Какие способы используют для пуска двигателя постоянного тока?
2. Поясните, в чем заключается функция инвертирования и выпрямления щеточно-коллекторного узла
3. Какой элемент является самым слабым узлом в машине постоянного тока?
4. Как определяется направление вращения якоря?

Самостоятельное занятие 8

Тема 5.3. Электромагнитные устройства, электрические машины и электрооборудование. Асинхронные машины. Синхронные машины.

Цель занятия: изучить принцип действия асинхронных и синхронных машин.

Электрические машины переменного тока их назначение и классификация. Устройство трехфазного асинхронного электродвигателя. Получение вращающегося магнитного поля в трехфазных электродвигателях. Принцип работы трехфазного асинхронного двигателя. Пуск в ход и регулирование скорости вращения асинхронных двигателей. Однофазный электродвигатель.

Студент должен знать:

- устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей;
- способы их пуска в зависимости от мощности;
- почему частота вращения ротора асинхронного двигателя меньше синхронной частоты вращения;
- методы регулировки частоты вращения асинхронного двигателя;

уметь:

- определять: тип, параметр двигателя по его маркировке частоту вращения ротора по значению скольжения и частоте тока в сети;
- подключать двигатель к сети и осуществлять его пуск и реверсирование;

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего используются и что собой представляют асинхронные исполнительные двигатели и тахогенераторы?
2. При каком значении выходной мощности наступает максимум К.П.Д. асинхронного двигателя?
3. От чего зависит выходная мощность на валу асинхронного двигателя?
4. Почему $\cos\phi$ возрастает с повышением нагрузки на валу?
- 5 Поясните принцип действия асинхронного двигателя.
- 6 Что такое скольжение?
- 7 Поясните устройство и принцип действия синхронной машины.

Самостоятельное занятие 9

Тема 6. Основы электроники. Элементная база современных электронных устройств. Источники вторичного электропитания.

Цель занятия: изучить принцип действия и назначение полупроводниковых приборов.

Электрофизические свойства полупроводников. Собственная и примесная проводимость. Электронно-дырочный переход и его свойства. Вольтамперная характеристика. Устройство и типы диодов, их применение. Общие сведения о полевых транзисторах. Тристоры, работа, маркировка, применение.

Студент должен знать:

- параметры полупроводниковых приборов по их характеристикам;
- принцип работы полупроводникового диода и его применение;
- принцип работы биполярного транзистора, его схемы включения и применение;
- принцип работы полевого транзистора, его отличия от биполярного;
- принцип работы и применение тиристоров.

уметь:

- определять типы проводниковых приборов по их маркировке;
- производить измерения токов и напряжений при снятии входных и выходных характеристики биполярных транзисторов.

Самостоятельная работа студентов.

Изобразить условные обозначения различных типов полупроводниковых приборов, описать кратко их работу применение (по справочнику).

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что называют дифференциальным сопротивлением диода? Как экспериментально определить дифференциальное сопротивление стабилитрона?
2. Назначение стабилитронов, их отличие от выпрямительных диодов.
3. Сравнить ВАХ стабилитрона и выпрямительного диода.
4. Что называют прямым и обратным включениями диода? Каковы их свойства?
5. В чем отличие идеальной ВАХ полупроводникового диода от реальной?

Самостоятельное занятие 10

Тема 6.2. Электронные выпрямители и стабилизаторы.

Цель занятия:.

Выпрямители их назначение, классификация обобщенная структурная схема. Однофазные и трехфазные принципиальные схемы выпрямления, их принцип действия, соотношения между основными электрическими величинами схем. Сглаживающие фильтры, их назначение, виды. Стабилизаторы.

Студент должен знать:

- структурную схему выпрямительного устройства;
- виды схем выпрямления, их принципы работы и параметры;
- схемы стабилизаторов и их принцип работы;
- схемы сглаживающих фильтров и их назначение;

уметь:

- составлять схемы одно - двухполупериодных выпрямителей;
- изображать графики выпрямительных токов и напряжений для различных типов выпрямителей;
- объяснить работу различных сглаживающих фильтров, работу электронных стабилизаторов напряжения тока.

Самостоятельная работа студентов.

По схеме выпрямления, заданной преподавателем, изобразить схему выпрямления и подобрать типы диодов по заданным параметрам схемы.

В результате изучения представленной темы необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Как определить абсолютную погрешность?
2. Как определить относительную погрешность?
3. Какие виды погрешностей вы знаете?
4. Какие приборы для измерения электрических величин вам известны?

СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ТЕМАМ ПРОГРАММ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью самостоятельной работы является проверка усвоения студентом соответствующих разделов дисциплины «Электротехника и электроника», самостоятельная работа содержит три задания по следующим темам дисциплины:

Задание 1 «Расчет электрической цепи постоянного тока» (решать задание 1.1. или 1.2)

Задание 2 «Расчет трехфазной цепи».

Задание 3 «Определение мощности двигателя».

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЯ И ЕГО ОБЪЕМ

Задание 1. Расчет электрической цепи постоянного тока

1.1 Для электрической схемы (рис. 1.1) составить уравнения по законам Кирхгофа; определить наиболее рациональным методом токи в ветвях; напряжение на каждом элементе; проверить баланс мощностей. Параметры элементов схемы указаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1– Исходные данные к заданию 1.1

№ п/п	ЭДС источников, В				Сопротивления резисторов, Ом							
	E1	E6	E7	E8	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
1	0	30	20	0	1,2	1,8	2,0	0	0	1,0	1,6	∞
2	0	35	15	0	1,6	1,8	1,2	0	0	1,6	2,0	∞
3	0	25	35	0	1,2	1,6	1,0	0	0	1,8	2,1	∞
4	0	20	25	0	1,0	2,0	1,6	0	0	1,8	2,2	∞
5	0	25	30	0	1,8	2,0	1,0	0	0	1,6	2,3	∞
6	0	40	0	0	1,2	1,0	1,6	0	0	1,8	2,4	∞
7	0	50	20	0	1,6	1,8	1,2	0	0	1,0	2,5	∞
8	0	20	30	0	1,0	1,8	1,6	∞	0	1,2	2,6	∞
9	25	0	0	20	1,0	0	2,0	∞	1,2	0	1,6	1,8
10	40	0	0	20	2,0	0	1,2	∞	1,0	0	1,8	1,8
11	35	0	0	20	1,6	0	2,0	∞	1,2	0	1,0	1,6
12	30	0	0	15	1,2	0	1,6	∞	2,0	0	1,0	1,8
13	20	0	0	30	1,0	0	2,0	∞	1,8	0	1,6	1,2
14	25	0	0	15	1,8	0	2,0	∞	1,2	0	1,0	1,6
15	30	0	0	20	2,0	0	1,8	∞	1,0	0	1,2	1,6
16	35	0	0	15	1,8	0	2,0	∞	1,0	0	1,6	1,2
17	20	0	0	25	1,0	∞	0	2,0	1,2	0	2,0	1,8
18	20	0	0	40	2,0	∞	0	1,2	1,6	0	1,0	1,6
19	20	0	0	35	1,6	∞	0	1,0	1,2	0	1,6	1,8
20	15	0	0	20	1,2	∞	0	1,6	1,0	0	1,0	1,8
21	30	0	0	25	1,0	∞	0	1,0	1,8	0	1,6	1,2
22	15	0	0	30	1,8	∞	0	1,6	1,2	0	1,2	1,6
23	20	0	0	35	2,0	∞	0	1,2	1,6	0	1,6	1,6
24	15	0	0	20	1,8	∞	0	1,6	1,0	0	1,6	1,2
25	25	0	30	20	1,2	∞	0	∞	1,0	1,2	0	1,2
26	40	0	35	15	1,0	∞	0	∞	1,0	2,0	0	1,6
27	35	0	25	30	1,8	∞	0	∞	1,2	1,8	0	1,6

28	30	0	40	15	2,0	∞	0	∞	1,8	1,2	0	1,2
29	20	0	50	20	1,8	∞	0	∞	2,0	1,0	0	1,8
30	25	0	20	15	1,0	∞	0	∞	1,2	1,6	0	1,8

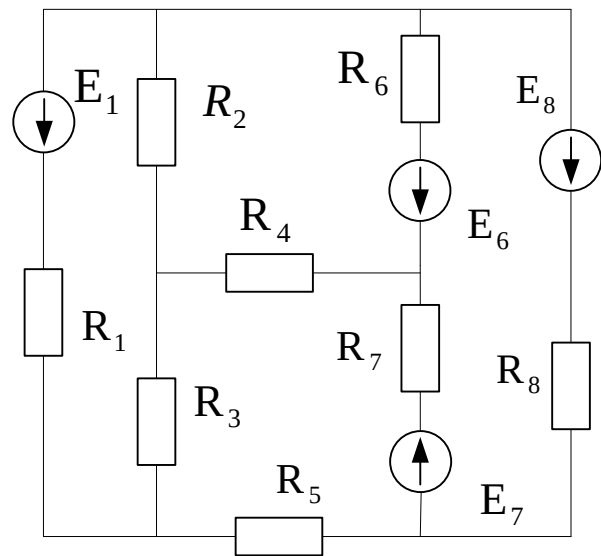


Рисунок 1.1 – Обобщенная схема для расчета цепи постоянного тока

1.2. Для электрической схемы (рис. 1.2) определить входное сопротивление схемы относительно ЭДС. Определить токи и напряжения участков цепи. Параметры элементов схемы указаны в таблице 1.2.

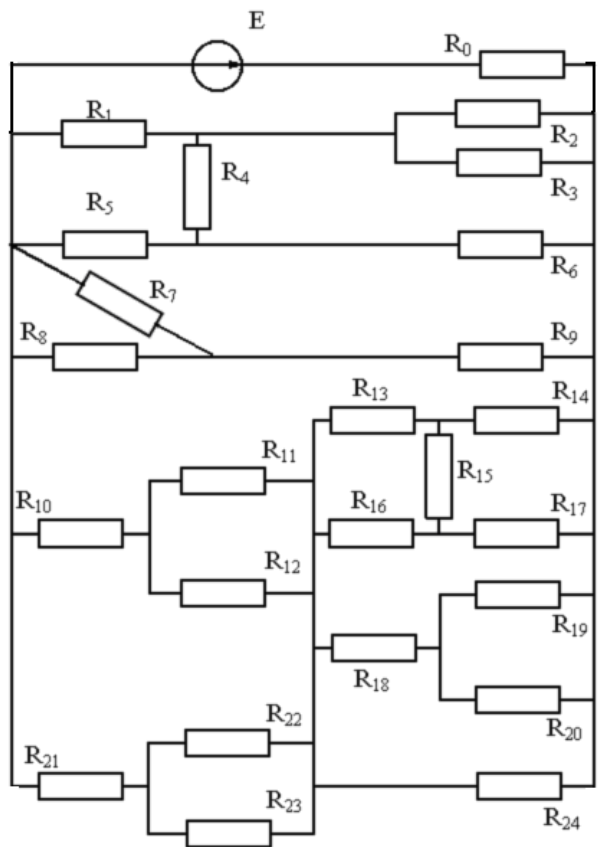


Рисунок 1.2 – Обобщенная схема для расчета цепи постоянного тока

Указания:

1. Неуказанные в таблицах сопротивления резисторов принимаются равными целому числу по выбору преподавателя.
2. Величина ЭДС задается преподавателем.
3. Внутреннее сопротивление источника принять равным 1 Ом.
4. Вариант задания выбирается из таблицы 1.2.
5. Результаты расчетов свести в таблицу 1.3.
6. Провести проверку результатов расчета по первому закону Кирхгофа для узловых точек и по второму закону Кирхгофа для контуров.

Таблица 1.2 – Исходные данные к заданию 1.2

№ Варианта	Номера потребителей, граничных состояний	
	R=0	R= ∞
1	2	3
1	3, 4, 17, 10	22, 16, 8
2	11, 5, 13, 18	23, 17, 9
3	13, 1, 14, 21	2, 13, 7
4	19, 4, 15	3, 14, 8
5	20, 5, 16	11, 15, 9, 6
6	3, 4, 13, 10	19, 17, 8
7	11, 5, 14, 18	20, 13, 9
8	12, 1, 15, 21	22, 14, 7
9	19, 4, 16	23, 15, 8
10	20, 5, 17	2, 16, 9, 6
11	3, 4, 15, 10	11, 13, 8
12	11, 5, 16, 18	12, 14, 9
13	12, 1, 17, 21	19, 15, 7
14	19, 13, 4	20, 16, 8
15	20, 15, 14	22, 17, 9, 6
16	3, 4, 16, 10	2, 14, 8
17	11, 5, 17, 18	3, 15, 9
18	12, 1, 13, 21	11, 16, 7
19	19, 4, 14	12, 17, 8, 6
20	20, 5, 15	19, 13, 9
21	3, 4, 15, 10	11, 14, 8
22	11, 5, 15, 18	12, 15, 9
23	12, 1, 17, 21	19, 16, 7
24	20, 5, 14	22, 13, 9, 6
25	3, 4, 16, 10	2, 15, 8
26	11, 5, 17, 18	3, 16, 9
27	12, 1, 13, 21	19, 17, 7
28	19, 4, 14	20, 19, 8
29	19, 4, 13,	20, 17, 8
30	20, 5, 15	11, 14, 9, 6

Таблица 1.3 – Результаты расчета

Значение электрических величин	Номер участка цепи							
	1	2	3	4	5		24	
I								

16	9	10	6	4	16
17	26	9	20	5	15
18	17	11	9	17	6
19	28	14	22	14	7
20	20	16	8	10	9
21	13	10	9	20	12
22	40	15	10	21	17
23	24	12	7	30	9
24	30	12	8	12	17
25	27	6	19	10	15
26	16	8	20	15	9
27	20	13	25	30	12
28	25	7	31	8	20
29	10	5	4	10	7
30	25	20	14	9	16

Задание 3. Тема: Электропривод машин и механизмов.

Задание. Определить для заданного варианта расчетную мощность двигателя и выбрать по каталогу (таблица 1.3) асинхронный двигатель, предназначенный для привода механизма с циклическим графиком нагрузки в продолжительном или повторно-кратковременном режимах работы. Провести проверку двигателя по перегрузочной способности.

В таблице 1.4 приведены моменты M_1 , M_2 , M_3 нагрузки на валу двигателя для соответствующих участков графика нагрузки, время работы t_1 , t_2 , t_3 двигателя с заданными моментами нагрузки, время паузы t_0 , частота вращения двигателя и коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения сети (рисунок 1.32).

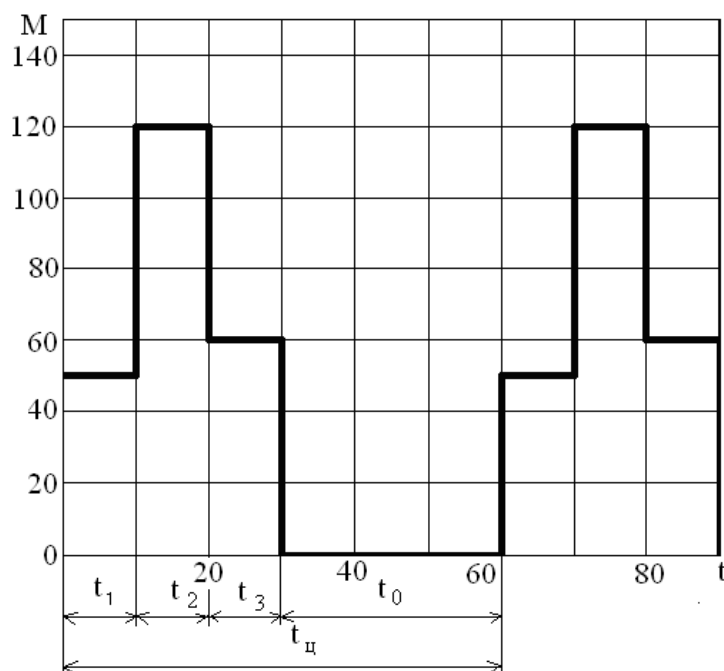


Рисунок 1.32 – Циклический график нагрузки привода механизма

Таблица 1.3 – Исходные данные для выбора асинхронного двигателя

Номер варианта	M_1 , Н · м	M_2 , Н · м	M_3 , Н · м	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_0 , с	$n_{2ном}$, об/мин	k_u
-------------------	------------------	------------------	------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------------------	-------

1	80	40	60	10	5	20	25	1410	0,95
2	120	100	95	10	10	15	55	930	0,90
3	50	20	30	10	15	10	5	915	0,85
4	150	125	145	10	20	10	60	930	0,95
5	150	130	160	10	25	20	35	1415	0,90
6	40	30	10	5	15	20	10	930	0,85
7	40	25	20	5	15	15	5	1420	0,95
8	30	15	25	5	20	10	25	950	0,90
9	20	15	10	5	10	5	60	935	0,85
10	180	140	150	5	15	15	25	1440	0,95
11	30	20	10	15	10	20	5	1440	0,90
12	30	40	60	15	5	15	5	1400	0,85
13	30	45	20	15	10	10	5	1410	0,95
14	30	50	30	15	15	10	10	940	0,90
15	200	180	170	15	20	5	60	930	0,85
16	220	230	215	10	15	10	25	940	0,95
17	20	15	25	10	10	15	5	930	0,90
18	20	45	40	10	5	10	75	950	0,85
19	25	20	15	10	15	15	60	950	0,95
20	20	25	15	10	10	5	20	1440	0,90
21	25	50	40	15	15	20	5	1400	0,85
22	25	20	L0	15	15	5	25	950	0,95
23	20	35	10	15	15	10	30	920	0,90
24	25	40	10	15	15	15	5	930	0,85
25	25	15	10	15	10	20	5	950	0,95
26	245	230	240	5	10	10	40	940	0,90
27	60	50	55	5	15	25	10	1410	0,85
28	45	10	20	5	20	10	50	950	0,95
29	45	15	10	5	10	10	75	950	0,90
30	40	20	10	5	20	5	20	1440	0,85

Таблица 1.4 – Технические данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с повышенным скольжением

Тип двигателя	$M_{II}^* =$	$M_{\max}^* =$	$s_{ном}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%			
	$M_{пуск}$	$M_{\max}$		$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	
	$M_{ном}$	$M_{ном}$														
Синхронная частота вращения 1500 об/мин																
4AC71A4Y3	2,0	2,2	8,2	0,65	67,0	0,76	0,6	68,0	0,73	0,6	68,0	0,73	0,60	68,0	0,73	
4AC71B4Y3	2,0	2,2	8,7	0,90	68,0	0,71	0,8	68,5	0,75	0,8	68,5	0,75	0,70	69,0	0,74	
4AC80A4Y3	2,0	2,2	5,6	1,3	68,5	0,82	1,3	68,5	0,82	1,1	70,0	0,80	0,95	70,5	0,79	
4AC80B4Y3	2,0	2,2	5,5	1,9	69,5	0,83	1,7	70,0	0,82	1,5	70,5	0,80	1,3	71,0	0,79	
4AC90L4Y3	2,0	2,2	5,8	2,4	76,0	0,82	2,4	76,0	0,82	2,2	76,5	0,80	1,9	77,0	0,78	
4AC100S4Y3	2,0	2,2	4,2	3,7	76,0	0,84	3,2	76,5	0,82	2,8	77,0	0,80	2,3	77,5	0,78	
4AC100L4Y3	2,0	2,2	4,1	5,0	77,0	0,84	4,3	78,0	0,82	3,8	79,0	0,80	3,3	80,0	0,78	
4AC112M4Y3	2,0	2,2	5,6	6,7	77,5	0,85	5,6	79,0	0,83	5,0	80,0	0,81	4,2	81,0	0,78	
4AC132S4Y3	2,0	2,2	6,9	9,5	82,0	0,86	8,5	82,5	0,85	7,5	83,5	0,83	7,1	84,0	0,81	
4AC132M4Y3	2,0	2,2	6,1	14,0	83,0	0,86	11,8	84,0	0,85	10,5	84,5	0,83	9,0	85,0	0,81	
4AC160S4Y3	2,0	2,2	6,1	19,0	83,5	0,86	17,0	84,5	0,86	15,0	85,5	0,85	13,0	86,0	0,84	
4AC160M4Y3	2,0	2,2	5,3	23,0	86,0	0,87	20,0	87,0	0,87	18,5	87,5	0,87	17,0	88,0	0,86	
4AC180S4Y3	2,0	2,2	5,7	24,0	84,5	0,93	21,0	86,0	0,92	20,0	86,5	0,92	19,0	87,0	0,92	
4AC180M4Y3	2,0	2,2	4,4	30,0	87,0	0,92	26,5	88,5	0,91	25,0	89,0	0,91	24,0	89,5	0,91	
4AC200M4Y3	2,0	2,2	5,7	35,0	87,0	0,93	31,5	87,5	0,92	28,0	88,0	0,92	26,0	88,0	0,92	
4AC200L4Y3	2,0	2,2	5,8	47,0	88,0	0,94	40,0	89,0	0,93	37,0	89,5	0,93	35,0	90,0	0,93	
4AC225M4Y3	2,0	2,2	5,8	55,0	87,0	0,93	50,0	87,5	0,92	45,0	88,0	0,92	40,0	88,5	0,92	
4AC250S4y3	2,0	2,2	6,3	63,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,92	53,0	88,0	0,92	50,0	88,0	0,92	
4AC250M4Y3	2,0	2,2	6,4	71,0	86,5	0,94	63,0	87,0	0,93	60,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,93	

Тип двигателя	$M_{II}^* =$	$M_{\max}^* =$	$S_{ном}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%		
	$M_{пуск}$	$M_{\max}$		$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{ном}$, кВт	η , %	$\cos\varphi$
	$M_{ном}$	$M_{ном}$													
Синхронная частота вращения 1000 об/мин															
4AC71A6Y3	2,0	2,1	10,4	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70
4AC71B6Y3	2,0	2,1	10,2	0,65	65,0	0,70	0,63	65,0	0,70	0,65	65,0	0,70	0,5	63,5	0,62
4AC80A6Y3	2,0	2,1	7,0	0,9	61,0	0,72	0,8	61,0	0,68	0,7	61,0	0,64	0,5	60,0	0,54
4AC80B6Y3	2,0	2,1	7,8	1,3	65,5	0,75	1,2	66,5	0,73	1,1	67,5	0,71	0,8	69,0	0,61
4AC90L6Y3	1,9	2,1	6,2	1,8	70,0	0,74	1,7	71,0	0,72	1,3	71,5	0,65	1,1	72,0	0,60
4AC100L6Y3	1,9	2,1	5,3	2,9	74,5	0,78	2,6	75,0	0,76	2,2	76,0	0,72	1,8	76,5	0,67
4AC112M6Y3	1,9	2,1	7,3	3,8	71,0	0,81	3,2	72,0	0,74	2,8	73,0	0,72	2,5	73,5	0,68
4AC112M6Y3	1,9	2,1	8,5	5,0	72,5	0,83	4,2	75,0	0,79	3,8	76,5	0,78	3,2	77,5	0,73
4AC132S6Y3	1,9	2,1	6,4	7,5	77,5	0,84	6,3	79,0	0,80	6,0	80,0	0,79	4,5	81,0	0,72
4AC132M6Y3	1,9	2,1	5,8	10,0	77,5	0,84	8,5	80,0	0,80	7,5	80,5	0,78	6,3	81,0	0,74
4AC160S6Y3	1,9	2,1	7,7	14,0	80,0	0,86	12,0	82,5	0,85	11,0	83,5	0,84	10,0	84,0	0,83
4AC160M6Y3	1,9	2,1	7,8	19,0	81,5	0,86	16,0	84,0	0,85	15,0	84,5	0,84	13,0	85,5	0,83
4AC180M6Y3	1,9	2,1	7,6	20,0	83,0	0,90	19,0	84,5	0,90	17,0	85,0	0,89	16,0	85,5	0,89
4AC200M6Y3	1,9	2,1	7,3	25,0	82,0	0,92	22,0	83,5	0,92	20,0	84,5	0,92	18,0	85,5	0,91
4AC200L6Y3	1,9	2,1	6,2	33,5	83,5	0,92	28,0	85,5	0,91	25,0	86,0	0,92	23,0	86,5	0,91
4AC225M6Y3	1,9	2,1	6,9	35,0	85,5	0,92	33,5	81,0	0,91	28,0	87,5	0,91	25,0	88,0	0,90
4AC250S6Y3	1,9	2,1	5,4	45,0	88,0	0,90	40,0	89,0	0,90	36,0	89,5	0,90	33,5	90,0	0,89
4AC250M6Y3	1,9	2,1	3,8	53,0	88,0	0,89	45,0	86,5	0,88	40,0	89,0	0,86	36,0	89,5	0,90

ПОРЯДОК ВЫБОРА ТЕМЫ И ОСВЕЩЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Исходные данные для расчетов заданий выдаются по многовариантным таблицам. Студент получает номер своего варианта заданий индивидуально. Предлагаемые к решению задания должны рассматриваться по мере прочтения лекционного материала. Ознакомившись с соответствующей литературой по рекомендуемому списку, студент приступает к выполнению самостоятельной работы.

СТРУКТУРА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЕЕ НАПИСАНИЮ

К оформлению самостоятельной работы предъявляются следующие требования:

1. Основные результаты, полученные при расчетах, оформляются в виде пояснительной записки, которая должна содержать титульный лист, исходные данные варианта. Структура самостоятельной работы должна соответствовать пунктам задания. Отдельные части должны иметь заголовки, комментарии и выводы. Записи и формулировки должны быть точными и ясными.

2. В ходе решения не следует изменять принятые изначально обозначения физических величин, а при численных значениях должны быть указаны единицы измерения. Графики и диаграммы рекомендуется выполнять в масштабе с указанием единиц измерения по координатным осям.

3. В конце пояснительной записки должен быть приведен список литературы, использованной при выполнении работы.

4. Пояснительная записка выполняется на листах формата А 4. Поля: верхнее и нижнее – 20 мм, левое – 30 мм, правое – 15 мм. Листы должны быть пронумерованы. Размер шрифта – 14, междустрочный интервал – полуторный. Условия заданий переписываются полностью. Схемы изображаются чертежными инструментами с соблюдением ГОСТов. Перед числовыми значениями указать номер варианта. Каждый этап решения расчетных задач содержит пояснения, формулу, постановку данных, результат расчета, единицу измерения найденных величин (в системе СИ). Вывод формул и уравнений, имеющих в литературе, в работе приводить не следует. Результаты расчета записываются с точностью до второй значащей цифры после запятой.

4 ПОРЯДОК ВЫБОРА ТЕМЫ И ОСВЕЩЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Исходные данные для расчетов заданий выдаются по многовариантным таблицам. Студент получает номер своего варианта заданий индивидуально. Предлагаемые к решению задания должны рассматриваться по мере прочтения лекционного материала. Ознакомившись с соответствующей литературой по рекомендуемому списку, студент приступает к выполнению самостоятельной работы.

5 СТРУКТУРА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЕЕ НАПИСАНИЮ

К оформлению самостоятельной работы предъявляются следующие требования:

1. Основные результаты, полученные при расчетах, оформляются в виде пояснительной записки, которая должна содержать титульный лист, исходные данные варианта. Структура самостоятельной работы должна соответствовать пунктам задания. Отдельные части должны иметь заголовки, комментарии и выводы. Записи и формулировки должны быть точными и ясными.

2. В ходе решения не следует изменять принятые изначально обозначения физических величин, а при численных значениях должны быть указаны единицы измерения. Графики и диаграммы рекомендуется выполнять в масштабе с указанием единиц измерения по координатным осям.

3. В конце пояснительной записки должен быть приведен список литературы, использованной при выполнении работы.

4. Пояснительная записка выполняется на листах формата А 4. Поля: верхнее и нижнее – 20 мм, левое – 30 мм, правое – 15 мм. Листы должны быть пронумерованы. Размер шрифта – 14, междустрочный интервал – полуторный. Условия заданий переписываются полностью. Схемы изображаются чертежными инструментами с соблюдением ГОСТов. Перед числовыми значениями указать номер варианта. Каждый этап решения расчетных задач содержит пояснения, формулу, постановку данных, результат расчета, единицу измерения найденных величин (в системе СИ). Вывод формул и уравнений, имеющих в литературе, в работе приводить не следует. Результаты расчета записываются с точностью до второй значащей цифры после запятой.

6 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, ПРИМЕРНЫЙ КАЛЕНДАРНЫЙ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ

6.1 Расчет электрической цепи постоянного тока

Система уравнений, записанная по двум законам Кирхгофа, позволяет рассчитать токи в ветвях схемы. Для нахождения токов необходимо:

выбрать произвольные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи;

составить уравнения для узлов на основании первого закона Кирхгофа. Если электрическая цепь содержит Y узлов и B ветвей, то на основании первого закона Кирхгофа необходимо составить $Y-1$ взаимно независимых уравнений.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (6.1)$$

Если ток подходит к узлу, то его значение берется со знаком "+" если отходит – со знаком "-". Для расчета необходимо:

–Выбрать произвольные направления обхода независимых контуров.

–Составить уравнения для контуров на основании второго закона Кирхгофа. Число взаимно независимых уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа, равно $n = B - B_{ит} - (Y - 1)$, где $B_{ит}$ – число ветвей с источниками тока:

$$\sum_{i=1}^n I_i \cdot R_i = \sum_{i=1}^n E_i \quad (6.2)$$

–Совместно решить систему уравнений (6.1) и (6.2), находя токи в ветвях схемы. Если в результате решения этих уравнений получится отрицательное значение какого-либо тока, то действительное его направление противоположно принятому за положительное направление.

Под методом двух узлов понимают метод расчета электрических цепей, в котором за искомое принимают напряжение между двумя узлами схемы. Напряжение между узлами находится по формуле:

$$U_{AB} = \frac{\sum E_K G_K + \sum J_K}{\sum G_K} \quad (6.3)$$

После определения напряжения U_{AB} находят ток в любой ветви N по формуле:

$$I_N = (E - U_{AB}) \cdot G_N.$$

Кроме последовательного и параллельного соединений элементов весьма распространенными являются соединения элементов треугольником и звездой (рисунок 6.1). При расчете электрических цепей оказывается полезным преобразовать треугольник в звезду или звезду в треугольник.

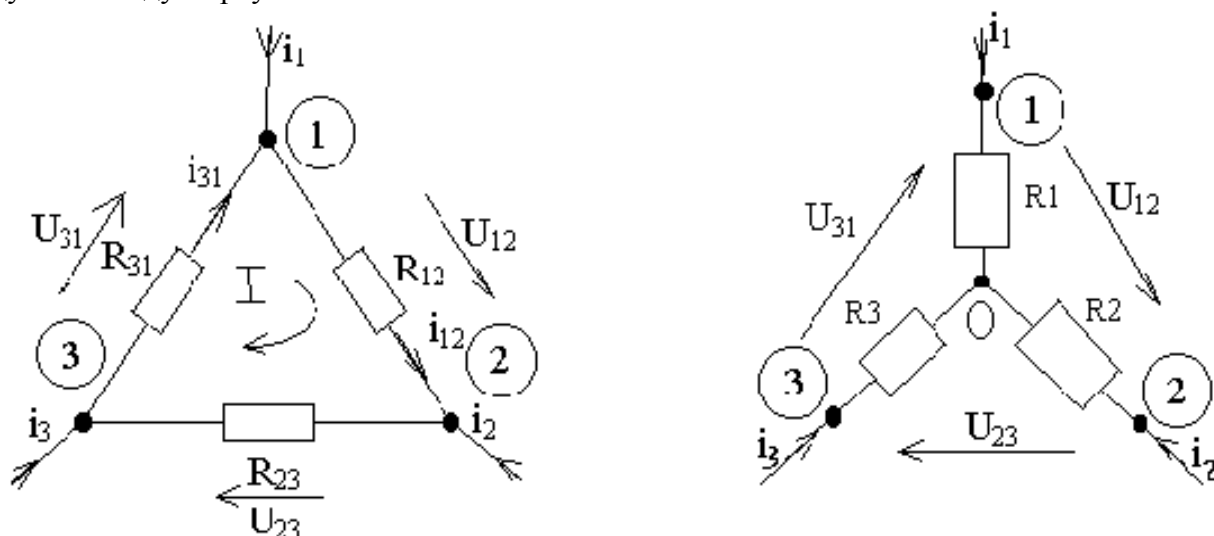


Рисунок 6.1. – Взаимные преобразования соединений «треугольник–звезда»

Существуют формулы преобразования соединения треугольника в звезду.

Формулы (6.4) дают возможность определить сопротивления сторон звезды через сопротивления сторон треугольника:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{21}R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \\ R_2 &= \frac{R_{21}R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \\ R_3 &= \frac{R_{23}R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Обратный переход можно получить по формулам, которые получены из предыдущих:

$$\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\ R_{13} &= R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} \\ R_{32} &= R_3 + R_2 + \frac{R_{13} \cdot R_2}{R_1} \end{aligned} \quad (6.5)$$

В электрической цепи, состоящей только из резистивных элементов, активная мощность источников $P_{ист}$ равна активной мощности, рассеиваемой в нагрузке P_n . Активная мощность источников напряжения

$$P_{ист} = \sum_k \pm E_k \cdot I_k, \quad (6.6)$$

где E_k, I_k – значения ЭДС и тока соответственно в ветви k . Если положительное направление ЭДС совпадает с положительным направлением тока, протекающим через источник, то мощность, создаваемая источником, является положительной; если противоположно ему, то отрицательной. Активная мощность, рассеиваемая в нагрузке:

$$P_H = \sum_k R_k I_k^2, \quad (6.7)$$

где R_k – сопротивление нагрузочного резистора. Так как в нагрузке электрическая энергия необратимо переходит в тепловую, то мощность $P_H > 0$.

6.2 Расчет трехфазной цепи

Для заданной схемы соединения нагрузки звездой линейные напряжения U_L и токи I_L связаны с фазными напряжениями U_Φ и токами I_Φ соотношениями:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi; \quad I_L = I_\Phi. \quad (6.8)$$

Действующее значение тока в любой фазной ветви определяется по закону Ома:

$$I_\Phi = \frac{U_\Phi}{Z_\Phi}, \quad (6.8)$$

где Z_Φ – полное сопротивление фазы:

$$Z_\Phi = \sqrt{R_\Phi^2 + X_\Phi^2}, \quad (6.10)$$

где R_Φ – активное сопротивление фазы; X_Φ – реактивное сопротивление фазы. Активная мощность фазы:

$$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi. \quad (6.11)$$

Активная мощность трехфазной нагрузки равна сумме активных мощностей фаз:

$$P = \sum P_\Phi. \quad (6.12)$$

Коэффициент мощности фазы ($\cos \varphi_\Phi$) определяется из выражения:

$$\cos \varphi_\Phi = \frac{R_\Phi}{Z_\Phi}. \quad (6.12)$$

Реактивная мощность трехфазной нагрузки равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = \sum Q_\Phi. \quad (6.13)$$

Реактивная мощность фазы:

$$Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi. \quad (6.14)$$

При расчете мощности Q_Φ необходимо учитывать, что при индуктивном характере сопротивления фазы угол $\varphi_\Phi > 0$, а при емкостном – $\varphi_\Phi < 0$. Поэтому при

суммировании реактивная мощность фазы с емкостным характером сопротивления берется со знаком «минус».

Полная мощность трехфазной нагрузки:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.15)$$

Ток в нулевом проводе определится графически по векторной диаграмме на основании комплексного уравнения, составленного по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad (6.16)$$

При построении векторной диаграммы углы сдвига по фазе между векторами тока и напряжения определяются из выражения:

$$\varphi_\Phi = \arccos \frac{R_\Phi}{Z_\Phi} \quad (6.17)$$

6.3 Определение мощности двигателя.

Нормальная безаварийная работа двигателя возможна только тогда, когда его действительный режим не превышает условий номинального режима, для работы в котором электродвигатель построен на заводе. Номинальный режим характеризуется определенными параметрами: мощностью $P_{НОМ}$, напряжением $U_{НОМ}$, током $I_{НОМ}$, частотой вращения $n_{НОМ}$ и рядом других. Эти величины называются номинальными и указываются в специальных каталогах или паспорте электродвигателя. Номинальный момент двигателя обычно в паспорте не указывают. Его вычисляют по номинальной мощности и номинальной частоте вращения двигателя по следующей формуле:

$$M_{НОМ} = 9,55 \cdot P_{НОМ} / n_{НОМ} \quad (6.18)$$

Все методы проверки при выборе двигателя сводятся к условию, что среднее значение мощности потерь в двигателе не должно превышать мощность потерь при максимальной нагрузке. На практике применяют методы, основанные на расчете эквивалентных значений тока, моментов, мощности.

Выбор мощности двигателя для повторно-кратковременного режима работы.

Для повторно-кратковременного режима работы электропривода, когда периоды работы чередуются с паузами, при которых двигатель отключается или работает на холостом ходу, номинальная мощность электродвигателя определяется для одного из значений относительной продолжительности включения $ПВ_{СТ}$ (15, 25, 40, 60%).

Относительная продолжительность включения двигателя

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{\sum_{k=1}^n t_k + t_0} \cdot 100\% \quad (6.24)$$

где t_p, t_0 – время работы и паузы соответственно.

Если окажется, что $ПВ\% > 60\%$, тогда двигатель выбирается как для продолжительного режима, если $ПВ\% < 10\%$ – как для кратковременного режима работы. Если же $ПВ\%$ оказывается вне указанных границ, то рассчитывают эквивалентную мощность двигателя $P_{ЭКВ}$, затем определяют по нагрузочной диаграмме значение реаль-

ной относительной продолжительности включенного состояния $PB_P\%$. Найденную эквивалентную мощность $P_{ЭКВ}$ пересчитывают для ближайшего стандартного значения $PB_{СТ} \%$ по упрощенной формуле, беря значения продолжительности включенного состояния в относительных единицах, расчетная мощность

$$P_P = P_{ЭКВ} \sqrt{\frac{PB_P \%}{PB_{СТ} \%}} \quad (6.19)$$

По каталогу выбирается двигатель с номинальной мощностью $P_{ДВ НОМ} > P_P$ при используемой в расчете $PB_{СТ} \%$.

Если переменная нагрузка задана в виде графической зависимости $M(t)$ – нагрузочная диаграмма моментов (рисунок), для определения мощности двигателя используется метод эквивалентного момента. Эквивалентный момент на валу двигателя:

$$M_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}}, \quad (6.20)$$

где M_k – значения момента на валу двигателя в промежутки времени t_k , N – число ступеней графика нагрузки.

Эквивалентная мощность двигателя

$$P_{ЭКВ} = 0,105 M_{ЭКВ} n_{НОМ}. \quad (6.23)$$

Номинальную мощность двигателя выбирают исходя из условия

$$P_{ДВ НОМ} \geq P_P = P_{ЭКВ} \sqrt{\frac{PB_P \%}{PB_{СТ} \%}}, \quad (6.20)$$

где $PB_{СТ} \%$ – стандартное значение относительной продолжительности включения, указанное в паспорте двигателя.

В соответствии с P_P для стандартной продолжительности включения $PB_{СТ}$ выбираем из каталога двигатель с техническими данными: $P_{ДВ НОМ}$, $n_{НОМ}$, $\lambda_{МОМ}$.

Номинальный момент двигателя рассчитываем по формуле (6.18).

В течение короткого промежутка времени двигатель может развивать мощность значительно большую, чем номинальная. Мгновенная перегрузочная мощность двигателя – это наибольшая мощность на валу в течение малого промежутка времени, развиваемая двигателем без каких-либо повреждений. Мгновенные перегрузочные свойства двигателя обычно характеризуются коэффициентом перегрузки по моменту $\lambda_{МОМ}$, т. е. отношением максимального кратковременно допустимого перегрузочного момента к номинальному моменту: $\lambda_{МОМ} = M_{МАХ} / M_{НОМ}$. Для большинства двигателей $\lambda_{МОМ} = 1,6 \dots 2,5$ (у специальных электродвигателей $\lambda_{МОМ} = 3 \dots 4$).

Проверку двигателя по перегрузочной способности производят путем сравнения наибольшего момента нагрузки $M_{НБ}$, определяемого по графику нагрузки, с максимальным моментом двигателя

$$M_{МАХ} = \lambda_{МОМ} \cdot M_{НОМ}. \quad (6.22)$$

Необходимо выполнить условие

$$M_{НБ} < k_U \cdot M_{МАХ}, \quad (6.23)$$

где k_U – коэффициент, учитывающий снижение напряжения сети.

Если перегрузочная способность двигателя по условию (6.23) не достаточна, то из каталога выбирается двигатель с большей мощностью.

Выбор двигателя для продолжительного режима.

Если двигатель предназначен для работы в продолжительном режиме при переменной нагрузке (рис.), эквивалентный момент на валу двигателя рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N + k_2 t_0}}, \quad (6.20)$$

где M_k – значения момента на валу двигателя в промежутки времени t_k , k_2 – коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи во время паузы. Для асинхронных двигателей $k_2 = 0,25$. Предварительный выбор электродвигателя производится исходя из условия $P_{\text{ДВНОМ}} > P_{\text{ЭКВ}}$, а затем выполняется проверочный расчет по перегрузочной способности.

6.4 Календарный план выполнения самостоятельной работы

Успешное выполнение самостоятельной работы зависит от систематического и планомерного выполнения графика календарного плана.

Таблица 4 – Сроки представления материалов самостоятельной работы

Ра зделы задания	Наименование разделов	Объём в %	Срок Представл ения
	Выдача задания на контрольную работу	–	1 неделя
1	Расчет цепи постоянного тока	3 0%	2 – 4 неделя
2	Расчет трехфазной цепи	3 5%	4 – 6 неделя
3	Определение мощности двигателя	2 5%	6 – 8 неделя
4	Представление самостоятельной работы на проверку преподавателю	1 00%	9 неделя
5	Защита работы		10 неделя

7 ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТУДЕНТА ЗА ВЫПОЛНЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Студент допускается к защите самостоятельной работы, если в ней не содержится ошибок принципиального характера и соблюдены все требования, предъявляемые к оформлению.

Защита самостоятельной работы осуществляется в устной форме после ее проверки преподавателем и отметки о разрешении к защите.

Самостоятельная работа должна быть выполнена самостоятельно каждым студентом и защищена. Полностью выполненная работа сдается преподавателю на проверку за неделю до указанного срока. Исправление ошибок делать на обратной

стороне листа. Не допускается стирать замечания преподавателя или заменять листы новыми. Работа считается защищенной, если студент успешно прошел собеседование.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ДОМАШНЕЙ РАБОТЫ

Написание домашней работы по дисциплине «Электротехника и электроника» является одним из видов самостоятельной работы студентов по изучению предмета. Данный вид работы способствует повышению качества усвоения программного материала, углубленному пониманию наиболее сложных вопросов курса, расширению круга рассматриваемых проблем.

Критерии оценки работы

- актуальность темы исследования;
- соответствие содержания теме;
- глубина проработки материала; правильность и полнота использования источников;
- соответствие оформления работы стандартам.

По усмотрению преподавателя работы могут быть представлены как зачетные работы по пройденным темам.

Оценкой «отлично» оценивается работы, в котором соблюдены следующие требования: полно и четко представлены основные теоретические понятия; проведен глубокий анализ по проблеме; продемонстрировано знание методологических основ изучаемой проблемы; уместно и точно использованы различные иллюстративные приемы – примеры, схемы, таблицы и т. д.; показано знание межпредметных связей; работа написана с использованием терминов современной науки, хорошим русским языком, соблюдена логическая стройность работы; соблюдены все требования к оформлению работы.

Оценкой «хорошо» оценивается работа, в котором в целом раскрыта актуальность темы; в основном представлен обзор основной литературы по данной проблеме; недостаточно использованы последние публикации по данному вопросу; выводы сформулированы недостаточно полно; собственная точка зрения отсутствует или недостаточно аргументирована; в изложении преобладает описательный характер

Оценка «удовлетворительно» выставляется при условии: изложение носит исключительно описательный, компилятивный характер; библиография ограничена; изложение отличается слабой аргументацией; работа не выстроена логически; недостаточно используется научная терминология; выводы тривиальны; имеются существенные недостатки в оформлении.

Если большинство изложенных требований к работе не соблюдено, то он не засчитывается.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСПЕКТИРОВАНИЮ ПЕРВОИСТОЧНИКОВ

Конспектирование – процесс мысленной переработки и письменной фиксации информации, в виде краткого изложения основного содержания, смысла какого-либо текста.

Результат конспектирования – запись, позволяющая конспектирующему немедленно или через некоторый срок с нужной полнотой восстановить полученную информацию. Конспект в переводе с латыни означает «обзор». По существу его и составлять надо как обзор, содержащий основные мысли текста без подробностей и второстепенных деталей. Конспект носит индивидуализированный характер: он рассчитан на самого автора и поэтому может оказаться малопонятным для других.

Для того чтобы осуществлять этот вид работы, в каждом конкретном случае необходимо грамотно решить следующие задачи:

1. Сориентироваться в общей композиции текста (уметь определить вступление, основную часть, заключение).
2. Увидеть логико-смысловую канву сообщения, понять систему изложения автором информации в целом, а также ход развития каждой отдельной мысли.
3. Выявить «ключевые» мысли, т. е. основные смысловые вехи, на которые «нанизано» все содержание текста.
4. Определить детализирующую информацию.
5. Лаконично сформулировать основную информацию, не перенося на письмо все целиком и дословно.

Во всяком научном тексте содержится информация 2-х видов: основная и вспомогательная. Основной является информация, имеющая наиболее существенное значение для раскрытия содержания темы или вопроса. К ней относятся: определения научных понятий, формулировки законов, теоретических принципов и т. д. Назначение вспомогательной информации – помочь читателю лучше усвоить предлагаемый материал. К этому типу информации относятся разного рода комментарии. Основную – записываем как можно полнее, вспомогательную, как правило, опускаем. Содержание конспектирования составляет переработка основной информации в целях ее обобщения и сокращения. Обобщить – значит представить ее в более общей, схематической форме, в виде тезисов, выводов, отдельных заголовков, изложения основных результатов и т. п. Читая, мы интуитивно используем некоторые слова и фразы в качестве опорных. Такие опорные слова и фразы называются ключевыми. Ключевые слова и фразы несут основную смысловую и эмоциональную нагрузку содержания текста.

Выбор ключевых слов – это первый этап смыслового свертывания, смыслового сжатия материала.

Важными требованиями к конспекту являются наглядность и обозримость записей и такое их расположение, которое давало бы возможность уяснить логические связи и иерархию понятий.

По форме конспекты подразделяются на формализованные и графические.

1. Формализованные (все записи вносятся в заранее подготовленные таблицы).

Это удобно, во-первых, при конспектировании материалов, когда перечень характеристик описываемых предметов или явлений более или менее постоянен, во-вторых, при подготовке единого конспекта по нескольким источникам. Особенно если есть необходимость сравнения отдельных данных. Разновидностью формализованного конспекта является запись, составленная в форме ответов на заранее подготовленные вопросы, обеспечивающие исчерпывающие характеристики однотипных предметов или явлений.

2. Графические (элементы конспектируемой работы располагаются в таком виде, при котором видна иерархия понятий и взаимосвязь между ними).

По каждой работе может быть не один, а несколько графических конспектов, отображающих книгу в целом и отдельные ее части. Ведение графического конспекта – наиболее совершенный способ изображения внутренней структуры книги, а сам этот процесс помогает усвоению ее содержания.

Можно выделить следующие основные **типы конспектов: плановый, текстуальный, сводный, тематический.**

Плановый – легко получить с помощью предварительно сделанного плана произведения, каждому вопросу плана отвечает определенная часть конспекта:

а) вопросно-ответный (на пункты плана, выраженные в вопросительной форме, конспект дает точные ответы);

б) схематичный плановый конспект (отражает логическую структуру и взаимосвязь отдельных положений).

Текстуальный – это конспект, созданный в основном из цитат.

Сводный конспект – сочетает выписки, цитаты, иногда тезисы; часть его текста может быть снабжена планом.

Тематический – дает более или менее исчерпывающий ответ (в зависимости из числа привлеченных источников и другого материала, например, своих же записей) на поставленный вопрос – тему: обзорный; хронологический.

Роль конспекта – чисто учебная: он помогает зафиксировать основные понятия и положения первичного текста и в нужный момент их воспроизвести, например, при написании реферата или подготовке к экзамену.

Способы конспектирования.

- **Тезисы** – это кратко сформулированные основные мысли, положения изучаемого материала. Тезисы лаконично выражают суть читаемого, дают возможность раскрыть содержание. Приступая к освоению записи в виде тезисов, полезно в самом тексте отмечать места, наиболее четко формулирующие основную мысль, которую автор доказывает (если, конечно, это не библиотечная книга). Часто такой отбор облегчается шрифтовым выделением, сделанным в самом тексте.

- **Линейно-последовательная запись текста.** При конспектировании линейно – последовательным способом целесообразно использование плакатно-оформительских средств, которые включают в себя следующие:

- сдвиг текста конспекта по горизонтали, по вертикали;
- выделение жирным (или другим) шрифтом особо значимых слов;
- использование различных цветов;
- подчеркивание;
- заключение в рамку главной информации.

- **Способ «вопросов – ответов».** Он заключается в том, что, поделив страницу тетради пополам вертикальной чертой, конспектирующий в левой части страницы самостоятельно формулирует вопросы или проблемы, затронутые в данном тексте, а в правой части дает ответы на них.

Одна из модификаций способа «вопросов – ответов» - таблица, где место вопроса занимает формулировка проблемы, поднятой автором (лектором), а место ответа – решение данной проблемы. Иногда в таблице могут появиться и дополнительные графы: например, «мое мнение» и т. п.

- **Схема с фрагментами** – способ конспектирования, позволяющий ярче выявить структуру текста, - при этом фрагменты текста (опорные слова, словосочетания, пояснения всякого рода) в сочетании с графикой помогают созданию рационально - лаконичного конспекта.

- **Простая схема** – способ конспектирования, близкий к схеме с фрагментами, объяснений к которой конспектирующий не пишет, но должен уметь давать их устно. Этот способ требует высокой квалификации конспектирующего. В противном случае такой конспект нельзя будет использовать.

- **Параллельный способ** конспектирования. Конспект оформляется на двух листах параллельно или один лист делится вертикальной чертой пополам и записи делаются в правой и в левой части листа.

Однако лучше использовать разные способы конспектирования для записи одного и того же материала.

Комбинированный конспект – вершина овладения рациональным конспектированием. При этом умело используются все перечисленные способы, сочетая их в одном конспекте (один из видов конспекта свободно перетекает в другой в

зависимости от конспектируемого текста, от желания и умения конспектирующего). Именно при комбинированном конспекте более всего проявляется уровень подготовки и индивидуальность студента.

Принципы составления конспекта прочитанного.

1. Записать все выходные данные источника: автор, название, год и место издания. Если текст взят из периодического издания (газеты или журнала), то записать его название, год, месяц, номер, число, место издания.

2. Выделить поля слева или справа, можно с обеих сторон. Слева на полях отмечаются страницы оригинала, структурные разделы статьи или книги (названия параграфов, подзаголовки и т. п.), формулируются основные проблемы. Справа – способы фиксации прочитанной информации.

Один из видов чтения – углубленное – предполагает глубокое усвоение прочитанного и часто сохранение информации в целях последующего обращения к ней. Эффективность такого чтения повышается, если прочитанное зафиксировано не только в памяти, но и на бумаге. Психологи утверждают, что записанное лучше и полнее усваивается, прочнее откладывается в памяти. Установлено, что если прочитать 1000 слов и затем записать 50, подытоживающих прочитанное, то коэффициент усвоения будет выше, чем, если прочитать 10000 слов, не записав ни одного. Кроме того, при записи прочитанного формируется навык свертывания информации. И, наконец, чередование чтения и записывания уменьшает усталость, повышает работоспособность и производительность умственного труда.

1. Резюмирование.

Резюме – краткий итог прочитанного, содержащий его оценку. Резюме характеризует основные выводы книги, главные итоги.

Выбор языковых средств для построения резюме-выводов подчинен основной задаче свертывания информации: минимум языковых средств – максимум информации. Это обычно одно – три четких, кратких, выразительных предложения, раскрывающих, по мнению автора, самую суть описываемого объекта.

2. Аннотация.

Аннотация – краткая обобщенная характеристика печатной работы (книги, статьи), включающая иногда и его оценку. Это наикратчайшее изложение содержания первичного документа, дающее общее представление о теме.

Основное ее назначение – дать некоторое представление о книге (статье, научной работе) с тем, чтобы рекомендовать ее определенному кругу читателей или воспользоваться своими записями при выполнении работы исследовательского, реферативного характера. Поэтому аннотации не требуют изложения содержания произведения, в ней лишь перечисляются вопросы, которые освещены в первоисточнике (содержание этих вопросов не раскрывается). Аннотация отвечает на вопрос: «О чем говорится в первичном тексте?», дает представление только о главной теме и перечне вопросов, затрагиваемых в тексте первоисточника.

Текст аннотации не стандартизирован. В научной литературе можно встретить различные требования к составлению аннотаций. Например, текст справочной аннотации может включать следующие сведения:

- тип и название аннотируемого документа (монография, диссертация, сборник, статья и т. п.)
- задачи, поставленные автором аннотируемого документа
- метод, которым пользовался автор (эксперимент, сравнительный анализ, компиляция других источников)
- принадлежность автора к определенной научной школе или направлению
- структуру аннотируемого документа

- предмет и тему произведения, основные положения и выводы автора
- характеристику вспомогательных иллюстративных материалов, дополнений, приложений, справочного аппарата, включая указатели и библиографию.

Форма отчетности о результатах самостоятельной работы по дисциплине

- отчеты по лабораторным работам;
- отчет по домашней работе;
- конспект первоисточников;
- тест

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Федоров, С.В. Электроника : учебник / С.В. Федоров, А.В. Бондарев ; Министерство образования и науки Российской Федерации. - Оренбург : ОГУ, 2015. - 218 с. : табл., граф., схем. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-7410-1368-7 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438991>(22.04.2019).
2. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника : учеб. пособие / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – М. : Академия, 2013. – 400 с. : ил. – (Высшее профессиональное образование. Электротехника). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 389. – ISBN 978-5-7695-9778-7

Дополнительная литература:

1. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, В.И. Хатников и др. ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники (ТУСУР). - Томск : ТУСУР, 2015. - Ч. 1. Установившиеся режимы в линейных электрических цепях. - 189 с. : схем., ил. - Библиогр. в кн. ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480917> (22.04.2019).
2. Джонс, М. Х. Электроника – практический курс / М. Джонс ; пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. – 2-е изд., испр. – М. : Техносфера, 2013. – 512 с. – (Мир электроники). – Прилож.: с. 478-497. – Библиогр.: с. 498-499. – Предм. указ.: с. 500-510. – ISBN 978-5-94836-341-7

Интернет-ресурсы:

- 1 <http://catalog.ncstu.ru> – электронные каталоги Ассоциации электронных библиотек учебных заведений и организаций СКФО;
- 2 <http://window.edu.ru> – информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам".

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Электротехника и электроника

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Направление подготовки	20.03.01 Техносферная безопасность
Направленность (профиль)	Пожарная безопасность

Оглавление

Введение.....	5
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1</u>	40
Исследование линейных цепей постоянного тока (3 ч)	
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2</u>	77
<u>Последовательное соединение потребителей однофазного переменного тока.</u>	
<u>Резонанс напряжений и токов в цепях синусоидального тока (3 ч)</u>	
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3</u>	116
<u>Трехфазные цепи. Исследование цепи трехфазного тока при различных</u>	
<u>схемах соединения нагрузки (3 ч)</u>	
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4</u>	142
<u>Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым</u>	
<u>ротором (3 ч)</u>	
<u>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5</u>	161
<u>Исследование характеристик диодов, стабилитронов, тиристорov (2ч)</u>	

Введение

Целью дисциплины «Электротехника и электроника» является формирование набора общекультурных и профессиональных компетенций УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений, ОПК-1 Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связано. В результате изучения дисциплины у студента формируются указанные выше компетенции, приобретаются навыки расчета однофазных и трехфазных электрических цепей, навыки работы с электрическими машинами и электрооборудованием, с измерительными приборами, а также навыки соблюдения мер безопасности при работе с электроустановками.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование линейных цепей постоянного тока (3 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 УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений, ОПК-1 Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанно.

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:

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

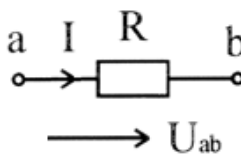


Рисунок 1.1 – Участок цепи

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.

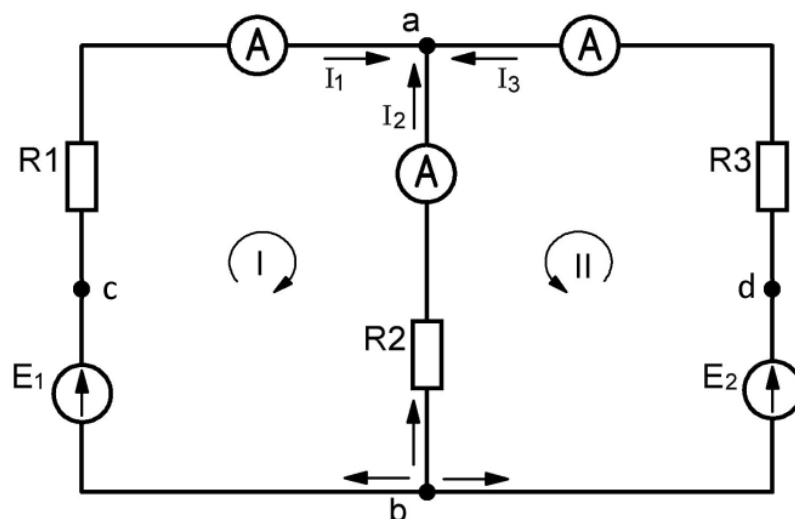


Рисунок 1.1 – Схема линейной электрической цепи постоянного тока

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).

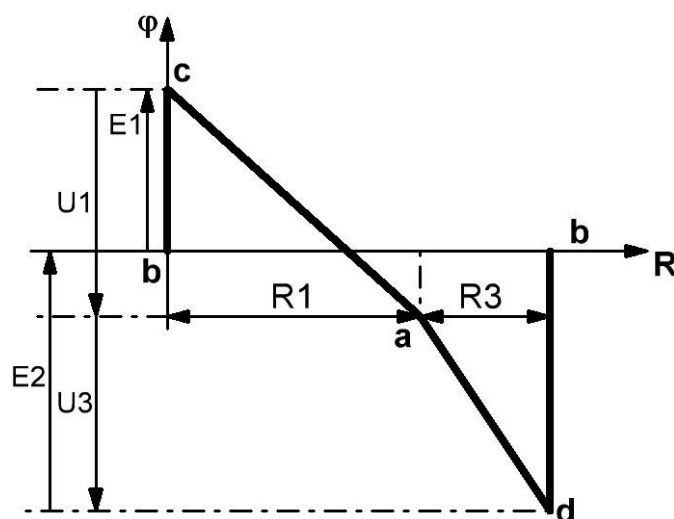


Рисунок 1.2 – Потенциальная диаграмма

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.

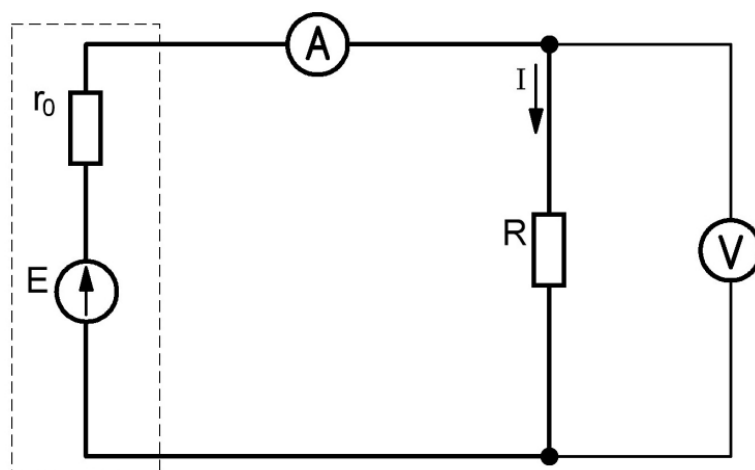


Рисунок 1.3 – Схема замещения неидеального источника напряжения

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.

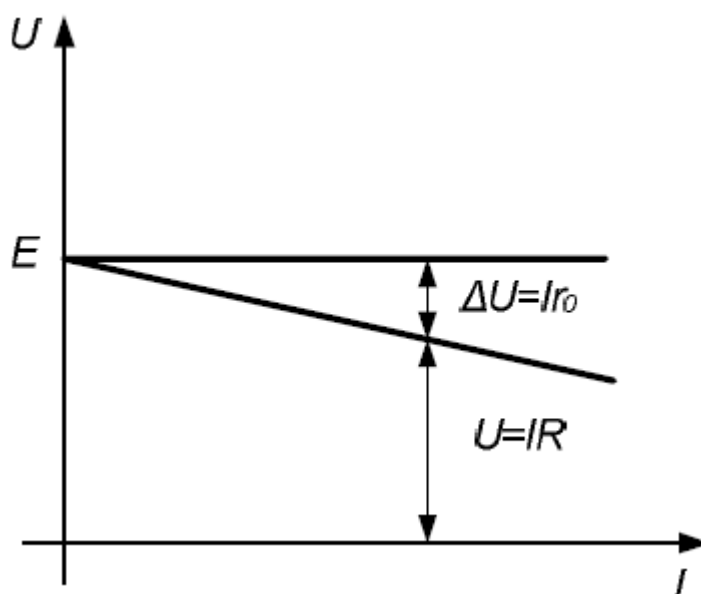


Рисунок 1.4 – Внешняя характеристика источника напряжения

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).

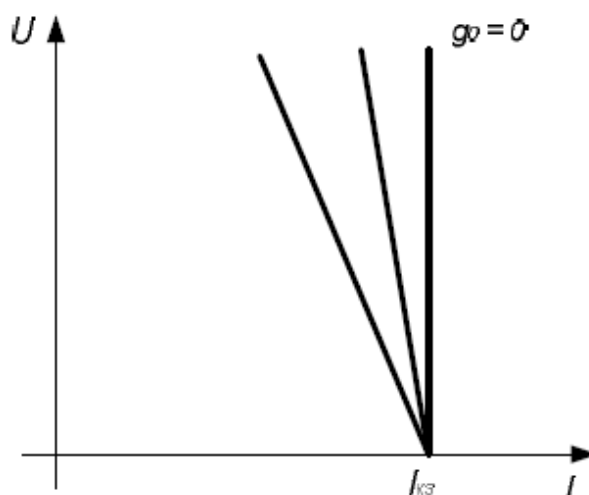


Рисунок 1.5 – Внешняя характеристика источника тока

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 $U = 0; I = I_{кз}$.

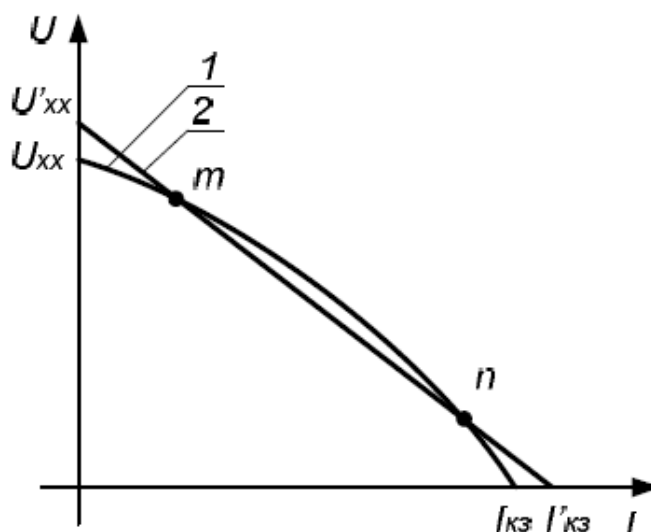


Рисунок 1.6 – Аппроксимация внешней характеристики источника тока

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 .

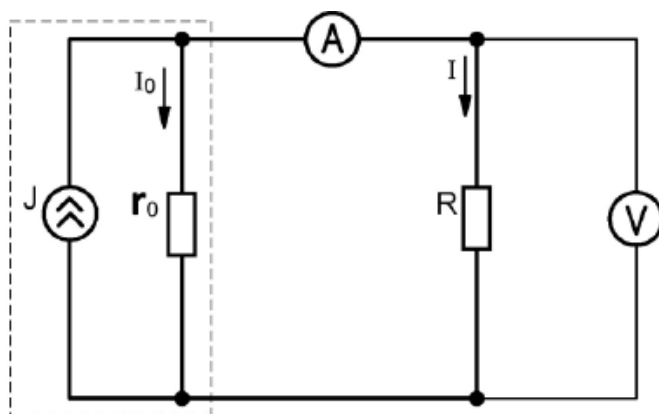


Рисунок 1.7 – Схема замещения неидеального источника тока

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).

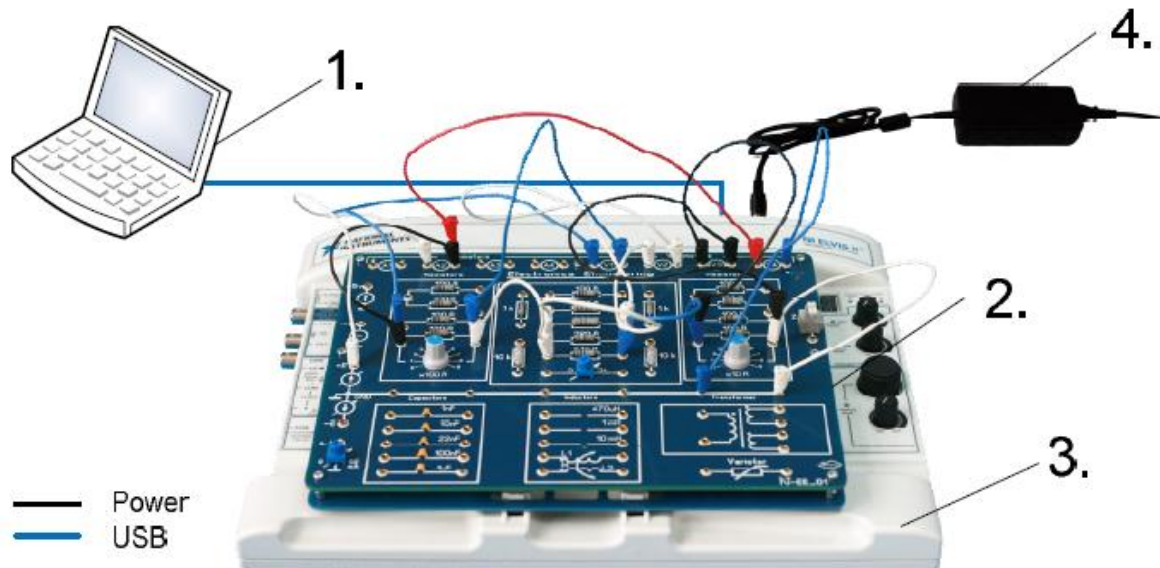


Рисунок 1.8 –Лабораторный стенд подключаемый к ПЭВМ: 1 – персональный компьютер (ПЭВМ); 2 – макетная плата; 3 – контрольно-измерительное оборудование NI ELVIS II, подключаемое к (1) по USB; 4 – Блок питания обеспечивающий электропитание NI ELVIS II и макетной платы

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):

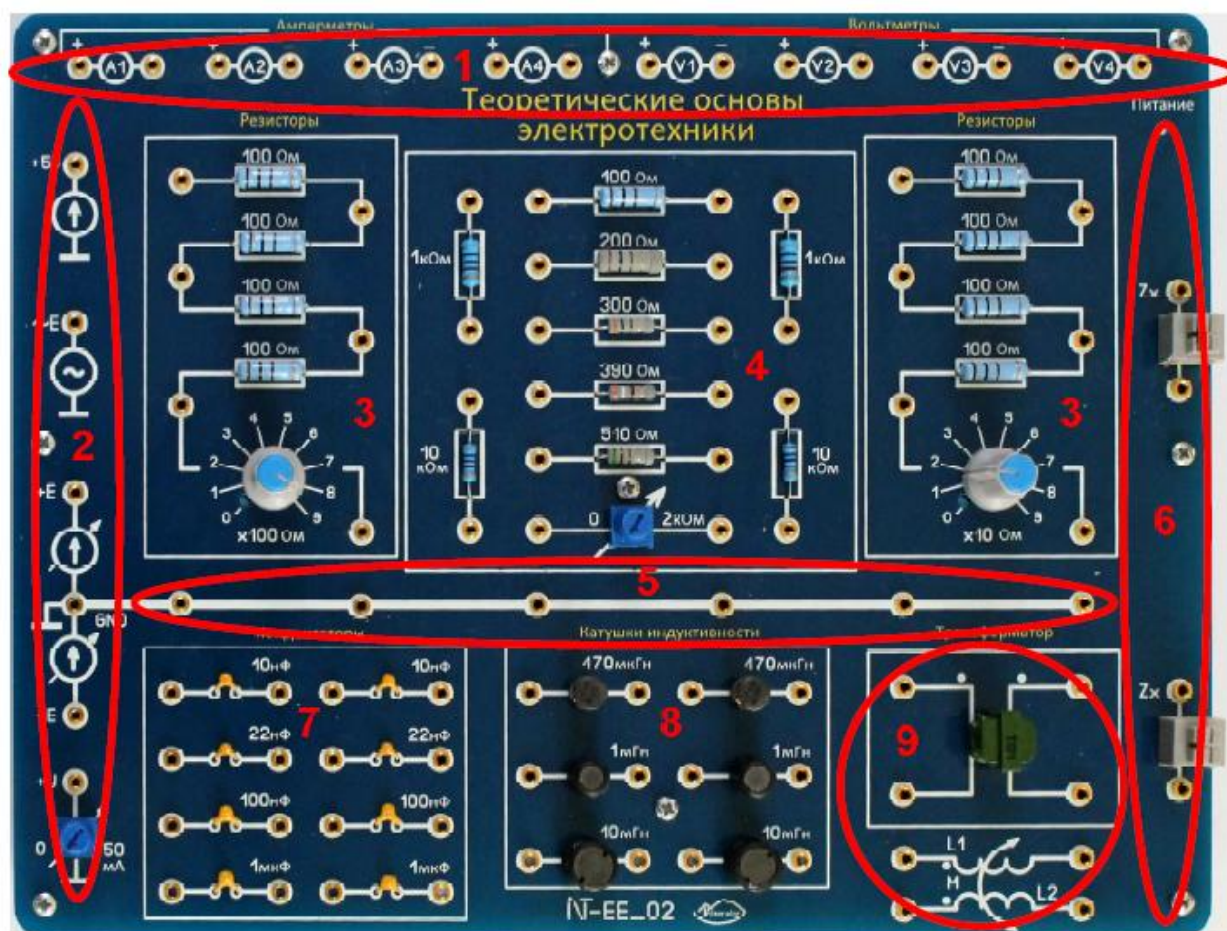


Рисунок 1.9 – Макетная плата и зоны элементов на ней

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.

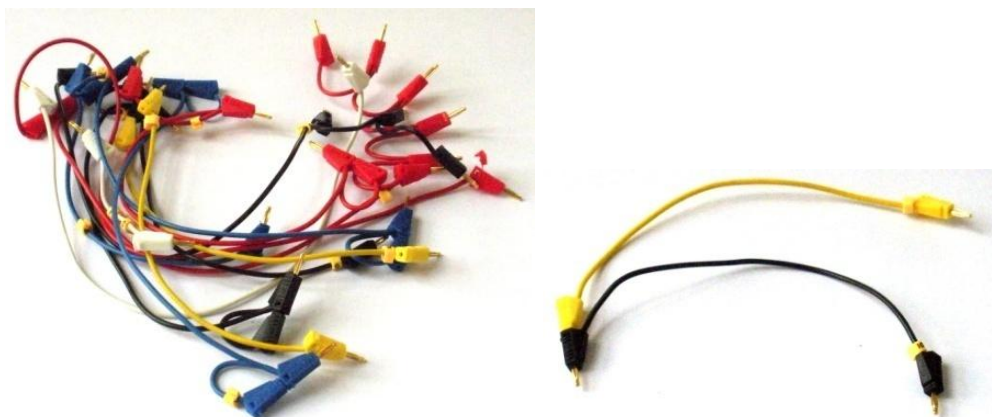


Рисунок 1.10 – Соединительные провода

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 зажечься 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.

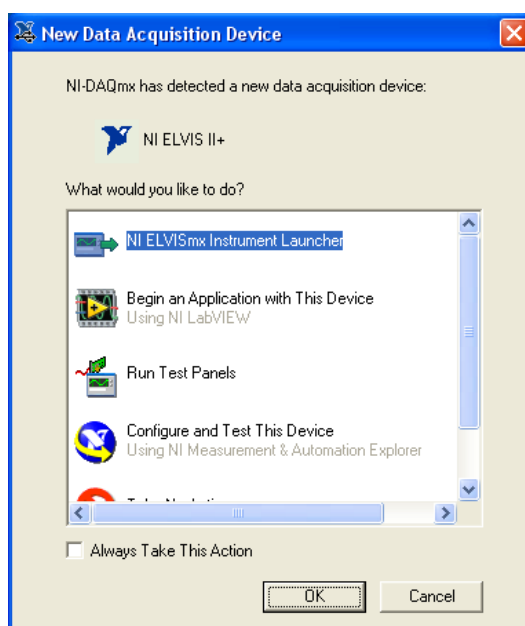


Рисунок 1.13 – Мастер выбора устройства сбора данных

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).

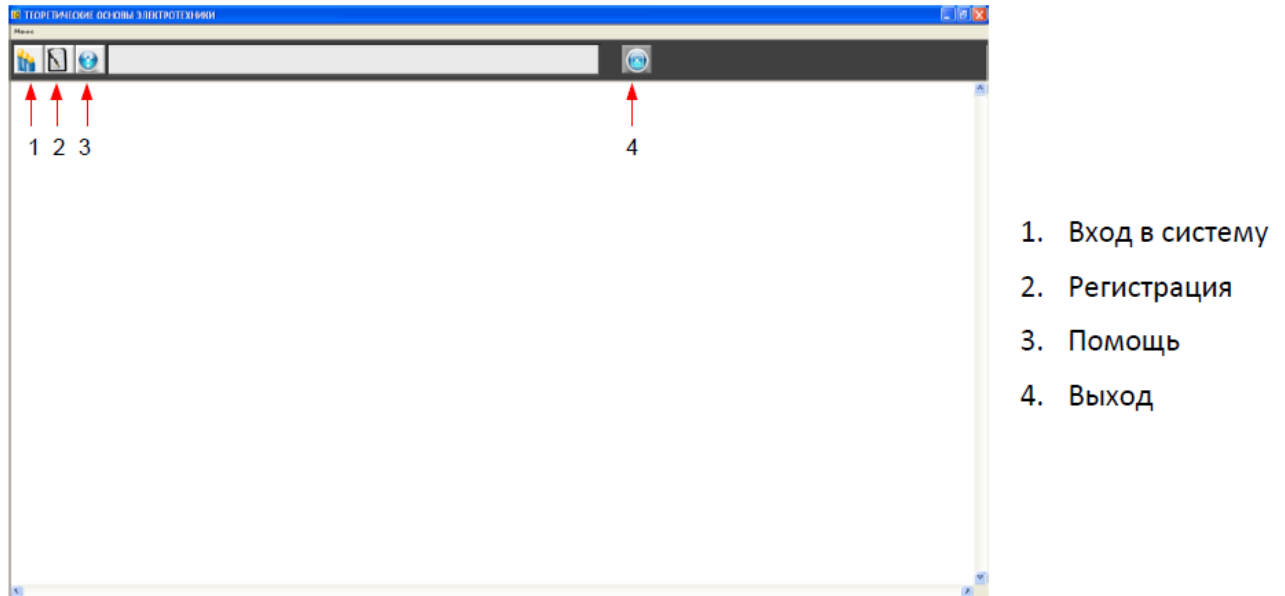


Рисунок 1.14 – Начальное окно программы

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)

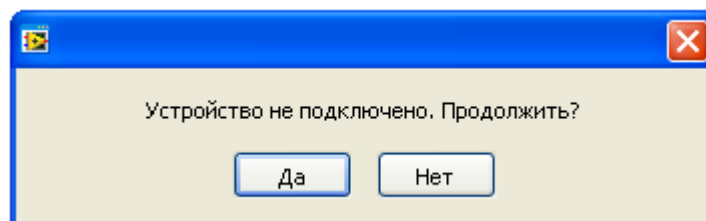


Рисунок 1.15 – Сообщение ошибки о невозможности обнаружения платы

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.

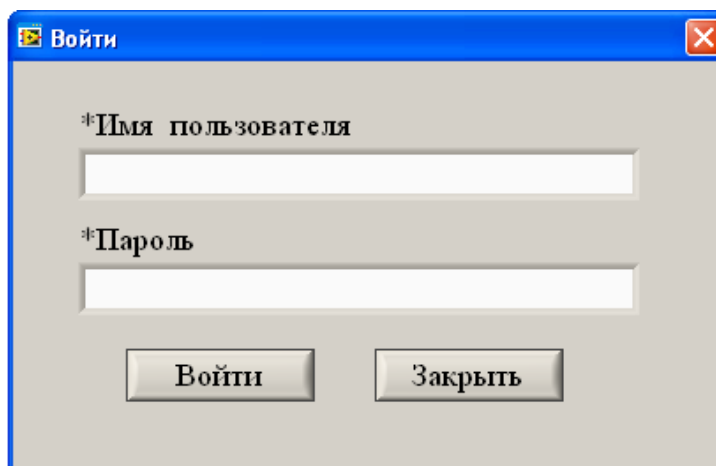


Рисунок 1.16

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

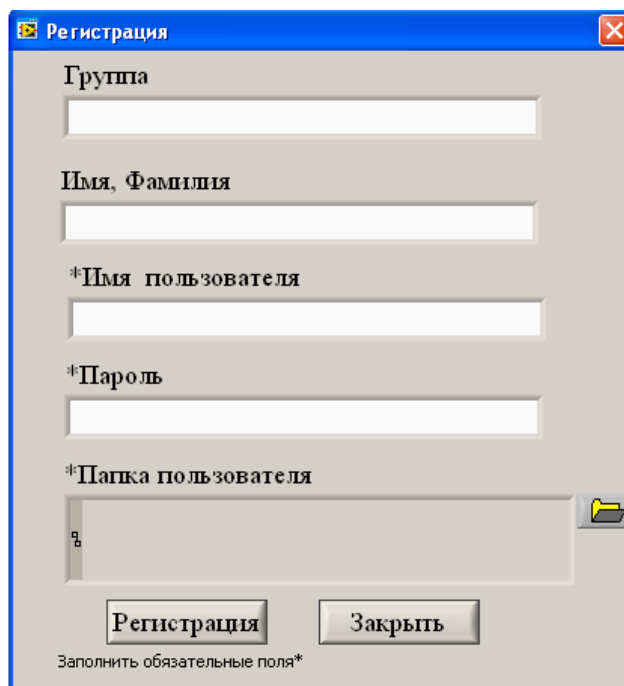


Рисунок 1.17 – Окно регистрации

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**.

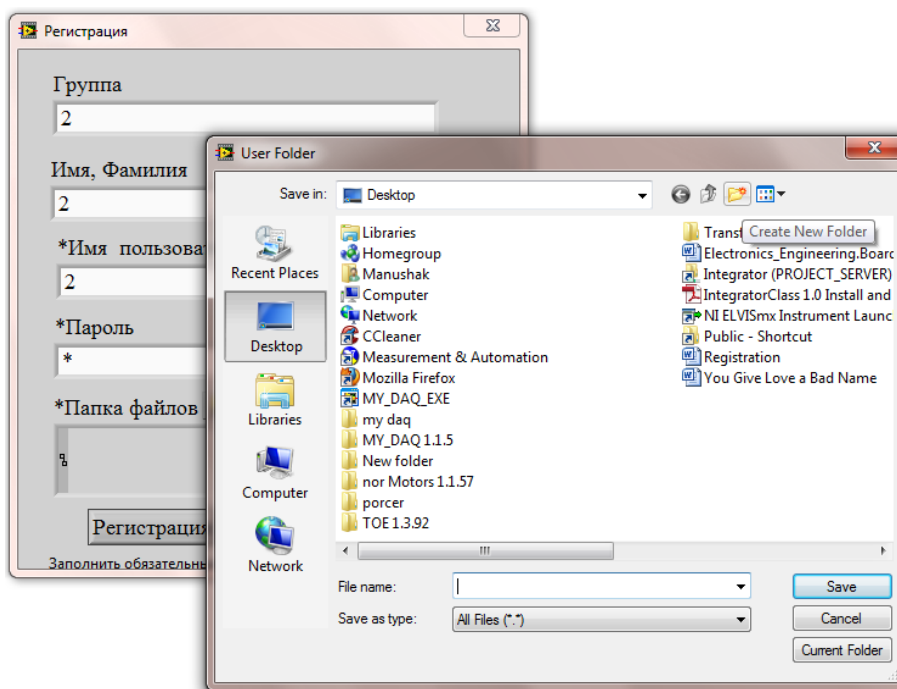


Рисунок 1.18

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

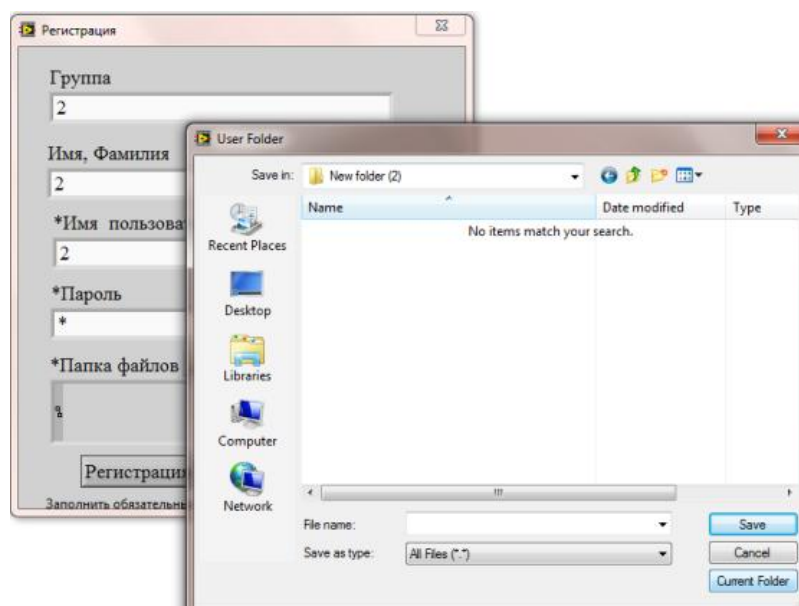


Рисунок 1.19

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.

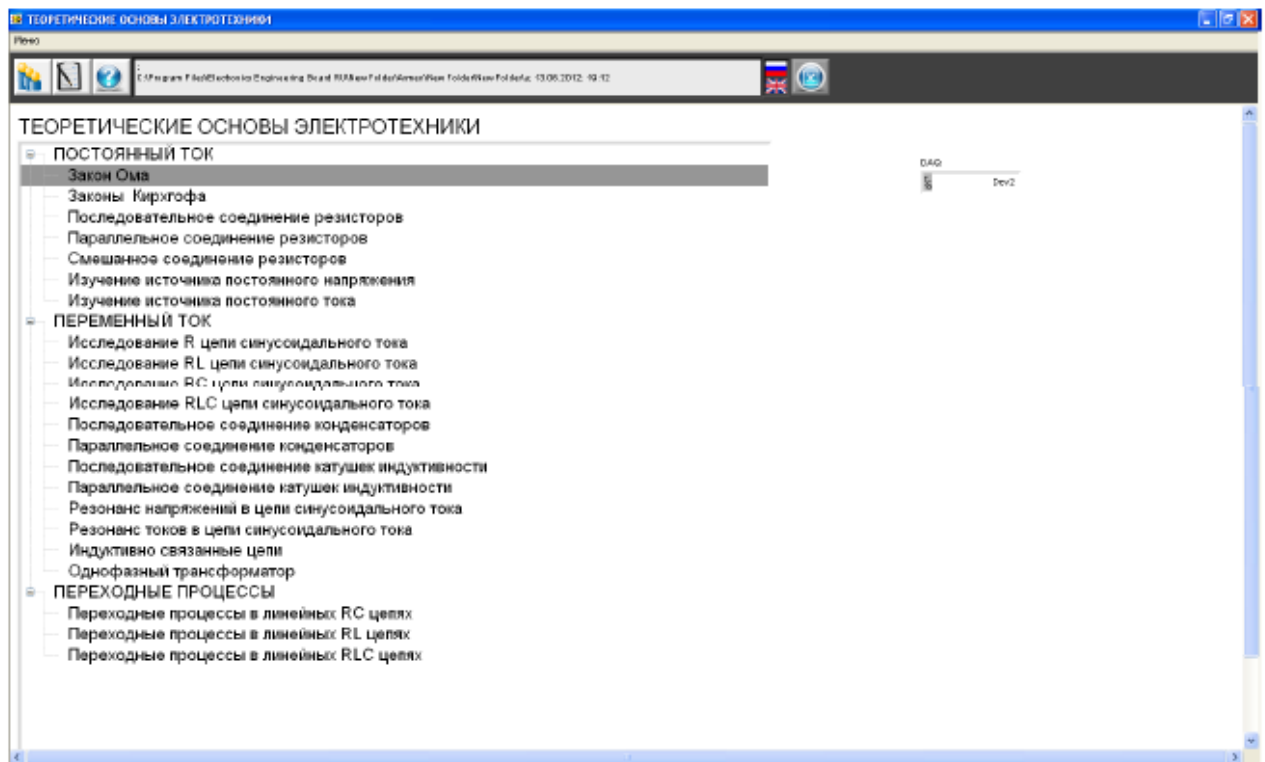


Рисунок 1.20 – Окно главного меню

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).

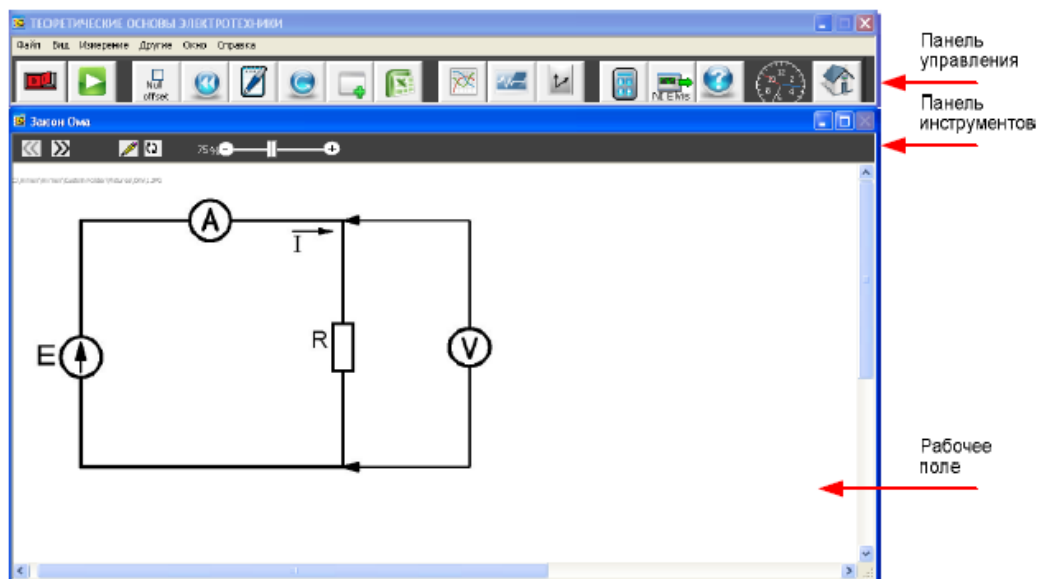


Рисунок 1.21 – Лицевая панель эксперимента «Закон Ома»

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).

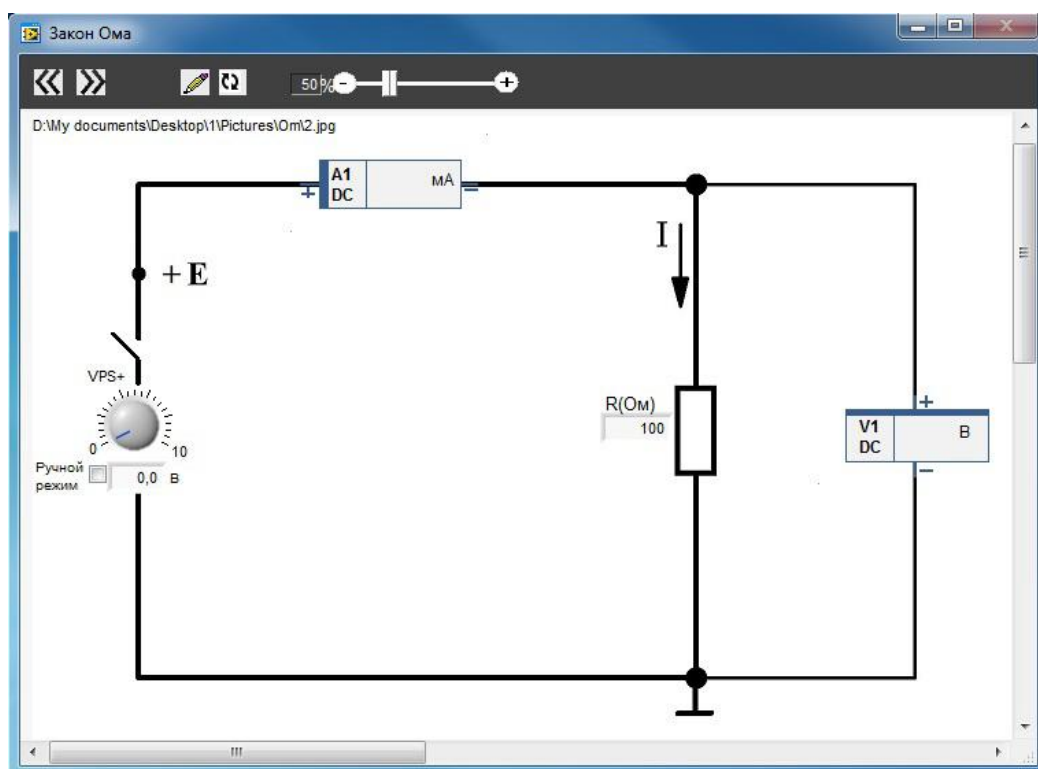


Рисунок 1.22 – Схема электрической цепи эксперимента «Закон Ома»

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.

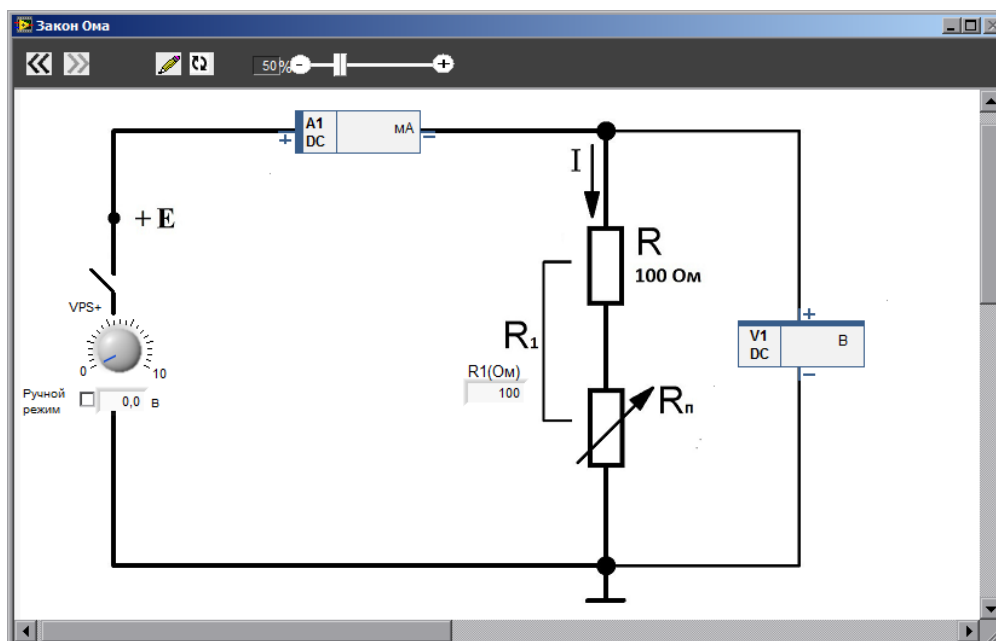


Рисунок 1.24

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 **О** (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.

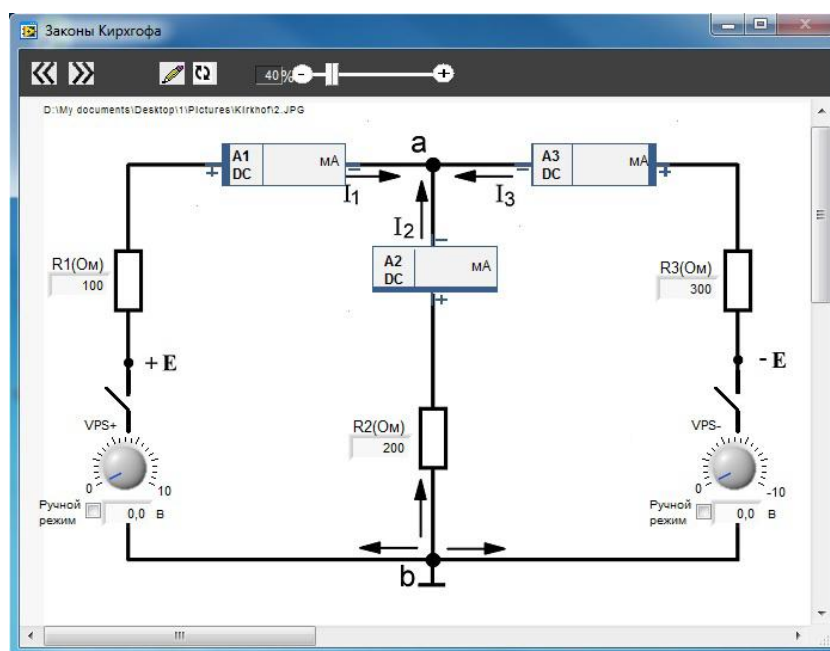


Рисунок 1.25

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).

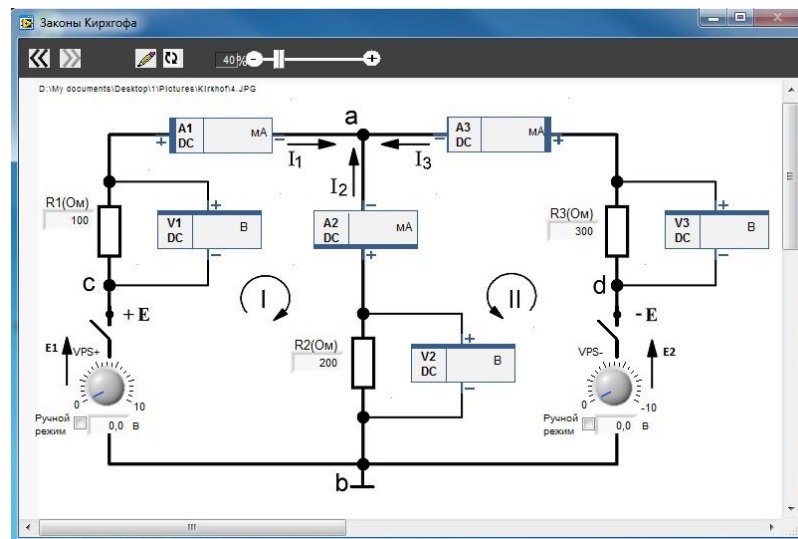


Рисунок 1.26

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 x10 Ом и x100 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.

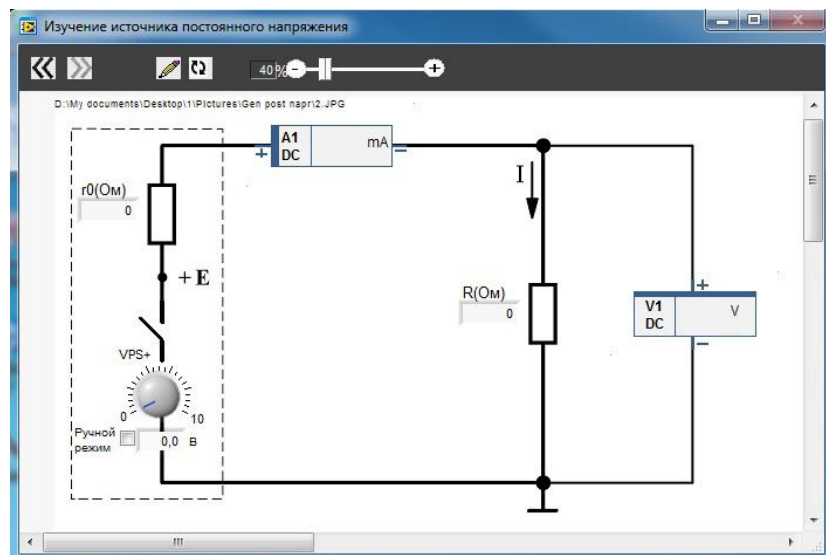


Рисунок 1.27

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.

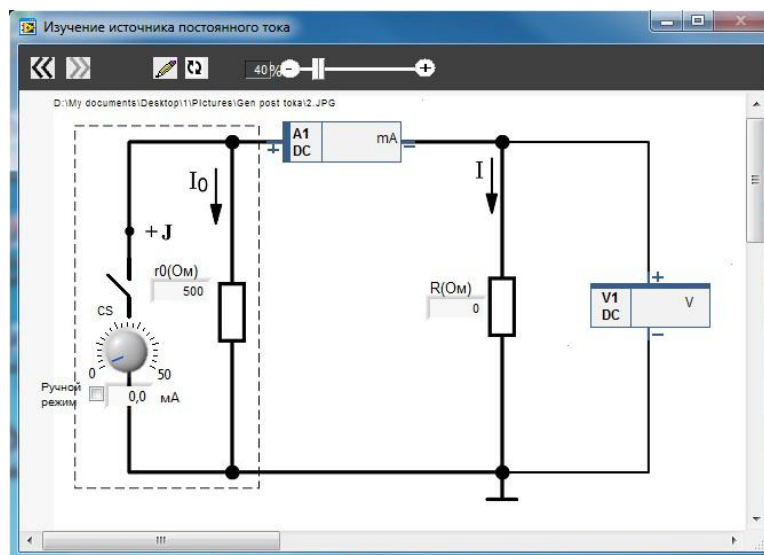


Рисунок 1.28

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	$+J$	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 х10 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 **0** (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 $R_i = \frac{V_i}{A_i}$ на каждом шаге измерения, определите относительную погрешность

$\sigma_i = \frac{R_i - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100\%$ и среднее значение сопротивления $\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$ 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 $E = VPS + \dots$. 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 $U=\text{Const. } E=$		[В]		
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

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

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 (3 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 УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений, ОПК-1 Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связано.

Теоретическое обоснование

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

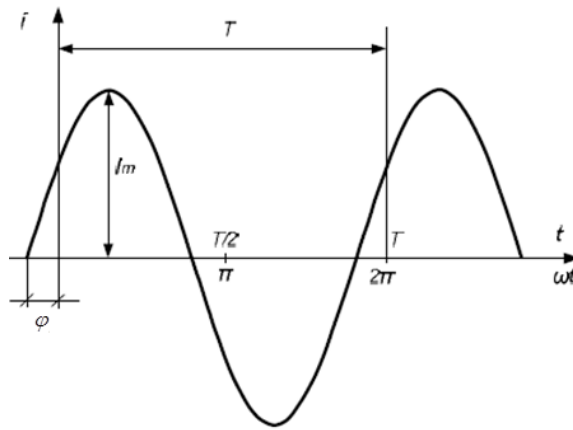


Рисунок 2.1 – График функции синусоидального тока

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 – 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:

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

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 $i(t) = I_m \cdot \sin(\varphi \cdot t + \varphi_i)$, представляющий собой на комплексной плоскости вектор $\dot{I}_m$.

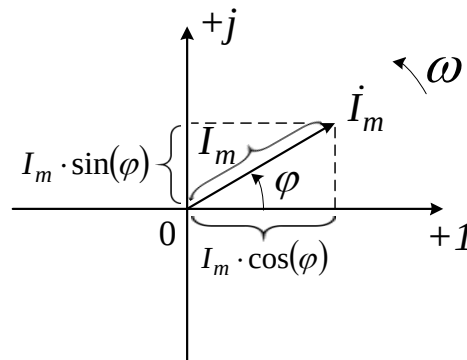


Рисунок 2.2 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

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

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

где $\dot{I}_m$ – комплексная величина, модуль (длина вектора) которой равен I_m ;

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

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

$I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ называют алгебраической формой записи комплексного числа $\dot{I}_m$.

$I_m \cdot \cos(\varphi)$ – вещественная часть комплекса $\dot{I}_m$ или активная составляющая тока $\dot{I}_m$.

$j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – мнимая часть комплекса $\dot{I}_m$ или реактивная составляющая тока $\dot{I}_m$.

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).

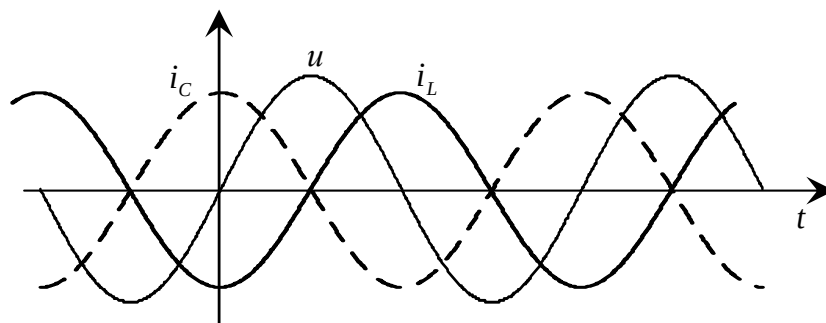


Рисунок 2.3 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе напряжения равной нулю

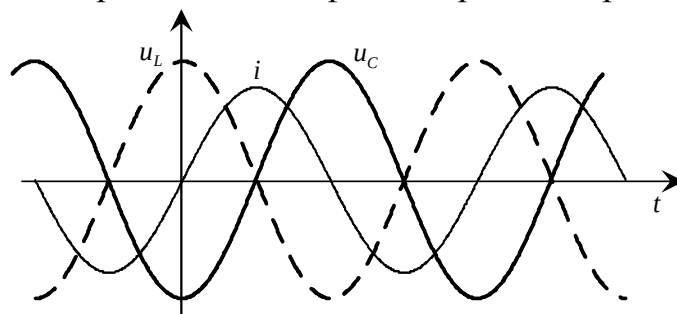


Рисунок 2.4 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе тока равной нулю

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 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:

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

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.

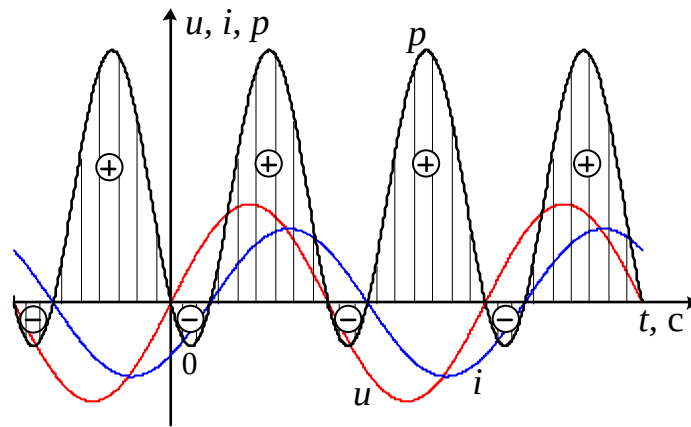


Рисунок 2.5 – График изменения мгновенных значений величин: синусоидальных напряжения, тока и мощности

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:

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

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

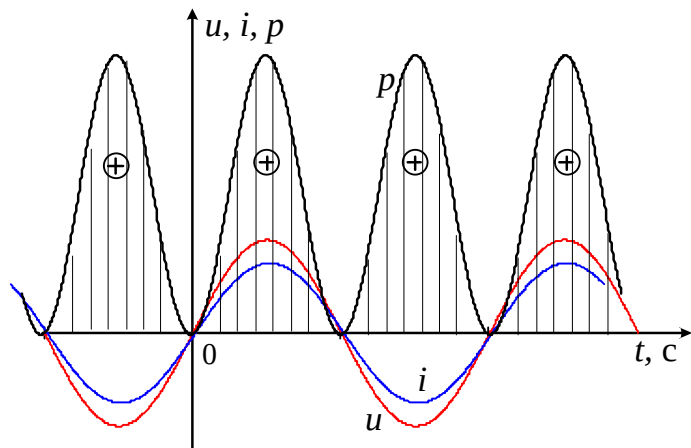


Рисунок 2.6 – Графики изменения мгновенных значений активной мощности и синусоидальных напряжения и тока, совпадающих по фазе

При $\varphi = 0^\circ$ будет наблюдаться наибольшее значение активной мощности равное произведению $U \cdot I$. Эту величину принято назвать *полной мощностью* и обозначать буквой $S = U \cdot I$. Единицей измерения полной мощности является вольтампер $[B \cdot A]$.

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.

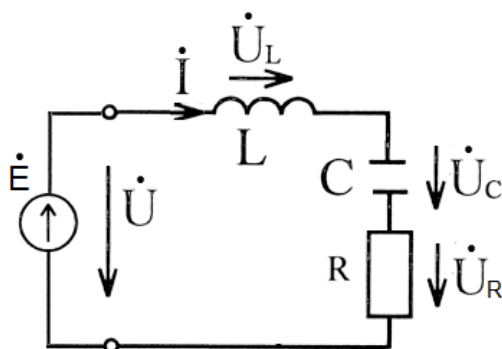


Рисунок 2.7 – Последовательный колебательный контур

По закону Ома комплексная величина тока в контуре определяется

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

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),

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

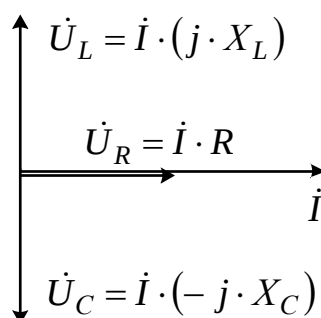


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма напряжений при последовательном резонансе

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).

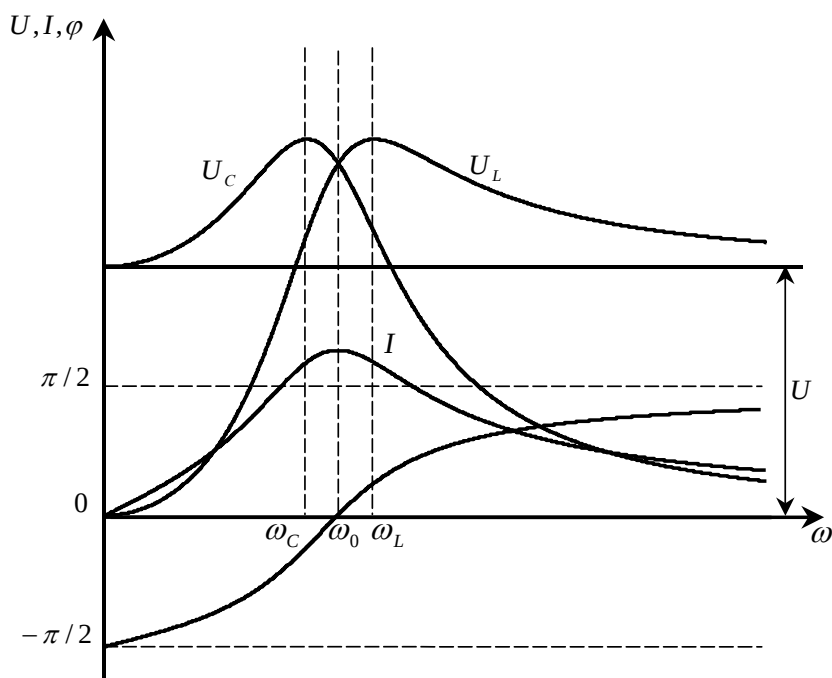


Рисунок 2.9 – Резонансные кривые

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).

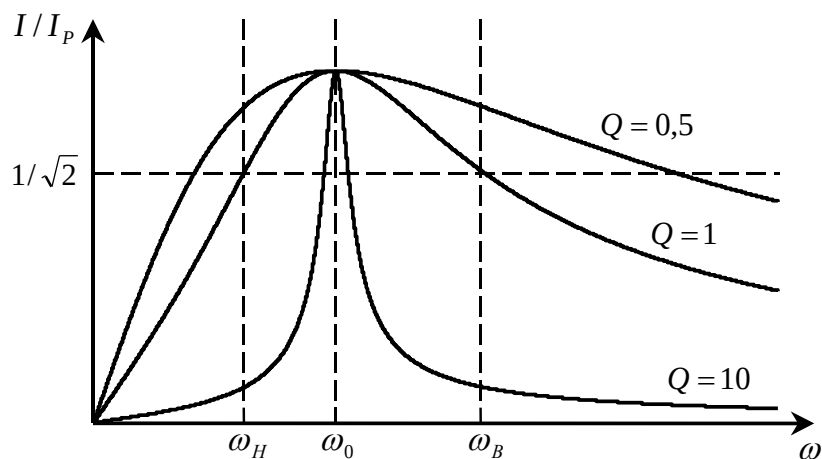


Рисунок 2.10 – Зависимость полосы пропускания контура от его добротности

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 $\dot{U}$

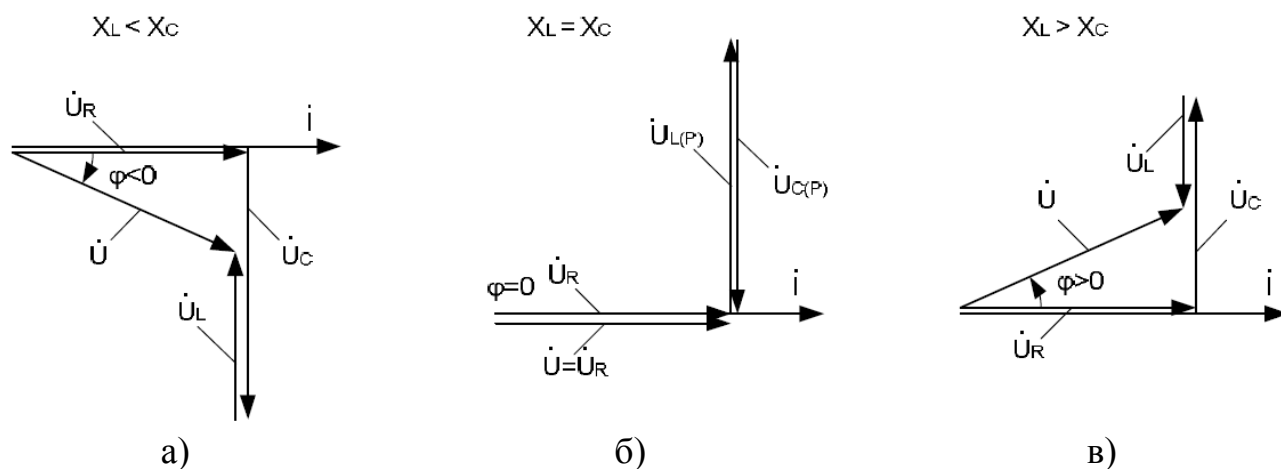


Рисунок 2.11

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

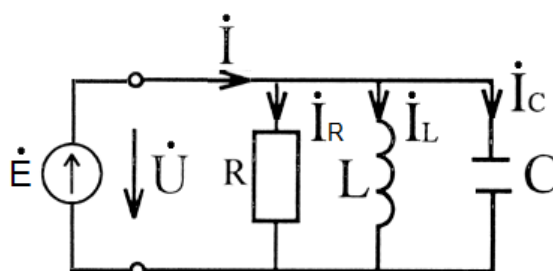


Рисунок 2.12 – Параллельный колебательный контур

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

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

$\varphi = \psi_U - \psi_I$ – 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.

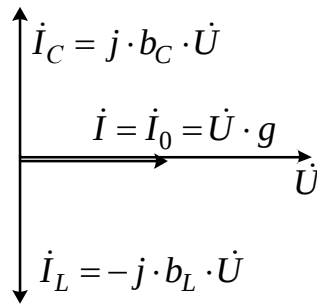


Рисунок 2.13 – Векторная диаграмма токов при параллельном резонансе

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 $d = 1/Q$.

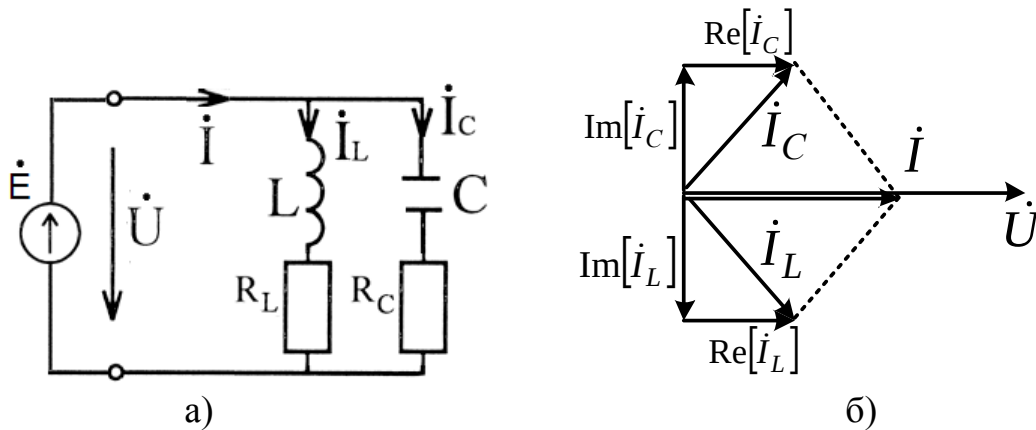


Рисунок 2.14 – Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б) параллельного колебательного контура в режиме резонанса

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

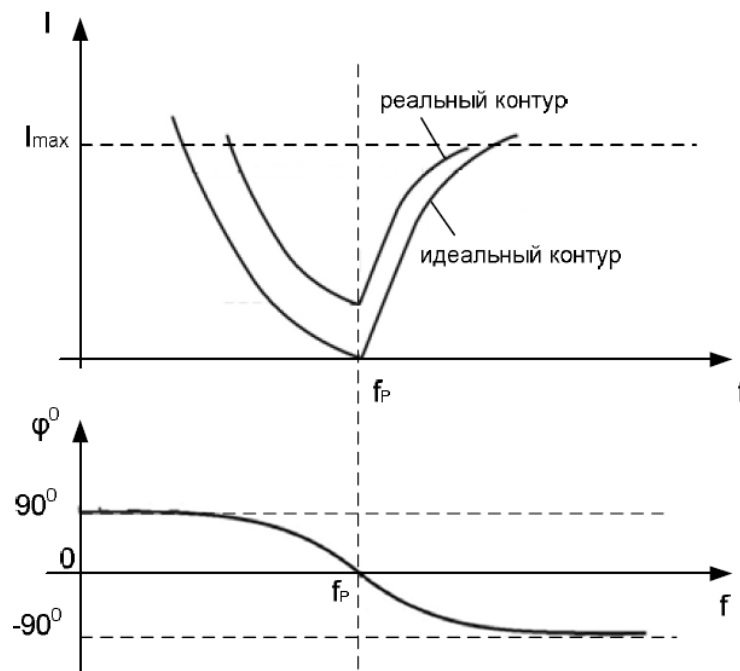


Рисунок 2.15

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.

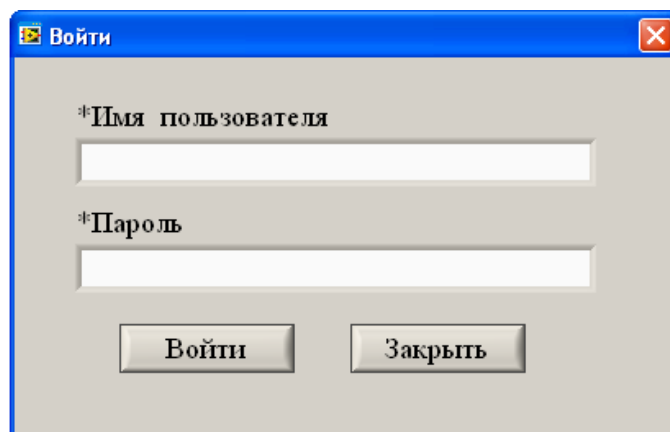


Рисунок 2.16

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

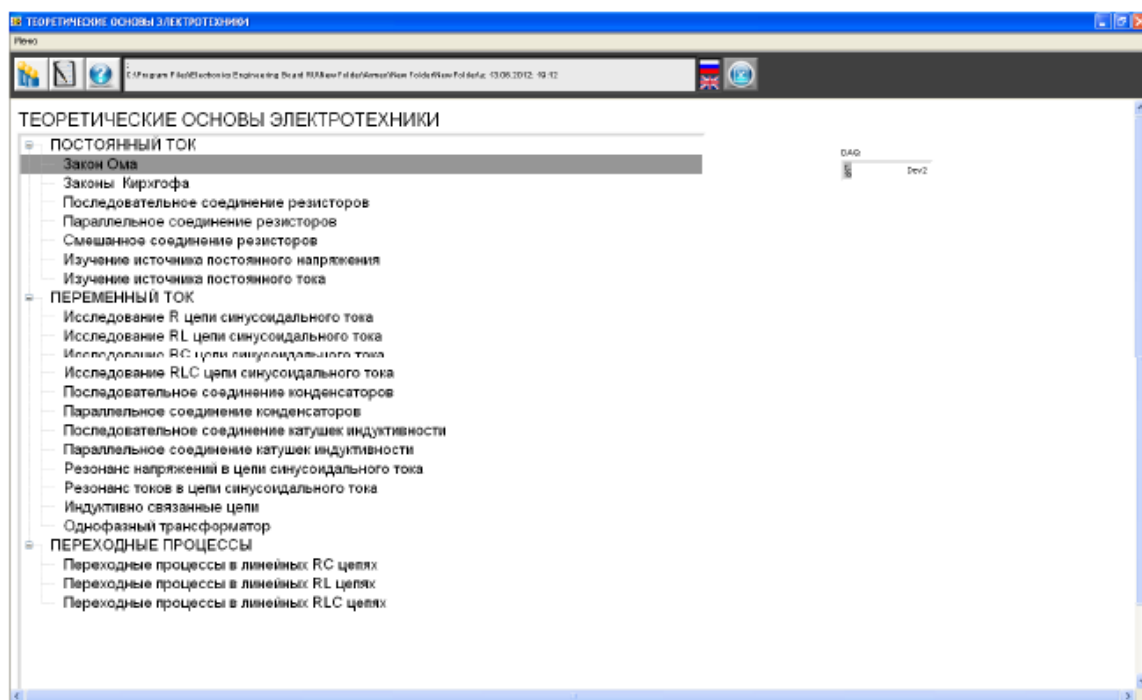


Рисунок 2.17 – Окно главного меню

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 **O** (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).

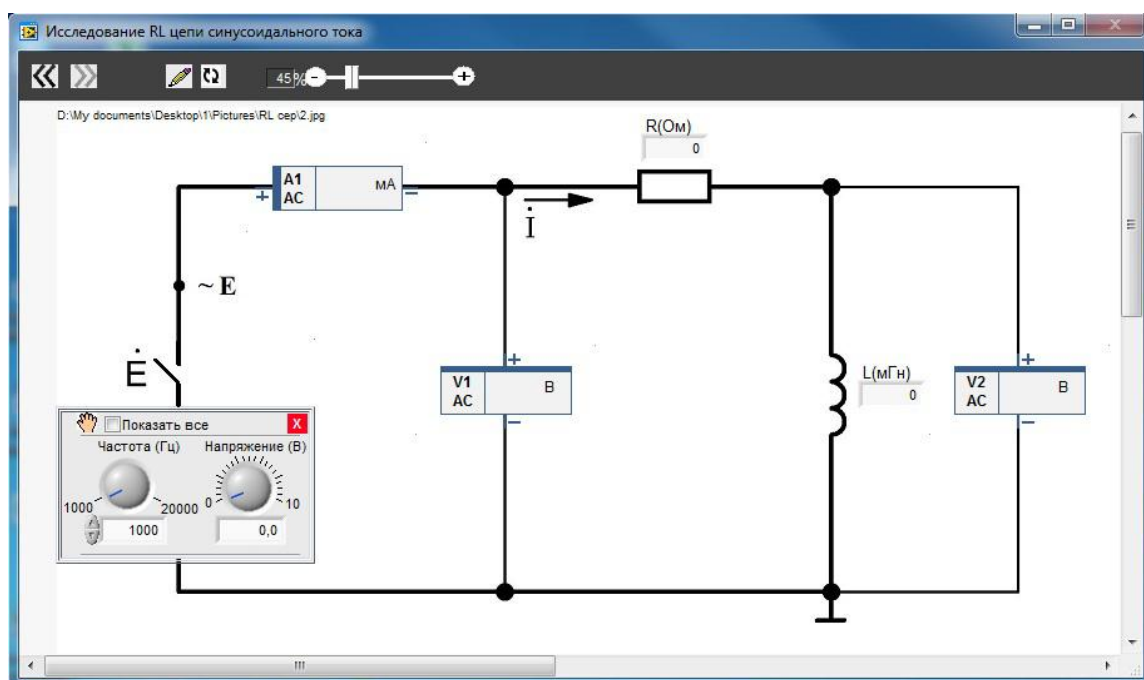


Рисунок 2.18 – Схема электрической цепи эксперимента

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 ÷ 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).

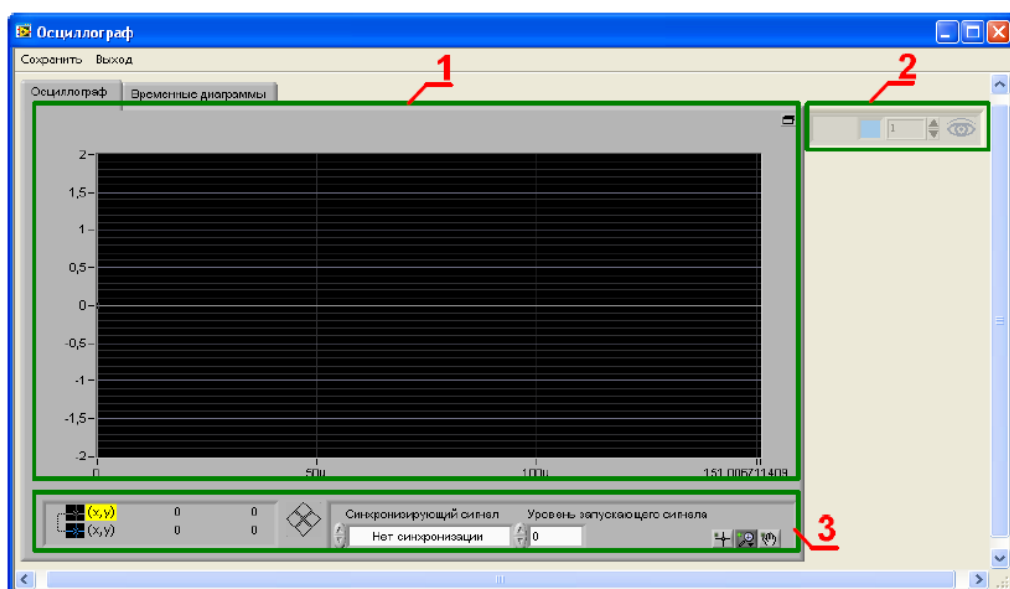


Рисунок 2.19 – Вкладка Осциллограммы

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).

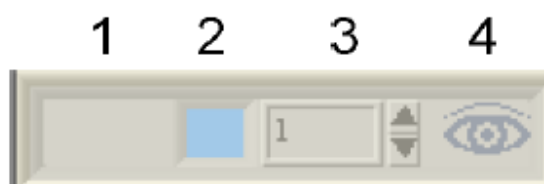


Рисунок 2.20 – Зона выбора сигнала: в поле 1 появятся названия всех иницированных в данной лабораторной работе приборов; в поле 2 доступно меню выбора цвета отображения; в поле 3 можно изменять цену деления шкалы для данного сигнала, при этом в поле индикации будет отображаться соответствующая цена деления;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

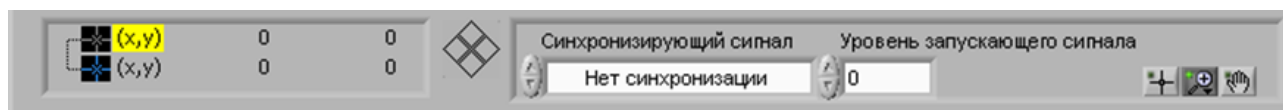


Рисунок 2.21 – Зона управления осями и масштабирования

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).

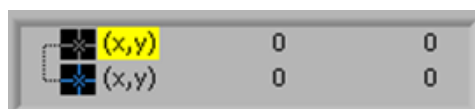


Рисунок 2.22 – Поле выбора/отображения координат курсора

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).

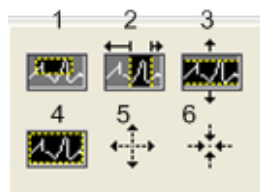


Рисунок 2.23 – Меню выбора масштаба: 1 – позволяет выбрать мышью произвольную прямоугольную область на графике и растянуть ее по диагонали на желаемый масштаб;

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 иницированных 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*:

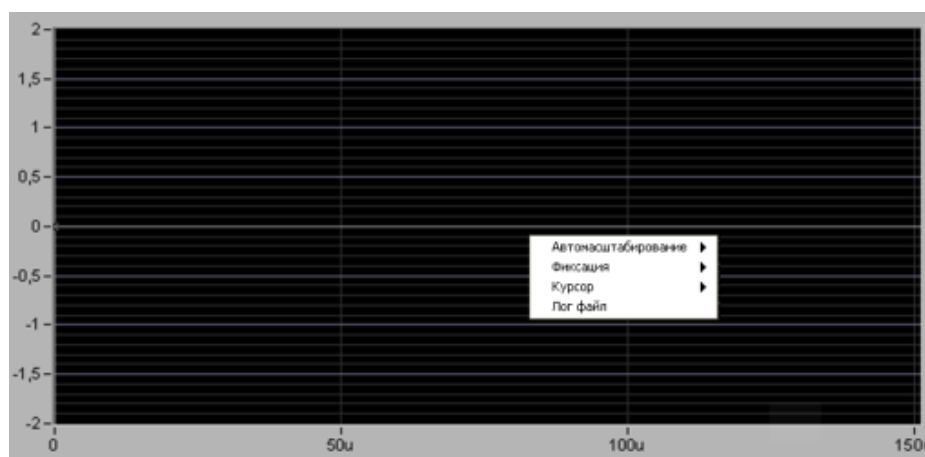


Рисунок 2.24 – меню управления с элементами *Автомасштабирование*, *Фиксация*, *Курсор*, и *Лог файл*: элемент **Автомасштабирование** > **Y** (или **X**) > **Вкл.** (или **Выкл.**) включает или выключает автоматическое масштабирование по осям **Y** или **X**, соответственно; элемент **Фиксация** > **Вкл.** (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).

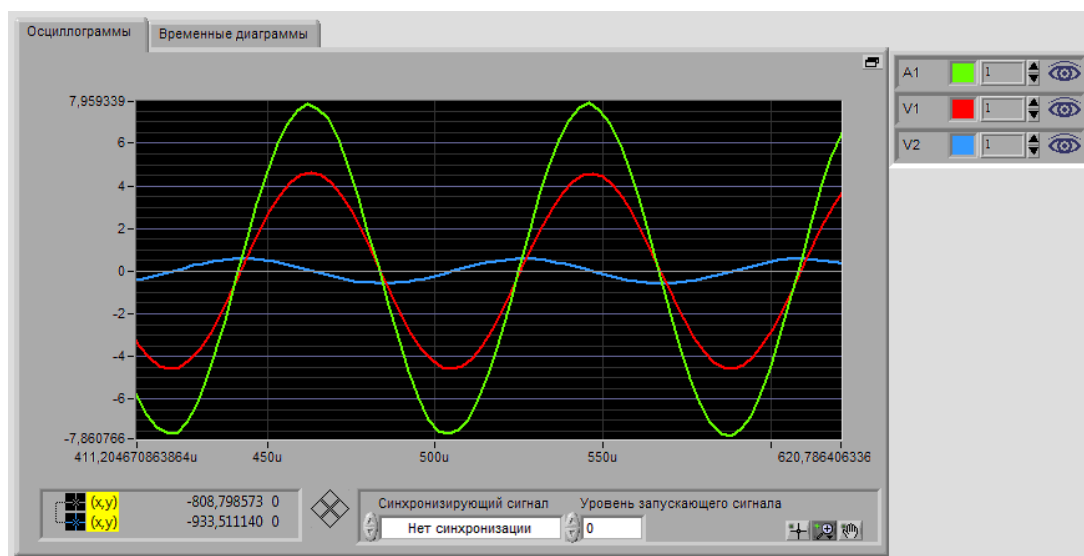


Рисунок 2.25 – Пример осциллограмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1**

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).

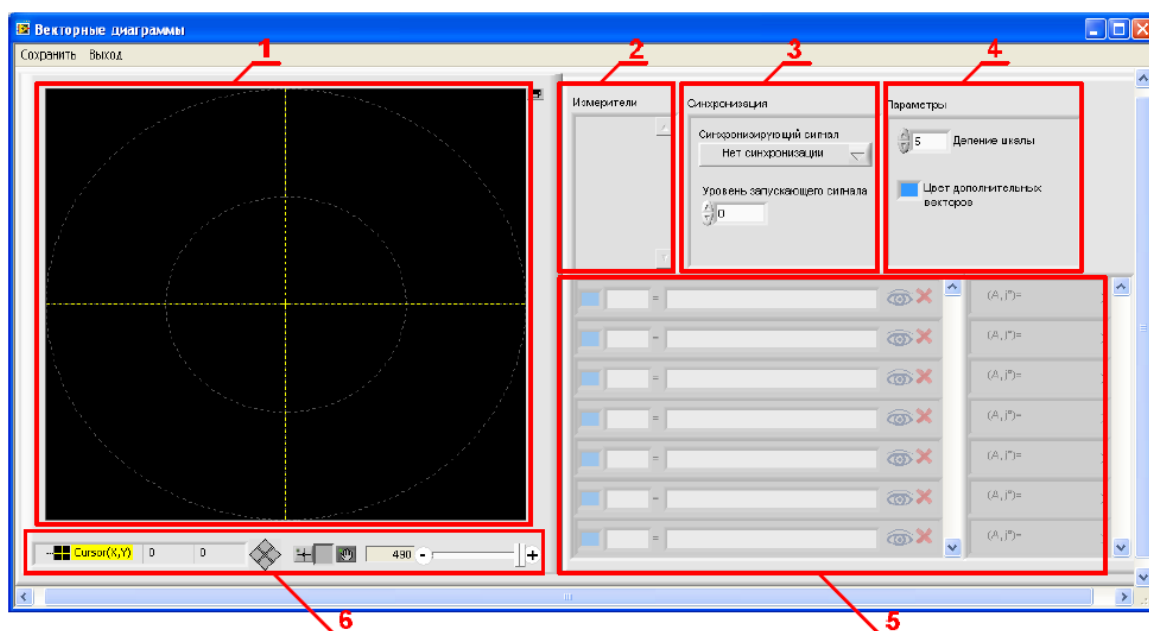


Рисунок 2.26 – Окно Векторные диаграммы

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.

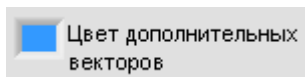
Зона выбора измерителей (2) содержит список **Измерители** всех инициализированных измерителей данной лабораторной работы.

Зона синхронизации (3) содержит элементы настройки синхронизации изображения.

Зона параметров (4) позволяет:



– установить шаг деления шкалы;



– 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.

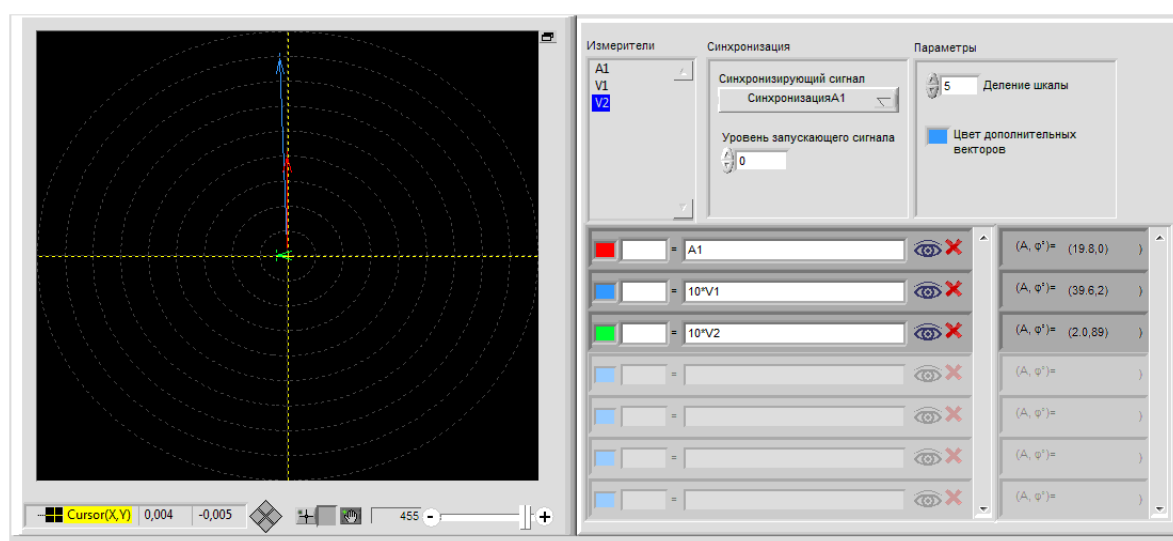


Рисунок 2.28 – Пример векторных диаграмм для наблюдения напряжения $V1$, $V2$ и тока $A1$

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 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).

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. Закрыть **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).

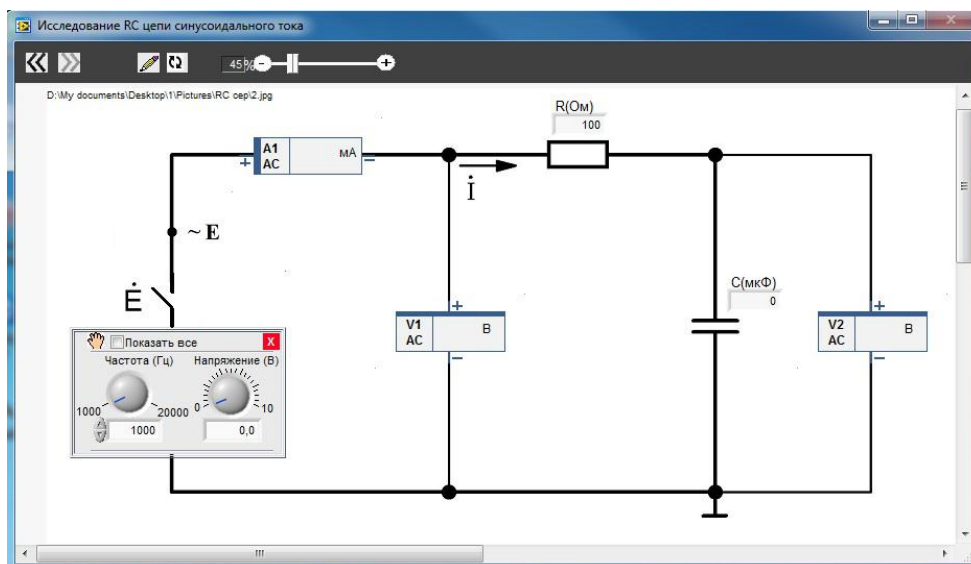


Рисунок 2.29 – Схема электрической цепи эксперимента

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 таблицей 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 , φ) 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).

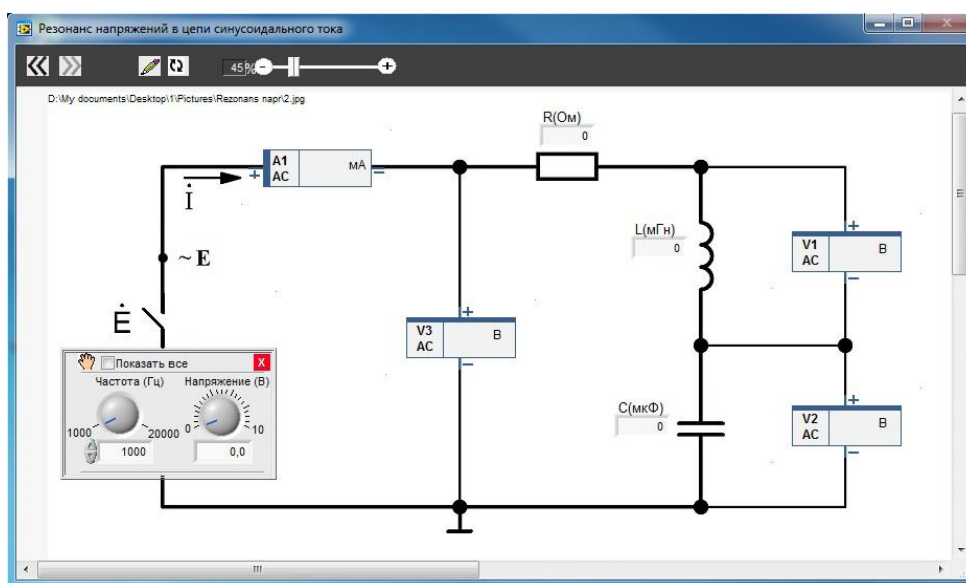


Рисунок 2.30 – Схема электрической цепи эксперимента

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

<i>N</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sim E_{pp}$ [В]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>R</i> [Ом]	100 ÷ 500						100 ÷ 200	100	100	
<i>L</i> [мГн]	10						1		0.47	
<i>C</i> [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 **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, показание **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 , φ) 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 проделанные 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 **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. Закрывать **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).

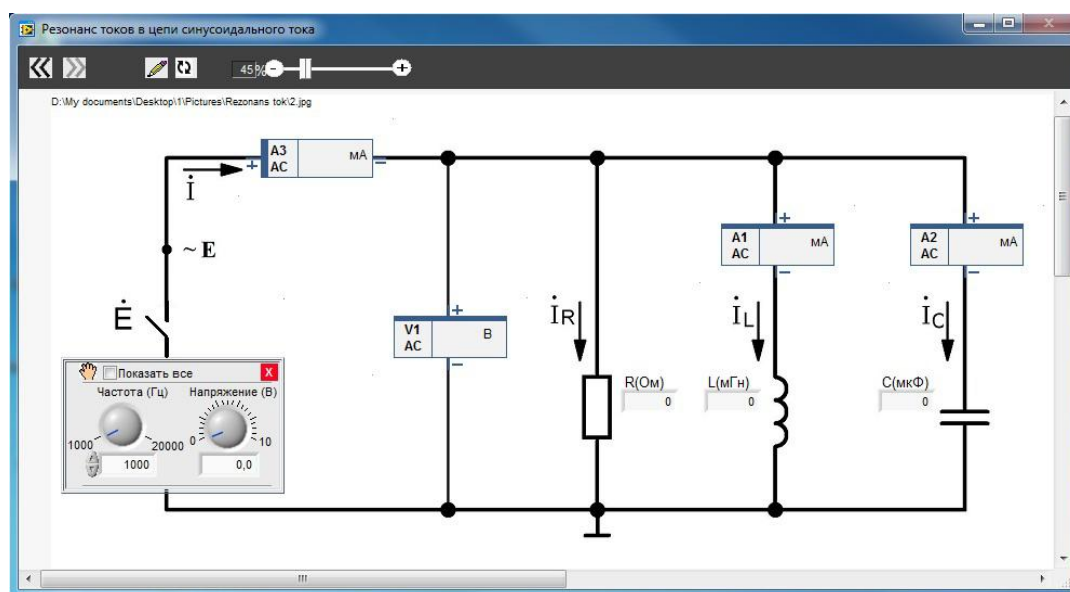


Рисунок 2.31 – Схема электрической цепи эксперимента

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 **A3** будут иметь минимальное значение. Таким образом, нужно найти значения частоты при шаге 2 кГц при которой показания **A3** начнут увеличиваться. Затем вернуться на предыдущую частоту и постепенно увеличивая частоту на 100 Гц найти минимальное значение тока **A3** 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 проделанные 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 **О** (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: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos\varphi$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$. 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: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos\varphi$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$. 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: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos\varphi$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$, 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 (эксп.)	X _C (уст.)	X _L (уст.)	Z (уст.)	Погрешность Z	cosφ	f (PH)	I (PH)	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: $\varphi = \varphi_{A1} - \varphi_{A2}$, $\cos\varphi$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \frac{1}{Y} = 1 / \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C\right)^2}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $Q = R \cdot \sqrt{C/L}$, 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	$\sim \text{Err}$	V1	A1	A2	A3	$\varphi_{A1} - \varphi_{A2}$	Z	X _C	X _L	Z	Погрешность Z	cos φ	f (PT)	I (PT)	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 (3 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 УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений, ОПК-1 Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанно.

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.

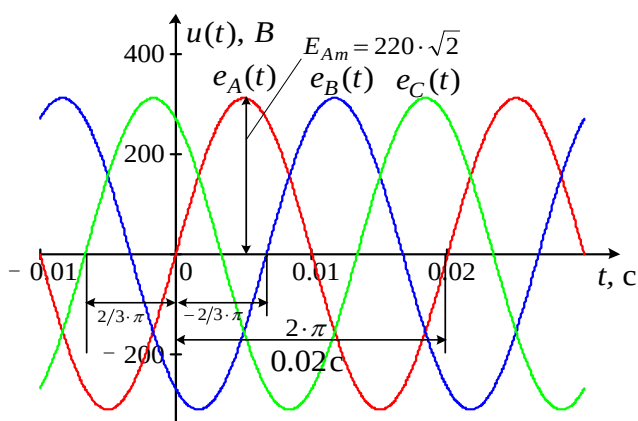


Рисунок 3.1 – Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС

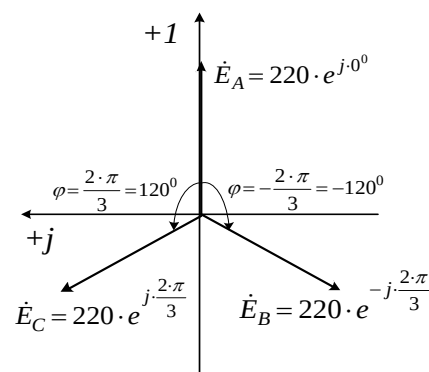


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС

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 .

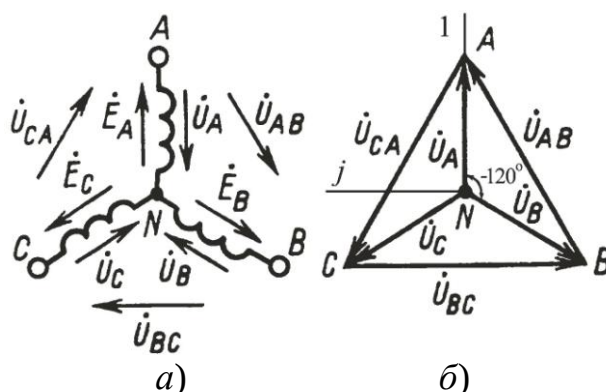


Рисунок 3.3 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора звездой (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

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:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (3.1)$$

Для симметричного генератора (источника) фазные напряжения

$$\dot{U}_A = U_\phi; \dot{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \dot{U}_C = U_\phi \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad (3.2)$$

линейные напряжения (рисунок 3.3 б)

$$\dot{U}_{AB} = U_{\text{л}} \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}; \dot{U}_{BC} = U_{\text{л}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{2}}; \dot{U}_{CA} = U_{\text{л}} \cdot e^{j \cdot \frac{5\pi}{6}}. \quad (3.3)$$

Между линейными и фазными напряжениями для симметричного источника существует зависимость:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}. \quad (3.4)$$

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.

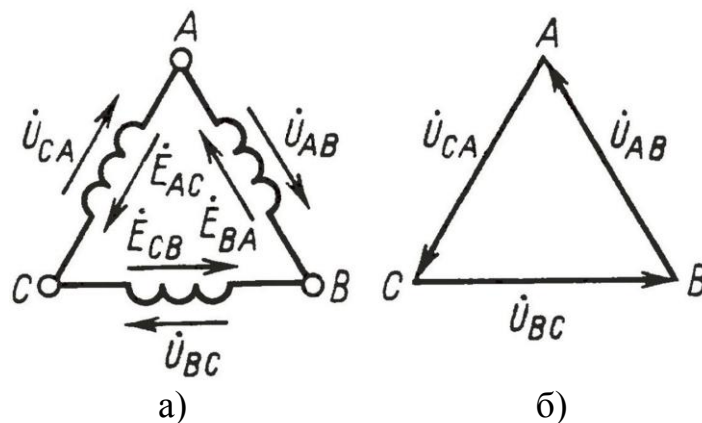


Рисунок 3.4 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора треугольником (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}, \quad (3.6)$$

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):

$$I_A = I_B = I_C = \frac{U_\phi}{|\underline{Z} + \underline{Z}_л|}. \quad (3.7)$$

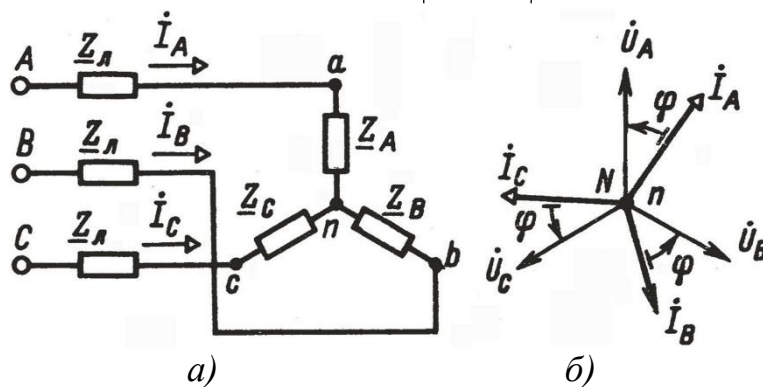


Рисунок 3.5 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

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:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB} / (\underline{Z}); \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC} / (\underline{Z}); \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA} / (\underline{Z}). \quad (3.8)$$

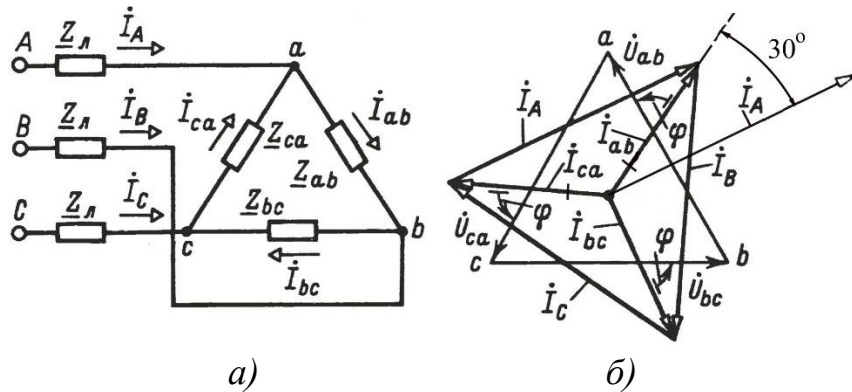


Рисунок 3.6 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

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:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (3.10)$$

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 3.6 б),

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}}; \dot{I}_B = \dot{I}_A \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}; \dot{I}_C = \dot{I}_A \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}. \quad (3.11)$$

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_л}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_л}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_л}. \quad (3.12)$$

Фазные токи определяются через линейные:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{I}_A}{\sqrt{3}} e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}; \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}; \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}. \quad (3.13)$$

Несимметричный режим. При соединении приемника звездой с нейтральным проводом (рисунок 3.7)

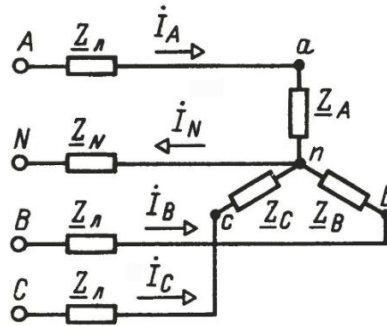


Рисунок 3.7 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (3.14)$$

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_L}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_L}; \quad \dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_N}. \quad (3.15)$$

По первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (3.16)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \frac{\dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_B - \dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; & \dot{U}_{Bn} &= \frac{\dot{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_C - \dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \\ \dot{U}_{Cn} &= \frac{\dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_A - \dot{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{An} / (\underline{Z}_A + \underline{Z}_L); \quad \dot{I}_B = \dot{U}_{Bn} / (\underline{Z}_B + \underline{Z}_L); \quad \dot{I}_C = \dot{U}_{Cn} / (\underline{Z}_C + \underline{Z}_L). \quad (3.18)$$

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:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ab} &= \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A - \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B; \quad \dot{U}_{bc} = \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B - \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C; \\ \dot{U}_{ca} &= \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C - \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A;\end{aligned}\quad (3.19)$$

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / (\underline{Z}_{ab}); \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / (\underline{Z}_{bc}); \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / (\underline{Z}_{ca}), \quad (3.20)$$

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:

$$P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \phi, \quad (3.21)$$

$$Q = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \phi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \sin \phi, \quad (3.22)$$

$$S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}, \quad (3.23)$$

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).

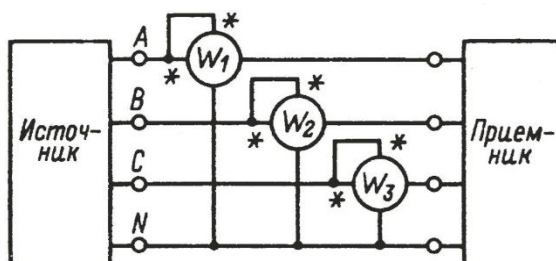


Рисунок 3.8 – Схема для измерения мощности трехфазной цепи с нейтральным проводом

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.

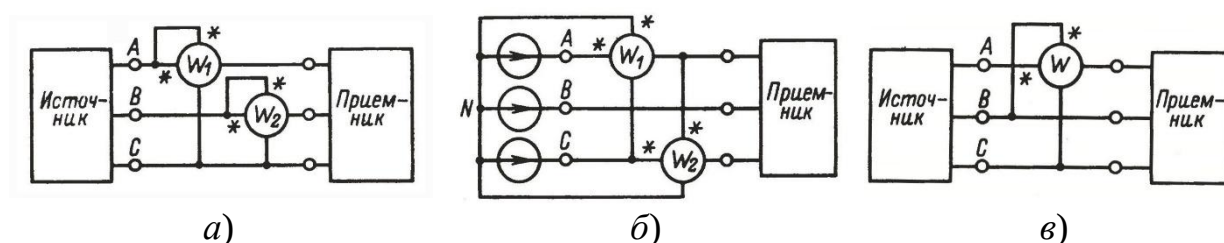


Рисунок 3.9 – Схемы для измерения трехфазной активной мощности в цепи без нейтрального провода (а) и реактивной мощности при несимметричной (б) и симметричной нагрузке (в)

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).

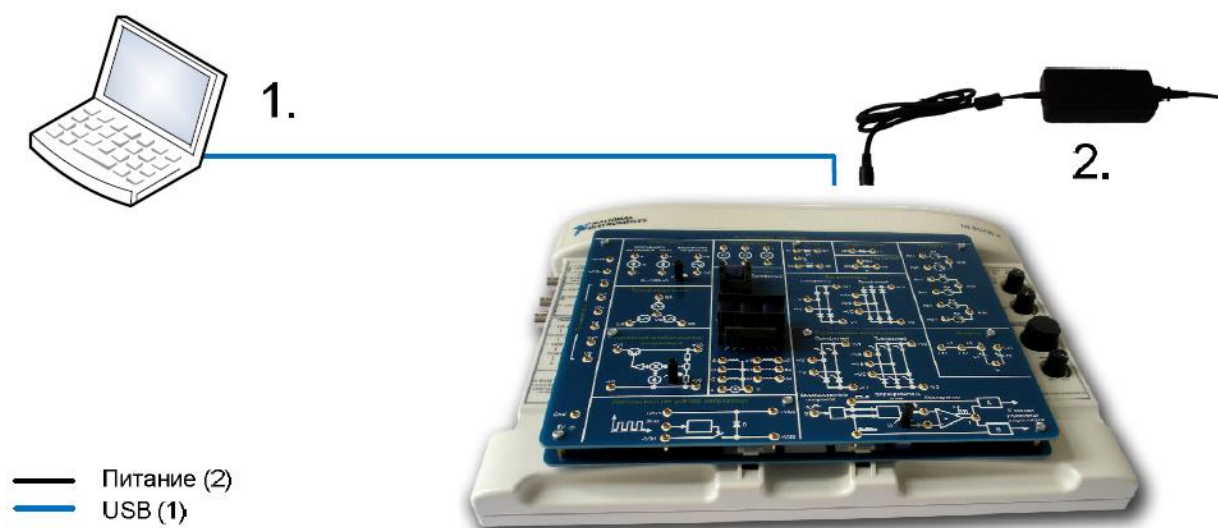


Рисунок 3.10 –Лабораторный стенд с макетной платой «Силовая электроника» подключаемый к ПЭВМ: 1 – персональный компьютер (ПЭВМ); 2 – Блок питания обеспечивающий электропитание NI ELVIS II и макетной платы

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).

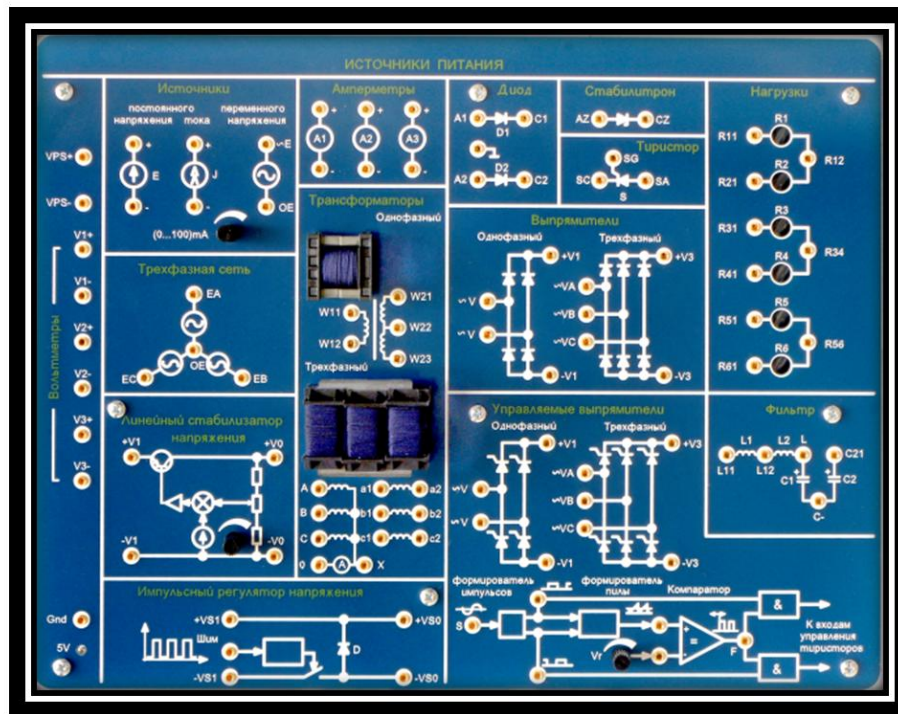


Рисунок 3.11 – Макетная плата «Силовая электроника»

В лабораторной работе будут использоваться только отдельные зоны (рисунок 3.12).

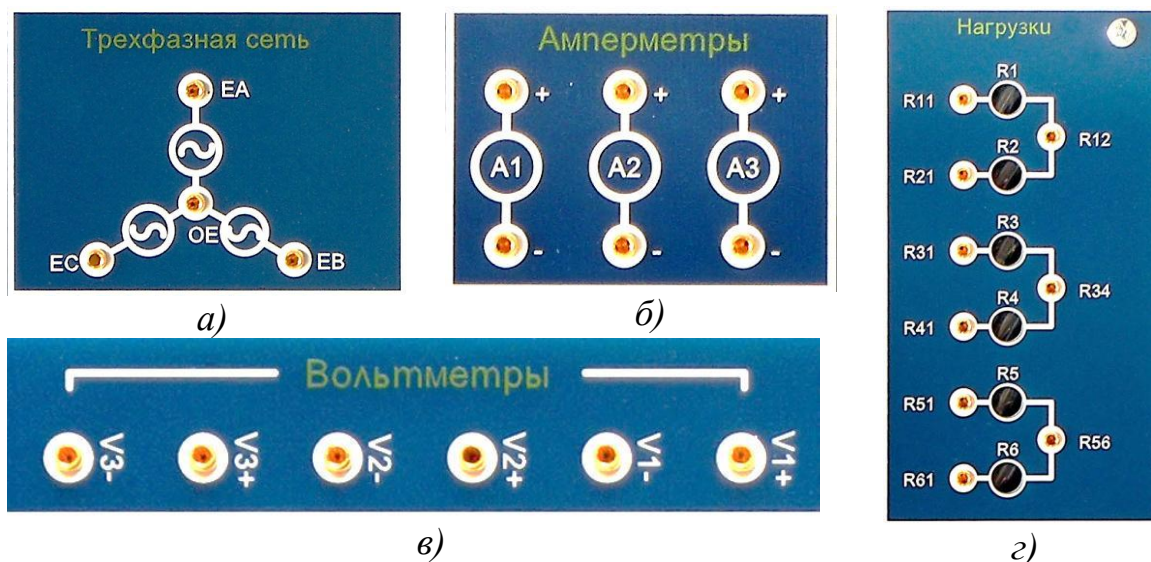


Рисунок 3.12 – Зоны на макетной плате: а) зона трехфазной сети; б) зона амперметров; в) зона вольтметров; г) зона нагрузочных резисторов
Работа с макетной платой лабораторного стенда.

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 '?', '/', '\', '|', '*', '&', '<', '>', '+', '=', ':', ' '.

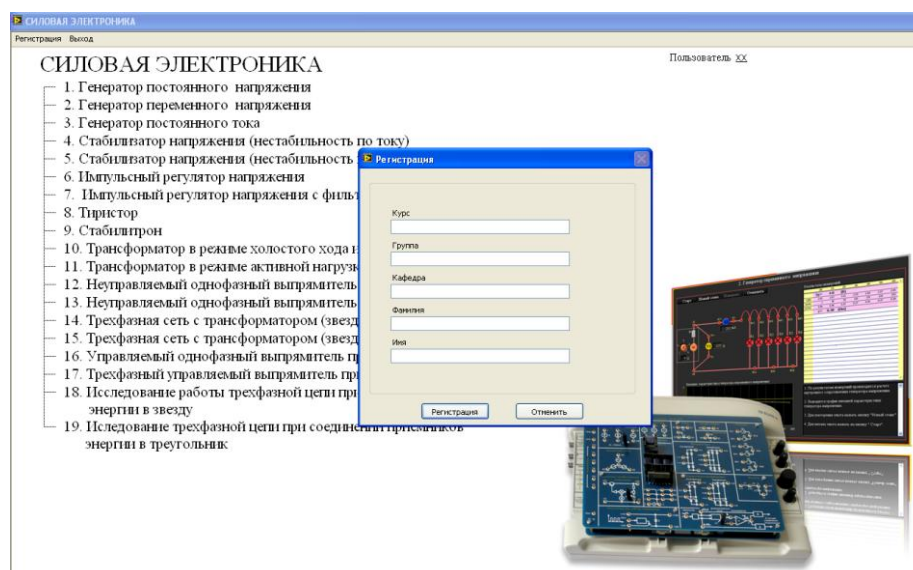


Рисунок 3.14 – Окно регистрации

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.

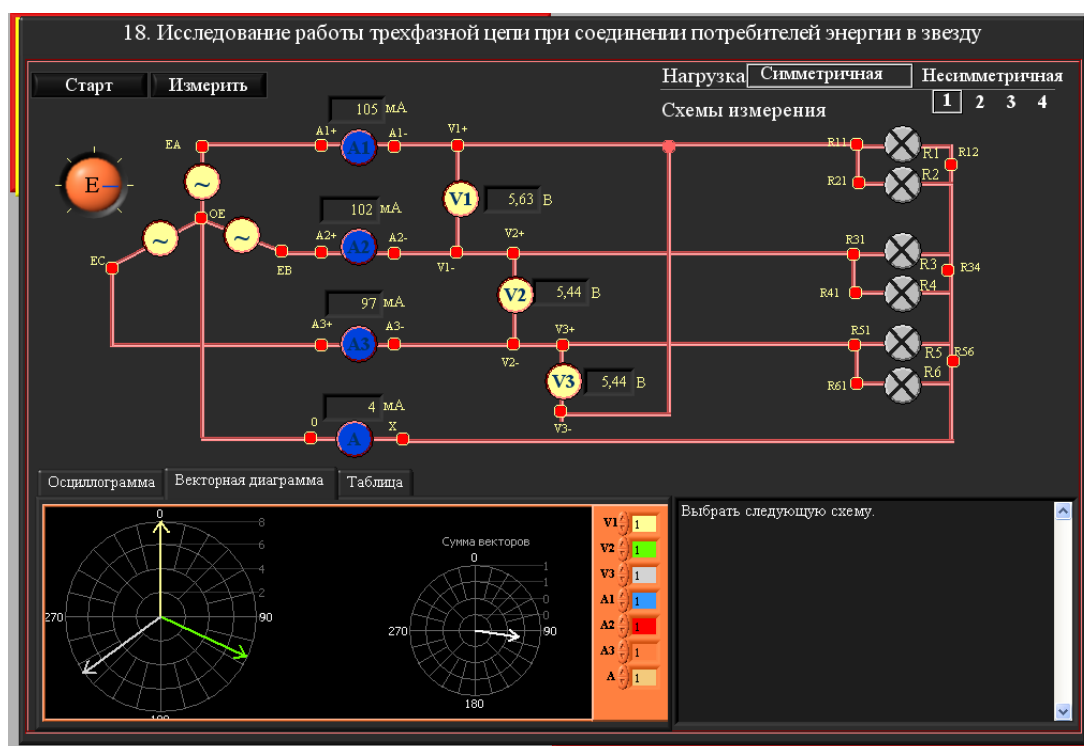


Рисунок 3.15 – Окно эксперимента измерения №1 симметричного режима
Кнопка **Старт** приводит систему в состояние готовности, на лицевую

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 **O** (выключен).

7. Выберите схему измерения №1 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.16

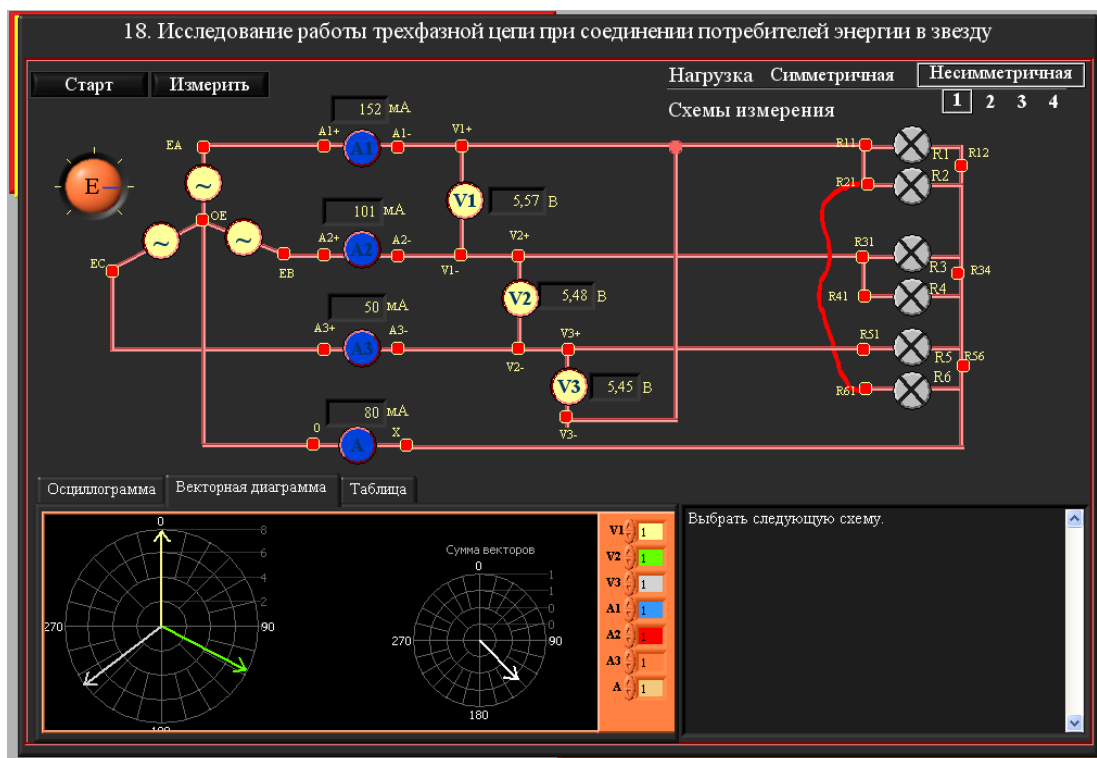


Рисунок 3.16 – Окно эксперимента схемы измерения №1 несимметричного режима

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.

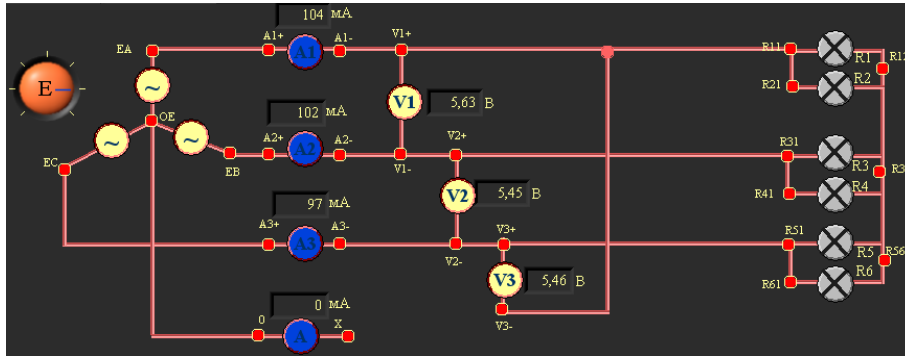


Рисунок 3.17

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.

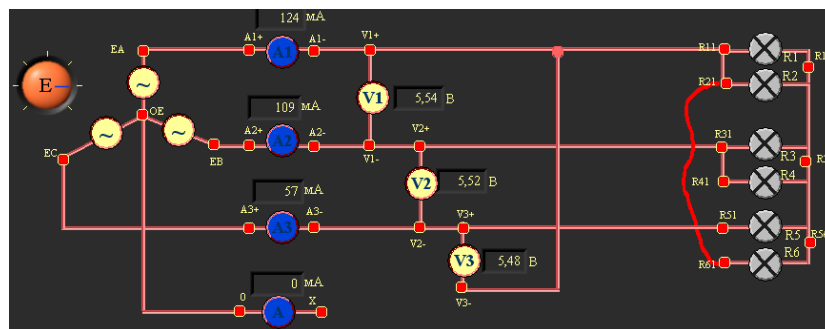


Рисунок 3.18

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.

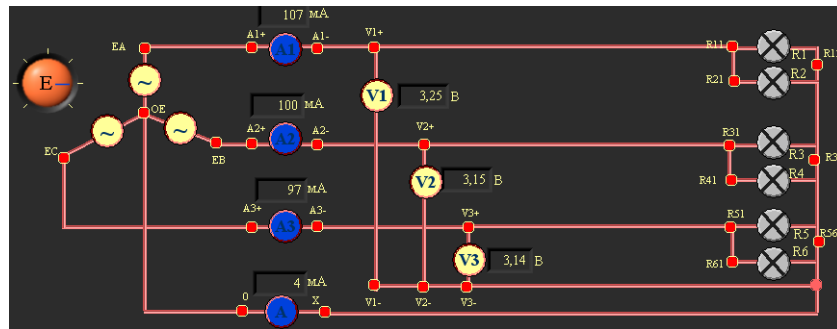


Рисунок 3.19

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.

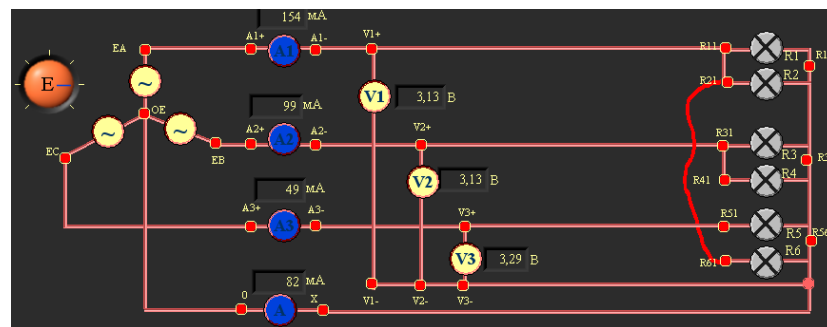


Рисунок 3.20

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.

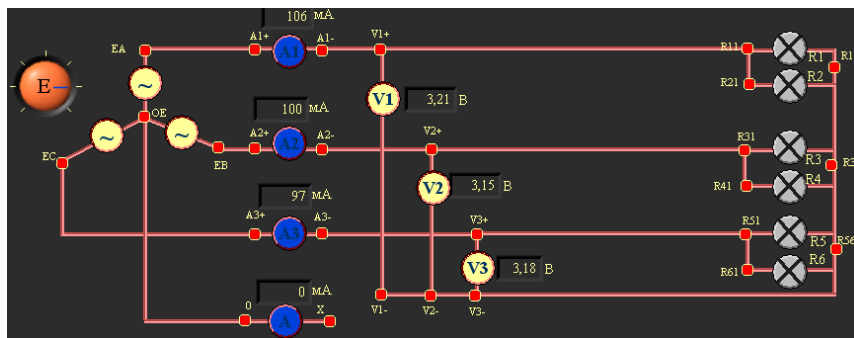


Рисунок 3.21

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.

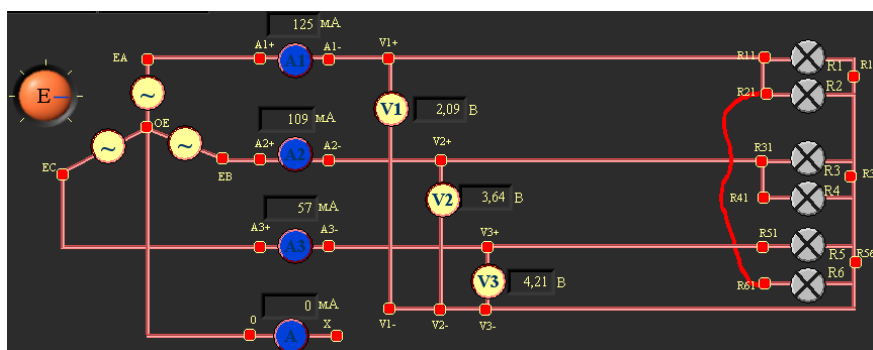


Рисунок 3.22

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 **О** (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.

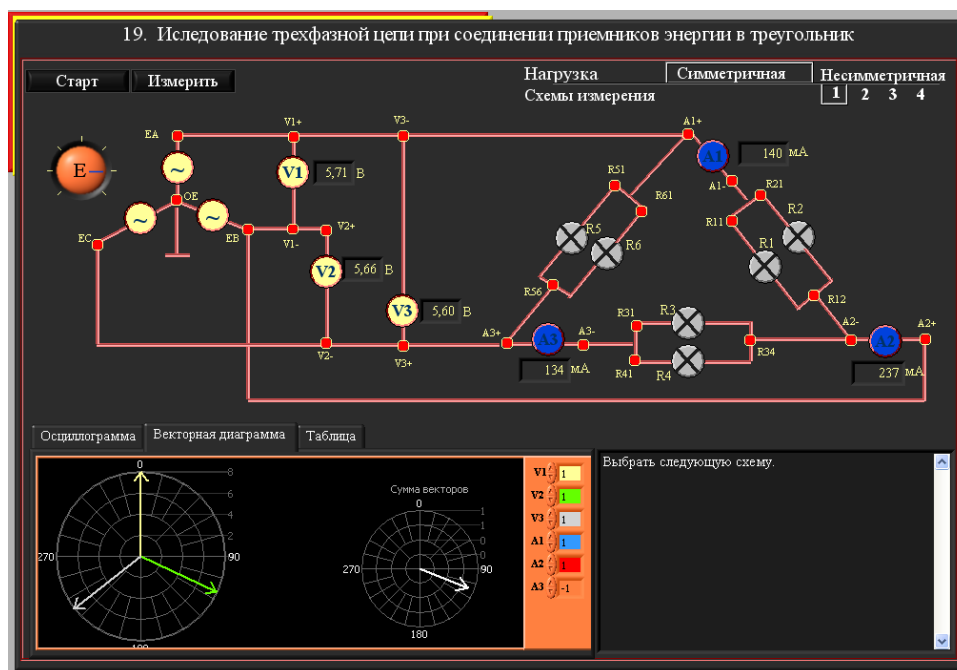


Рисунок 3.23 – Окно эксперимента измерения №1 симметричного режима

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 **И** (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.

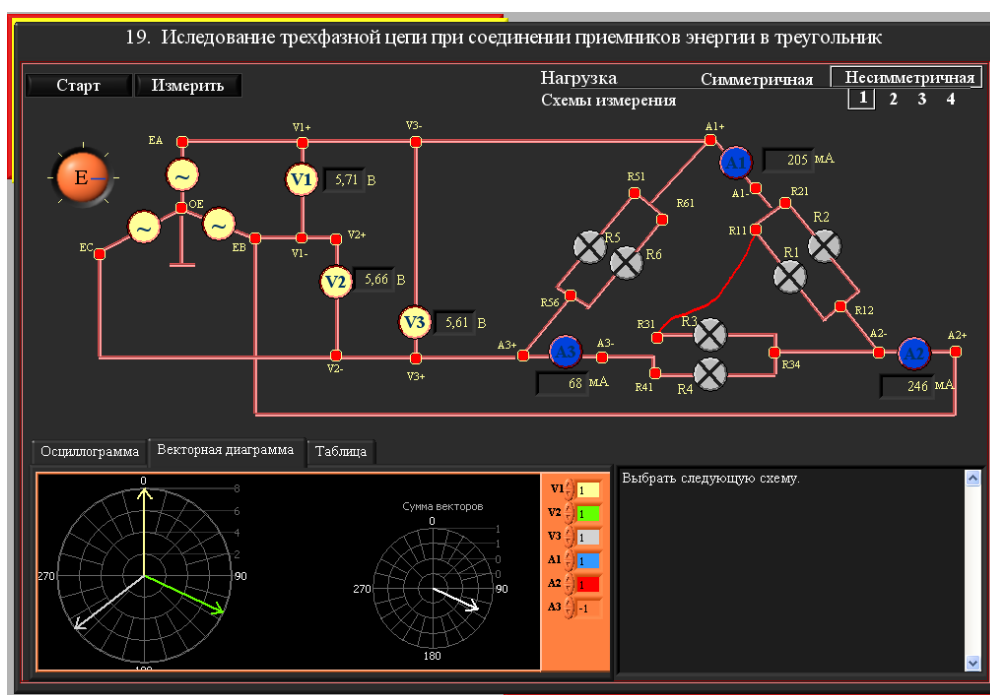


Рисунок 3.24 – Окно эксперимента схемы измерения №1 несимметричного режима

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.

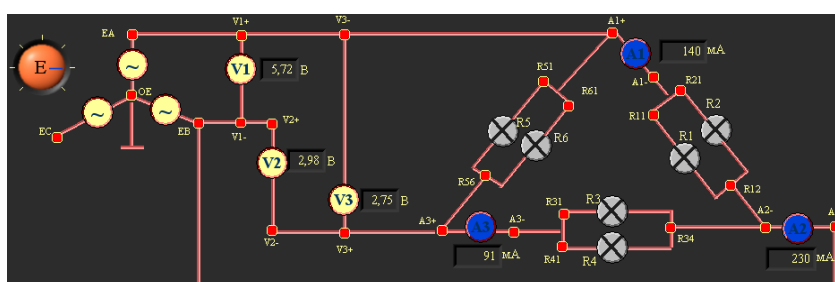


Рисунок 3.25

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.

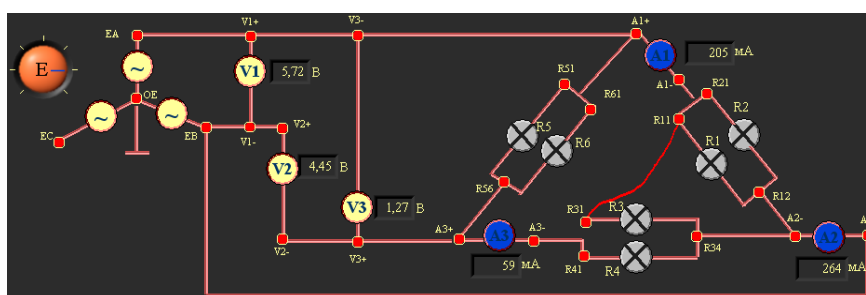


Рисунок 3.26

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.

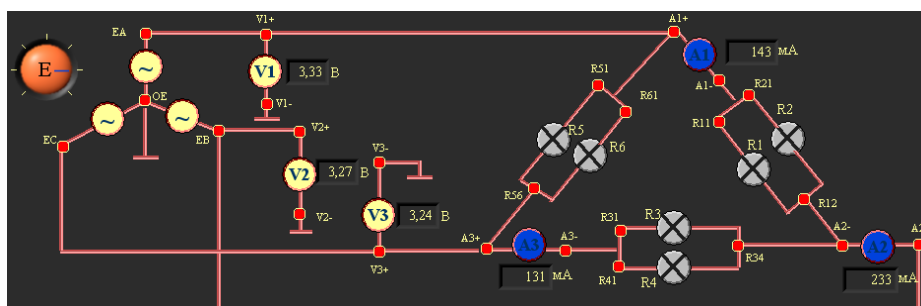


Рисунок 3.27

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.

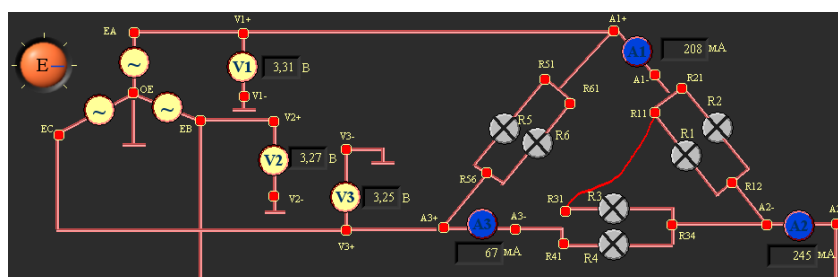


Рисунок 3.28

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.

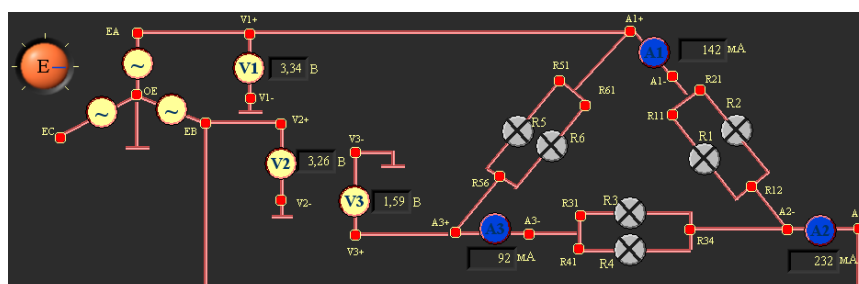


Рисунок 3.29

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.

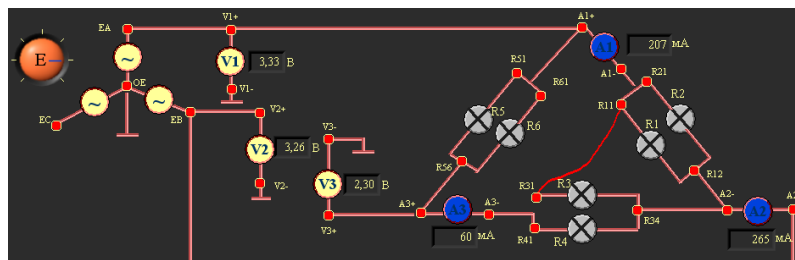


Рисунок 3.30

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	
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 измерения 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

Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (3 ч)

Цель работы:

1. Получение рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. На основе рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором определение его рабочих параметров.

Формирование у студента компетенции УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений, ОПК-1 Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанно

Теоретическое обоснование

Асинхронные машины – наиболее распространенные электрические машины. В основном их используют в качестве электрических двигателей. Благодаря простоте устройства и высокой надежности их широко применяют для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов, и т.д.

Асинхронная машина состоит из подвижной и неподвижной части (рисунок 6.1). Неподвижная часть машины переменного тока называется статором (1), а подвижная часть — ротором (2).

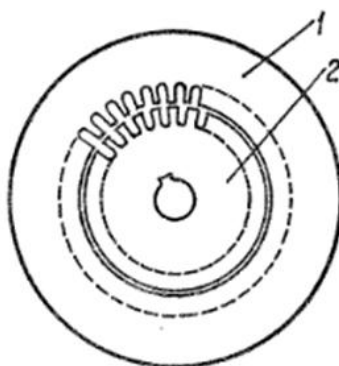


Рисунок 4.1 – Схема асинхронной машины

Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются из листов электротехнической стали, покрытых изоляционным лаком. Ротор асинхронных машин вращается несинхронно, или асинхронно, по отношению к вращающемуся магнитному полю, чем и обусловлено название этих машин.

Сердечник статора закрепляется в корпусе, а сердечник ротора – на валу (машины малой и средней мощности) или на ободке с крестовиной и втулкой, надетой на вал (машины большой мощности). Вал ротора вращается в подшипниках, которые помещаются в подшипниковых щитах, прикрепляемых к корпусу статора (машины малой и средней мощности), или на отдельно стоящих подшипниковых стояках.

На внутренней цилиндрической поверхности статора и на внешней цилиндрической же поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются проводники обмоток статора и ротора. Обмотка статора выполняется обычно трехфазной, присоединяется к сети трехфазного тока и называется поэтому также первичной обмоткой.

По способу исполнения обмотки ротора асинхронные двигатели делятся на двигатели с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором.

В двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполняется трехфазной аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки ротора соединяются обычно в звезду, а начала с помощью контактных колец и металлографитных щеток выводятся наружу. К контактным кольцам обычно присоединяется трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Фазная обмотка ротора выполняется с тем же числом полюсов магнитного поля, как и статор.

Обмотка ротора двигателя с короткозамкнутым ротором выполняется в виде беличьей клетки (рисунок 4.2).

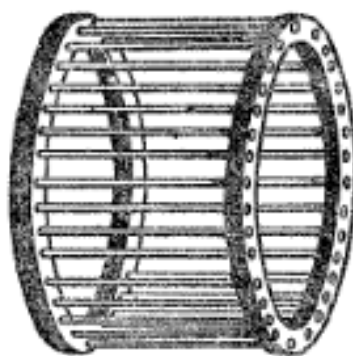


Рисунок 4.2 – Обмотка ротора в виде беличьей клетки

При этом в каждом пазу находится медный или алюминиевый стержень и концы всех стержней с обоих торцов ротора соединены с медными или алюминиевыми же кольцами, которые замыкают стержни накоротко. Стержни от сердечника обычно не изолируются. Большинство асинхронных машин, в особенности машины малой и средней мощности, выпускается с короткозамкнутым ротором.

В электрическом отношении «беличья клетка» представляет собой многофазную обмотку, соединенную звездой и замкнутую накоротко. Число фаз обмотки равно числу пазов ротора, причем в каждую фазу входят один стержень и прилегающие к нему участки короткозамыкающих колец.

По конструкции двигателя с короткозамкнутым ротором проще двигателей с фазным ротором и более надежны т.к. не имеют щеток и колец. Но при этом их недостатком является сравнительно небольшой пусковой момент и значительный пусковой ток. Поэтому их применяют в электроприводах, где не требуются большие пусковые моменты. В двигателях с фазным ротором имеется возможность с помощью пускового реостата увеличивать пусковой момент до максимального значения и уменьшать пусковой ток, благодаря чему их можно применять для привода механизмов, которые пускают в ход при большой нагрузке.

Рассмотрим *принцип действия асинхронного двигателя*.

Токи обмотки статора двухполюсной машины создают двухполюсный магнитный поток, проходящий через статор (1), ротор (3) и зазор между ними (рисунок 4.3).

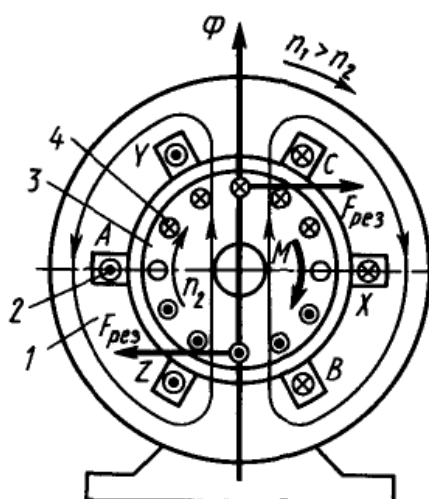


Рисунок 4.3 – Электромагнитная схема асинхронной машины

Обмотка статора (2) создает магнитное поле, вращающееся с частотой (синхронной)

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ об/сек,} \quad (4.1)$$

где f_1 – частота тока статора, p – число пар полюсов.

Магнитное поле вращается в направлении чередования фаз A, B, C обмотки статора.

Магнитный поток Φ_1 , создаваемый обмоткой статора (рисунок 4.3), при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора (4), индуцирует в них ЭДС, и если обмотка ротора замкнута, то в ней возникают токи i_2 , частота которых f_2 при неподвижном роторе ($n = 0$) равна первичной частоте f_1 .

Если обмотка ротора является трехфазной, то в ней индуцируется трехфазный ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора Φ_2 , число полюсов $2p$, направление и скорость вращения которого при $n = 0$

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1 \quad (4.2)$$

такие же, как и у потока статора. Поэтому потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя Φ .

В результате взаимодействия токов ротора с потоком возникают действующие на проводники ротора механические силы F и вращающий электромагнитный момент M .

Если развиваемый момент больше статического тормозного момента на валу, то ротор двигателя придет во вращение в направлении вращения поля с некоторой скоростью $n_2 < n_1$, т. е. будет вращаться с некоторым отставанием или скольжением, относительно поля статора. Такой режим называют *двигательным*.

Относительная разность скоростей вращения поля статора и ротора называется скольжением.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}. \quad (4.3)$$

Скорость ротора, выраженная через скольжение s , равна

$$n = (1 - s) \cdot n_1. \quad (4.4)$$

При пуске двигателя ($n = 0$) согласно (6.3) $s = 1$, а при вращении ротора синхронно с полем статора или, как говорят, с синхронной скоростью ($n = n_1$) $s = 0$. При $n = n_1$ магнитное поле статора относительно ротора неподвижно и токи в роторе индуцироваться не будут, поэтому $M = 0$ и такой скорости вращения двигатель достичь не может. Вследствие этого в режиме двигателя всегда $0 < n < n_1$ и $0 < s < 1$.

При вращении ротора в сторону поля частота пересечения полем проводников ротора пропорциональна разности скоростей $(n_1 - n)$ и частота тока в обмотке ротора

$$f_2 = p \cdot (n_1 - n) = s \cdot p \cdot n_1 = s \cdot f_1. \quad (4.5)$$

Если ротор с помощью внешней силы привести во вращение со скоростью $n > n_1$, тогда ротор будет обгонять поле и направление индуцируемых в обмотке ротора токов изменятся на обратные. Аналогично изменятся направление F и M . Момент будет тормозящим, следовательно,

машина будет работать в режиме генератора и отдавать активную мощность в сеть. При этом $s < 0$. Такой режим называется генераторным.

Если ротор вращать в направлении, обратном направлению вращения поля статора ($n < 0$), то направления e_2 , i_2 и F сохраняются как в двигательном режиме, т.е. машина продолжает получать из сети активную мощность. Однако электромагнитный момент M будет действовать в направлении вращения поля статора, но против вращения ротора, т.е. будет его тормозить. Этот режим называется режимом электромагнитного торможения или противовключения. В этом режиме $s > 1$.

Этот режим на практике используется для торможения и остановки асинхронных двигателей и приводимых ими в движение производственных механизмов. Например, в ряде случаев, при необходимости быстрой остановки двигателя, путем переключения двух питающих проводов трехфазного двигателя изменяют чередование фаз и направление вращения поля, а ротор в течение некоторого времени вращается при этом по инерции в прежнем направлении, т.е. теперь уже против поля. Механическая мощность в данном случае развивается за счет кинетической энергии вращающихся масс вследствие уменьшения скорости вращения. При $n \approx 0$ машину необходимо отключить от сети, иначе она придет во вращение в обратном направлении.

Выделяют также режим короткого замыкания асинхронной машины. В этом режиме $s = 1$, т.е. ротор неподвижен. Этот режим соответствует начальному моменту пуска асинхронного двигателя из неподвижного состояния.

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость развиваемого момента на валу M от скорости вращения n при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$: $M = f(n)$. Момент на валу может быть также вычислен по формуле:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n}, \quad (4.6)$$

где P – мощность на валу.

На рисунке 4.4 *а* показана механическая характеристика $M = f(n)$ асинхронного двигателя и механическая характеристика $M_{CT} = f(n)$ некоторого производственного механизма, приводимого во вращение двигателем.

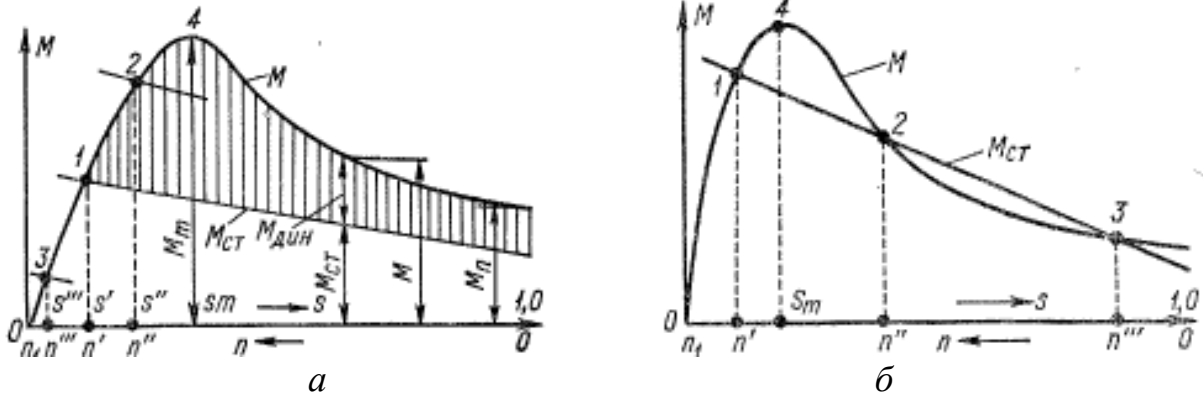


Рисунок 4.4 – Механические характеристики асинхронного двигателя

Уравнение моментов агрегата «двигатель – производственный механизм» имеет вид

$$M = M_{CT} + M_{дин}, \quad (4.7)$$

где $M_{дин}$ – динамический момент агрегата, равный

$$M_{дин} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = J \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (4.8)$$

где J – момент инерции; Ω – угловая скорость вращения.

Если при $n = 0$ пусковой момент больше момента сопротивления, как это показано на рисунке 4.4 *а* ($M_P > M_{CT}$), то $M_{дин} > 0$, $dn/dt > 0$ и ротор двигателя придет во вращение. Ускорение ротора происходит до тех пор, пока (заштрихованная область на рисунке 4.4 *а*)

$$M_{дин} = M - M_{CT} > 0. \quad (4.9)$$

В точке 1 достигается равновесие моментов $M = M_{CT}$, $M_{дин} = 0$, $dn/dt = 0$. Наступает установившийся режим работы двигателя под нагрузкой со скоростью вращения n' и скольжением s' . Величина s' будет тем больше,

чем больше $M_{СТ}$, т.е. чем больше нагрузка двигателя. Если при работе двигателя увеличить статический момент производственного механизма (кривая 2 рисунок 4.4), то s возрастет, а n уменьшится. При уменьшении нагрузки (кривая 3 рисунок 4.4), s уменьшится, а n возрастет.

Переход двигателя к новому установившемуся режиму работы при изменении нагрузки физически происходит следующим образом. Если $M_{СТ}$ возрастет, то будет $M < M_{СТ}$, $M_{дин} < 0$, $dn/dt < 0$ и движение ротора двигателя станет замедляться. При этом скольжение возрастает, в соответствии с чем увеличиваются также ЭДС E_2 и ток I_2 вторичной цепи. В результате электромагнитный момент M увеличивается и уменьшение n (увеличение s) происходит до тех пор, пока снова не наступит равенство моментов $M = M_{СТ}$. При уменьшении нагрузки процесс протекает в обратном направлении.

Точка 4 на характеристике соответствуют максимальному моменту двигателя и соответствующему скольжению, называемому критическим $s_{КР}$. Зная $M_{МАХ}$, можно построить приблизительную механическую характеристику по формуле:

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_{МАХ}}{\frac{s_{КР}}{s} + \frac{s}{s_{КР}}}, \quad (4.10)$$

где

$$s_{КР} = s_{НОМ} \cdot \left(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1} \right). \quad (4.11)$$

где $k_m = M_{МАХ} / M$ – кратность максимального момента, т.е. отношение максимального момента при номинальном напряжении к номинальному.

Условия устойчивой работы.

Под устойчивостью работы электродвигателя понимают способность двигателя восстанавливать установившуюся частоту вращения при

кратковременных возмущениях (изменениях нагрузки, напряжения питающей сети и т.д.).

В общем случае, как показано на рисунке 4.4 б, характеристики двигателя могут иметь несколько точек пересечения (точки 1, 2, 3).

Условия устойчивости:

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{\text{СТ}}}{dn}. \quad (4.12)$$

Следовательно, в точках 1 и 3 работа устойчива, в точке 2 – нет. Режим работы в точке 3 на практике неприемлем, т.к. характеризуется, малой n , плохим КПД, большими токами в обмотках, вследствие чего, двигатель перегревается и выходит из строя. Оптимальным является участок от точки 4 влево.

Статический момент механизма может увеличиваться до точки 4. При дальнейшем увеличении нагрузки двигатель либо остановиться, либо перейдет в точку 3. В обоих случаях он должен быть отключен.

Кроме того, при работе двигателя необходимо иметь некоторый запас по моменту, так как возможны кратковременные перегрузки случайного характера, а также кратковременные или длительные понижения напряжения сети.

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности P_1 , первичного тока I_1 , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$, момента на валу M , скольжения s и КПД от полезной мощности P_2 при работе с номинальным напряжением и частотой. Рабочие характеристики позволяют находить все основные величины, определяющие режим работы двигателя при различных нагрузках (рисунок 4.5).

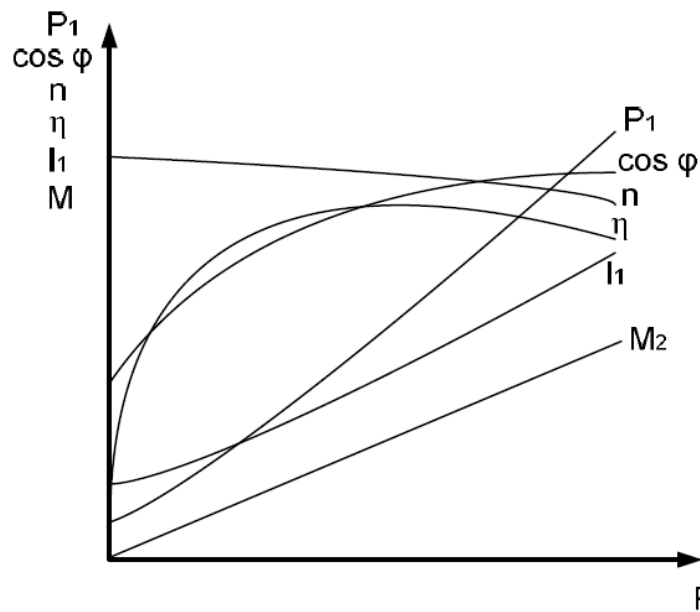


Рисунок 4.9 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Аппаратура, оборудование и материалы

1. Лабораторная работа выполняется на специально разработанном стенде *Асинхронный двигатель и электропривод*, работающим совместно с контрольно-измерительным оборудованием на базе платформы NI PXI сопряженной с ПЭВМ. В дальнейшем будем эту систему называть лабораторный стенд (рисунок 4.10).

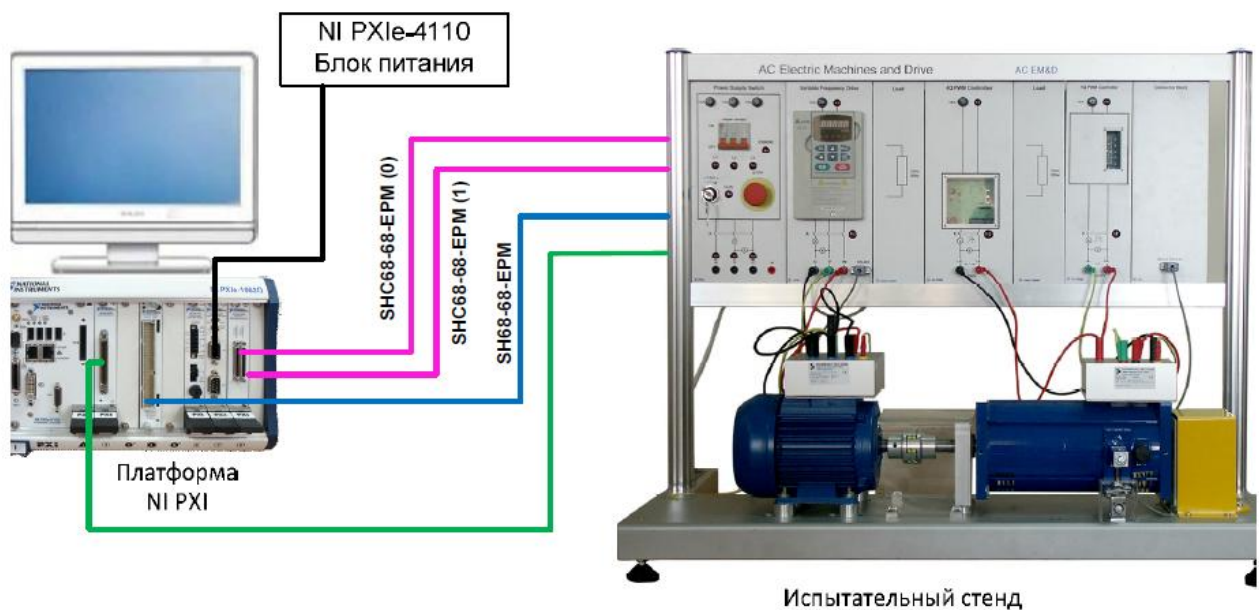


Рисунок 4.10 –Лабораторный стенд Асинхронный двигатель и электропривод, подключаемый к ПЭВМ в сборе

2. В стандартной комплектации лабораторного стенда имеются соединительные провода (15 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, поддерживающие 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 Asynchronous Machines; программное обеспечение Delta VFDSOft, v1.45.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1. Кроме того, все студенты обязаны соблюдать следующие требования техники безопасности:

1. При проведении лабораторной работы недопустимо наличие на столе посторонних предметов.

2. Включение питания стенда и выполнение работ может производиться только с разрешения и в присутствии преподавателя.

2. Сборку электрических схем для проведения лабораторных работ разрешается производить только при отключенном питании стенда.

Запрещается:

1. Прикасаться к оборудованию стенда во время проведения лабораторных работ.

2. Проводить любые работы или испытания в отсутствие руководителя, ответственного за проведение лабораторных работ.

Возможными источниками опасности при проведении лабораторных работ могут быть:

1. Нажатие кнопок на лицевой панели стенда (кроме кнопки «Стоп»).

2. Соединение и отсоединение проводов к моторам и соответствующим

гнездам стенда.

3. Прикосновение к работающим механизмам.

Методика и порядок выполнения работы

Включение и подготовка к работе. Для подготовки стенда к работе и проверки функционирования испытуемого и нагрузочного электроприводов при управлении от компьютера необходимо выполнить следующие операции:

1. Убедиться, что питание стенда выключено. Убедиться, что провода питания двигателей подключены к соответствующим клеммам.
2. Убедиться, что внешний блок питания NI PXIe – 1062Q подключен к сети 220В.
3. Убедиться, что модули NI PXI-8133, NI PXI-2503, NI PXI-4300, NI PXI-4110, NI PXI-4220, NI PXI-6259 установлены на шасси NI PXIe – 1062Q.
4. Убедиться, что модули NI PXI-6259 и NI PXI 2503 подключены к разъемам на задней части стойки стенда при помощи соответствующих соединительных кабелей.
5. Убедиться, что модуль NI PXI-4110 подключен к соответствующему блоку питания.
6. Убедиться, что питание стенда соединено с трехфазной сетью переменного тока 220/380В, 50Гц.
7. Включить питание NI PXIe – 1062Q, подождать, пока загрузится операционная система.
8. Включить питание стенда: на приборной панели установить переключатель в положение ON, затем повернуть ключ.

Запуск программы и проведение лабораторных работ. Для запуска программы необходимо запустить программу выбрав Asynchronous Machines

из стартового меню Windows или двойным щелчком мыши по соответствующей иконке на рабочем столе.

При запуске программы на экран монитора выводится лицевая панель (рисунок 4.11).

Элементы **Меню: Регистрация, Руководство пользователя, О нас, Калибровка, Выход.** Под строкой **Меню** расположены кнопки **Регистрация, Руководство пользователя, Выход.**

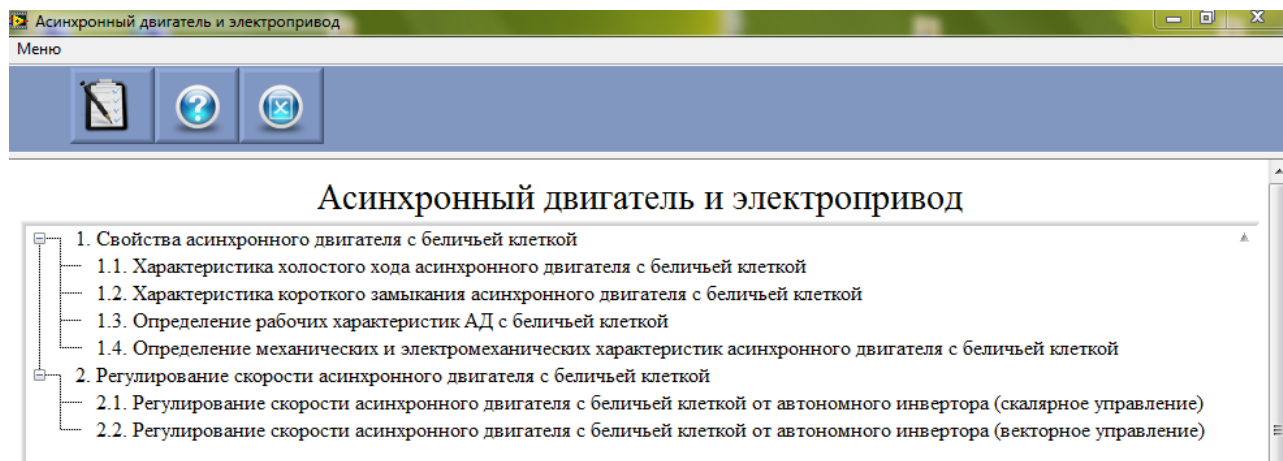


Рисунок 4.11 – Окно главного меню

Перед тем, как начать выполнение лабораторных работ студент может зарегистрироваться (выбрать в меню элемент **Регистрация**).

При выборе этого пункта меню откроется окно регистрации:

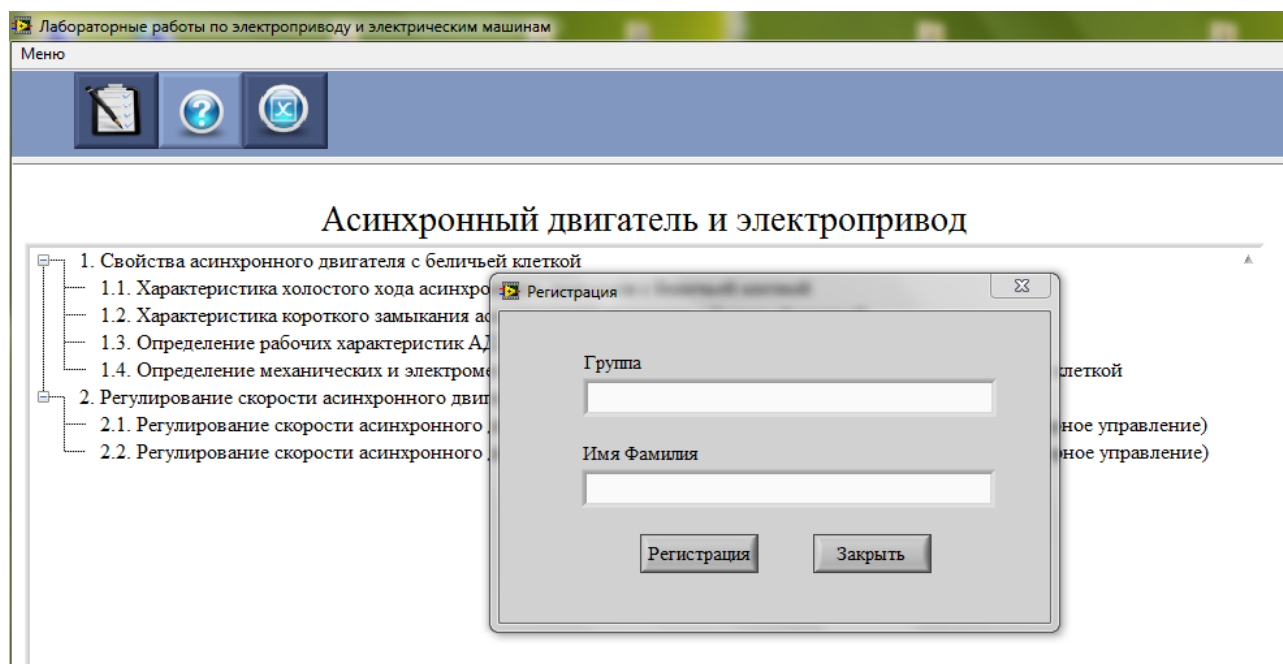


Рисунок 4.12 – Окно регистрации

Для регистрации введите в соответствующие поля (рисунок 4.12) группу и имя, а затем нажмите кнопку **Регистрация**. Недопустимо использовать в полях тексты в юникоде, а также символы '?', '/', '\', '|', '*', '&', '<', '>', '+', '=', ':', ' ' '. В случае появления сообщения об ошибке нажмите клавишу **ОК**, после чего исправьте ошибку и продолжите работу.

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

Студент может начать лабораторную работу без регистрации. В таком случае позиции EXCEL файла, предназначенные для регистрационных данных, останутся пустыми.

Для перехода к исполнению конкретной лабораторной работы необходимо выбрать в меню соответствующую строку и открыть ее двойным щелчком мыши. Появится лицевая панель выбранной лабораторной работы с сообщением, предлагающим вызвать интерфейс ПЧ для ввода настроек, соответствующих данной работе.

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 4 **«Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя в короткозамкнутом ротором»** будет содержать эксперимент «Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с беличьей клеткой» из главного меню (рисунок 4.11).

1 Эксперимент: «Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя в короткозамкнутом ротором». Приборы и компоненты:

1. Испытуемый АД с беличьей клеткой; 2. Нагрузитель: ГПТ с независимым возбуждением; 3. Источник питания ПЧ для статорной обмотки ИД; 4. Источник питания нагрузителя (4К РН); 5. Источник питания обмотки

возбуждения нагрузителя (1K PH); 6. Ваттметр (P); 7. Вольтметр (U_C); 8. Амперметры (I_C , I_B); 9. Датчик скорости (n); 10. Датчик момента (M).

Подготовка к проведению эксперимента «Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя в короткозамкнутом ротором».

1. Соберите схему в соответствии с рисунком 4.13. Работа проводится при обмотке статора, соединенной в звезду.

2. Убедитесь, что фиксатор вала расцеплен. (Пригласите преподавателя для проверки схемы перед тем, как продолжить работу.)

3. Включите стенд.

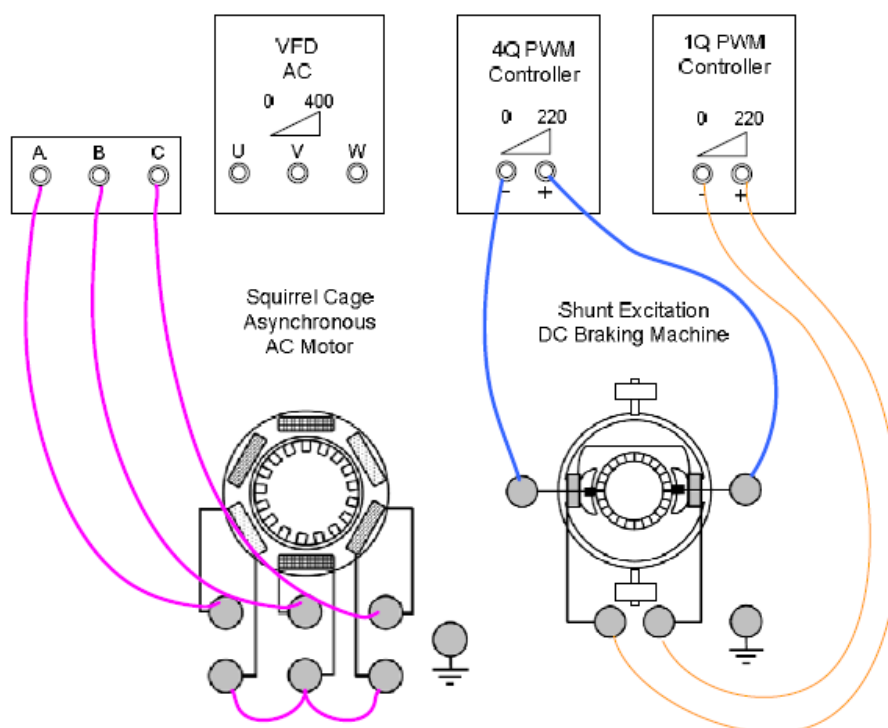


Рисунок 4.13 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Проведите согласование направлений вращения испытуемого двигателя и нагрузителя.

Для этого:

1. Замок на иконке **Тест** должен быть замкнут
2. Включите **К1** и убедитесь, что знак скорости положительный. Если знак отрицательный, остановите двигатель, разомкнув **К1**, поменяйте местами питание двух любых фаз статора АД, снова нажмите **К1** и убедитесь, что знак скорости положителен.

3. Нажмите **Стоп**.
4. Включите **К3**.
5. Ползунком **Задание3** установите ток I_B в обмотке возбуждения нагрузителя (порядка 0,2А)
6. Включите **К2**.
7. Нажмите **Пуск2**, ползунком **Задание2** поднимите задание на напряжение якоря нагрузителя и убедитесь, что знак скорости положителен.
8. Если скорость отрицательна, нажмите **Стоп**, поменяйте полярность питания обмотки якоря нагрузителя (для этого поменяйте местами провода обмотки якоря машины Г на коробке питания), и повторите пункты 4-7.
9. Нажмите **Стоп** и **Сброс М** (обнуление моментомера).
10. Щелчком по иконке **Тест** приведите изображение замка на иконке в разомкнутое положение.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя в короткозамкнутым ротором».

Внимание! Работа выполняется только после согласования вращения двигателей.

1. Замкните ключ **К3** и с помощью ползунка **Задание3** подайте на обмотку возбуждения нагрузителя ток возбуждения примерно 0,25А.
2. Замкните ключ **К2**, нажмите **Пуск2**, и ползунком **Задание2** поднимите скорость двигателей до максимальной.
3. Понижая ток возбуждения нагрузочной машины ползунком **Задание3**, поднимите скорость вращения до 3000 ($\pm 1\%$) об/мин.
4. Нажмите **К1**. На статор АД будет подано полное напряжение с частотой вращения, равной синхронной частоте вращения двигателя.
5. Ползунком **Задание3** восстановите ток возбуждения нагрузочной машины до значения 0,25А, затем уменьшением задания **Задание2** (4К РН) и, следя за показанием моментомера, плавно увеличьте нагрузку до тока статора, порядка $I_{ном}$ (2,5А).

Нажмите **Запись**. При этом автоматически в таблицу опыта будут занесены показания датчиков напряжения питания, тока статора, скорости испытуемого двигателя, потребляемой мощности и момента нагрузки (моментомера). Значения P_1 , η , $\cos\varphi$ вычисляются после окончания опыта, исходя из сохраненных в файле Excel данных.

6. Поднимая ползунком задание **Задание2**, пошагово снижайте нагрузку АД, записывая значения приборов.

7. Снимите 5-7 значений до достижения холостого хода. Вы можете отслеживать координаты измеряемых величин, вызвав из основного меню окно графиков. Пример картинку, полученной по окончании данных замеров, показан на рисунке 4.14.

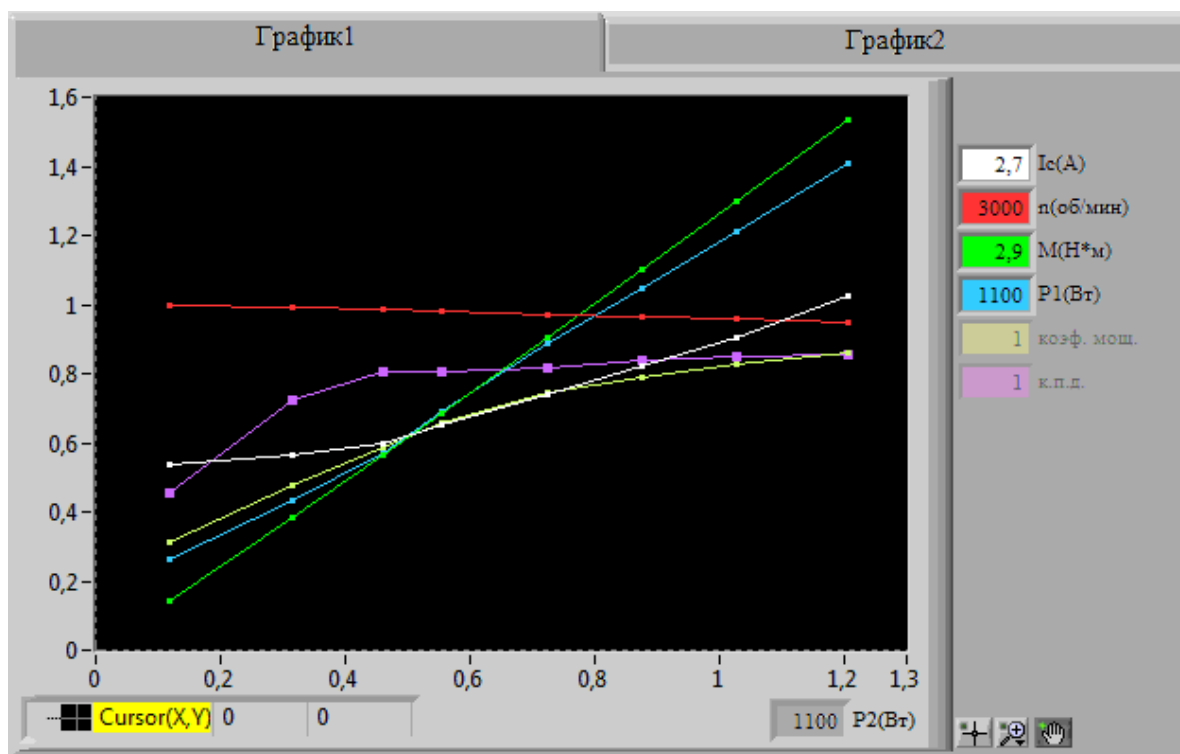


Рисунок 4.14 – Экспериментальный график рабочих характеристик АД

8. По окончании нажмите **Стоп**, если было открыто окно **Графики**, зафиксируйте картинку (правый щелчок в окне **График1** > **Фиксация** > **Вкл.**), сохраните ее в выбранной папке (**Сохранить** > выбор папки > **ОК**), вызовите файл с данными (кнопка **Таблицы Excel**), сохраните и выключите стенд.

Обработка экспериментальных данных

1. Необходимо представить таблицу 4.1 на каждом шаге измерений. Необходимые формулы: полная мощность $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$; коэффициент мощности $\cos \varphi = P_1 / S$; выходная мощность на валу двигателя $P_2 = M \cdot \pi \cdot n / 30$, К.П.Д. $\eta = P_2 / P_1$.

Таблица 4.1

N	Напряжение статора U_c	Ток статора I_c	Момент M	Частота вращения n	Активная мощность P_1	Выходная мощность P_2	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	КПД
	[В]	[А]	[Н*м]	[об/мин]	[Вт]	[Вт]	-	-

2. Представить графики зависимостей результирующих кривых 1 2 $P_1, \cos \varphi, n, \eta, I_1, M = f(P_2)$, полученных в ходе эксперимента.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Аналогично лабораторной работы 1.

Вопросы для защиты работы:

1. Поясните устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Поясните принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
3. Что такое скольжение?
4. Назовите и изобразите графики известных вам характеристик асинхронного двигателя.
5. Какие способы пуска асинхронного двигателя вы знаете?
6. Какие существуют способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей? Кратко охарактеризуйте каждый из них.

7. При каком значении выходной мощности наступает максимум К.П.Д.?
8. От чего зависит выходная мощность на валу двигателя?
9. Почему $\cos\varphi$ возрастает с повышением нагрузки на валу?
10. Почему при измерении напряжения и тока двигателя используют линейные значения?

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.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Исследование характеристик диодов, стабилитронов, тиристоров (2 ч)

Цель работы:

1. Эмпирическое определение к.п.д. и построение внешней характеристики выпрямителей на основе измерения входных и выходных токов и напряжений выпрямителя при разных значениях нагрузки.
2. Определение напряжения и минимального значения тока стабилизации стабилитрона на основе измерения вольт-амперной характеристика стабилитрона.
3. Измерение построение вольт-амперной характеристики тиристора.

В результате выполнения лабораторного занятия у студента формируется компетенции УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений, ОПК-1 Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанно.

Теоретическое обоснование

Характеристики диода и их использование для однофазных выпрямителей. Электропитание потребителей электрической энергии, коими являются электронные цепи радиотехнических, вычислительных устройств, устройств автоматики, датчики физических величин и т.д., осуществляется от источников постоянного напряжения. Поскольку промышленная выработка электроэнергии осуществляется в виде переменного тока, возникает необходимость преобразования переменного напряжения в постоянное. Для этой цели используются нелинейные элементы – диоды, характеризующиеся тем, что их динамическое сопротивление зависит от полярности приложенного напряжения. На рисунке 5.1 а приведено символическое изображение однополупериодного выпрямителя, на рисунке 5.1 б – вольт-амперная характеристика диода.

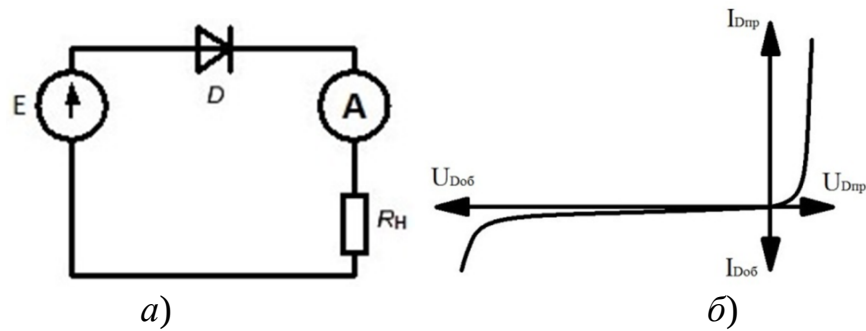


Рисунок 5.1 – Однополупериодный выпрямитель и вольт-амперная характеристика диода

Временная диаграмма выпрямленного напряжения представлен на рисунке 5.2.

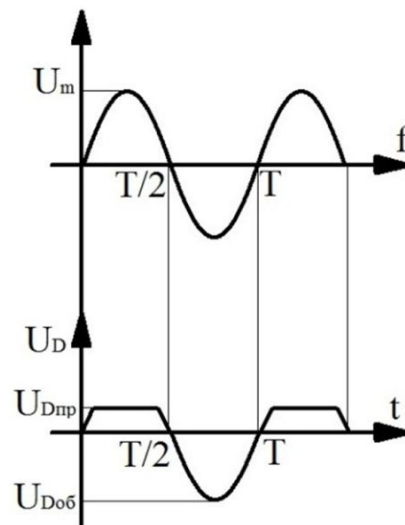


Рисунок 5.2 – Временная диаграмма выпрямленного напряжения

Средние значения выходных напряжений указанных выпрямителей V_0 , в зависимости от среднеквадратичного значения фазного входного переменного напряжения V_{RMS} , для однополупериодного выпрямителя

определяются следующим образом: $V_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{\pi}$.

$$K.П.Д. = \frac{P_0}{P_i} = \frac{U_0 \cdot I_0}{U_i \cdot I_i} \text{ – коэффициент полезного действия;}$$

$$K_M = \frac{P_a}{U_i \cdot I_i} \text{ – коэффициент мощности;}$$

$$r = \frac{U_0}{I_0} \text{ – внутреннее сопротивление;}$$

$U_{PP} = U_m - U_{cp}$ – размах пульсаций, или

$$K_p = \frac{U_{PP} P_a}{2 \cdot U_{cp}} \text{ – коэффициент пульсаций.}$$

Характеристики стабилитрона. Характеристика полупроводникового стабилитрона, символическое изображение которого приведено на рисунке 5.3 а, отличается от характеристики диода формой ветви вольт-амперной характеристики в области отрицательных напряжений, как показано на рисунке 5.3 б.

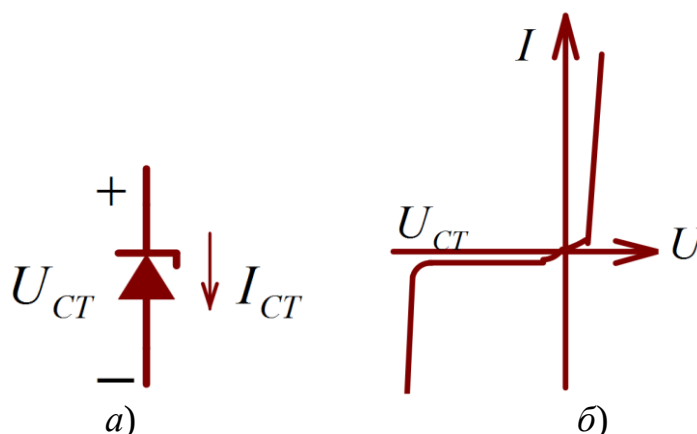


Рисунок 5.3 – Условно графическое обозначение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика

При некотором значении обратного напряжения на стабилитроне происходит пробой p - n -перехода в обратном направлении, носящий обратимый характер. При напряжении, равном значению пробоя, динамическое сопротивление стабилитрона резко уменьшается, в результате чего ток через стабилитрон определяется параметрами внешней цепи. Указанное напряжение пробоя называется напряжением стабилизации стабилитрона и является основной его характеристикой. Стабилитрон характеризуется также допустимой мощностью и обратным током. Диапазон напряжений стабилизации стабилитронов составляет от единиц до сотен вольт.

Характеристики тиристоров. Тиристор представляет собой управляемый полупроводниковый прибор с дискретной (релейной)

характеристикой управления. Символическое изображение однонаправленного тиристора представлено на рисунке 5.4 а, его типичная вольт-амперная характеристика на рисунке 5.4 б приведена.

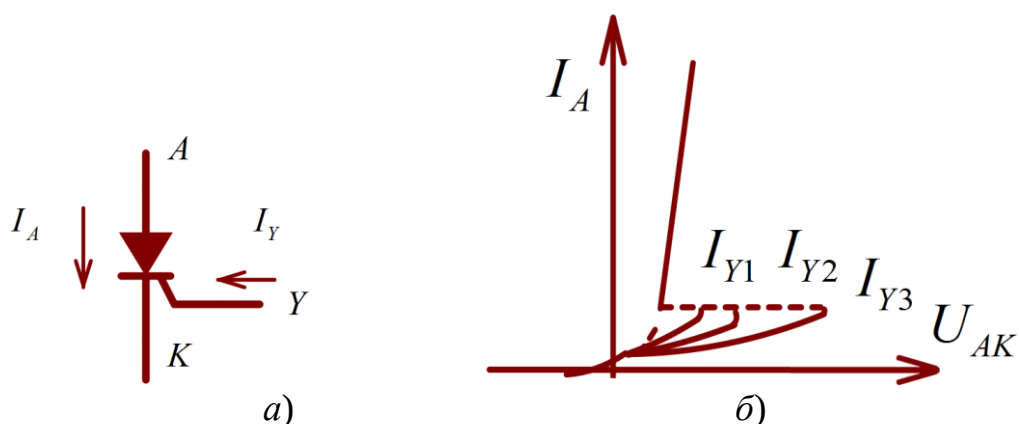


Рисунок 5.4 – Условно графическое обозначение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика

Функциональное назначение тиристора – замыкание участка электрической цепи по сигналу управления. Сигнал управления подается к управляющему электроду (У) по отношению к катоду (К). При отсутствии управляющего сигнала (тока управления) тиристор можно представить в виде разомкнутого участка электрической цепи. Это состояние тиристора называется запертым или непроводящим состоянием и характеризуется небольшим значением тока утечки, от единиц микроампер до единиц миллиампер, в зависимости от типа тиристора. При протекании определенного значения тока по цепи У-К и при наличии замкнутой цепи между источником напряжения, анодом (А) и катодом (К) тиристор переходит в проводящее состояние, т.е. отпирается, пропуская ток внешней цепи в направлении от А к К. Отпирание тиристора носит регенеративный характер, поэтому тиристор остается в проводящем состоянии после прекращения тока в цепи управления при условии, что ток в цепи А-К больше нуля. Переход тиристора из проводящего состояния в непроводящее, при отсутствии тока управления, происходит при некотором минимальном значении тока в цепи А-К, называемым током удержания $I_{уд}$. Значение $I_{уд}$ является одним из характеристик тиристора. Ток управления тиристора, при

котором последний переходит в проводящее состояние, зависит от напряжения между А и К. Чем меньше напряжение между А и К, тем больше необходимый ток управления для перехода тиристора в проводящее состояние, т.е. в состояние отпирания.

Диапазон рабочих напряжений и токов тиристорov, в зависимости от типа тиристора, составляет от десятков вольт до нескольких тысяч вольт, и от единиц ампер до нескольких тысяч ампер, соответственно. Область применения тиристорov – регулирование действующего значения переменного напряжения, управляемые выпрямители, преобразование постоянного напряжения в переменное, исполнительные узлы устройств автоматики и т.д.

Оборудование и материалы

Аналогично лабораторной работы 3.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1.

Задания

Описание макетной платы лабораторного стенда. Работа с макетной платой лабораторного стенда. Включение и подготовка к работе. Запуск программы и проведение лабораторных работ.

Аналогично лабораторной работы 3.

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 5.5).



Рисунок 5.5 – Начальное окно программы

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 5 «**Исследование характеристик диодов, стабилитронов, тиристоров**» будет содержать три эксперимента из главного меню рисунок 5.5: «Неуправляемый однофазный выпрямитель», «Стабилитрон», «Тиристор». Объем измерений для различных схем задается преподавателем.

1 эксперимент: «Неуправляемый однофазный выпрямитель».

Приборы и компоненты:

1. Источник переменного напряжения; 2. Выпрямитель однофазный;
3. Нагрузки; 4. Амперметры (**A1, A2**); 5. Вольтметр (**V1, V2**).

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 «**Неуправляемый однофазный выпрямитель**». На рисунке 5.6 показан пример окно данного эксперимента, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

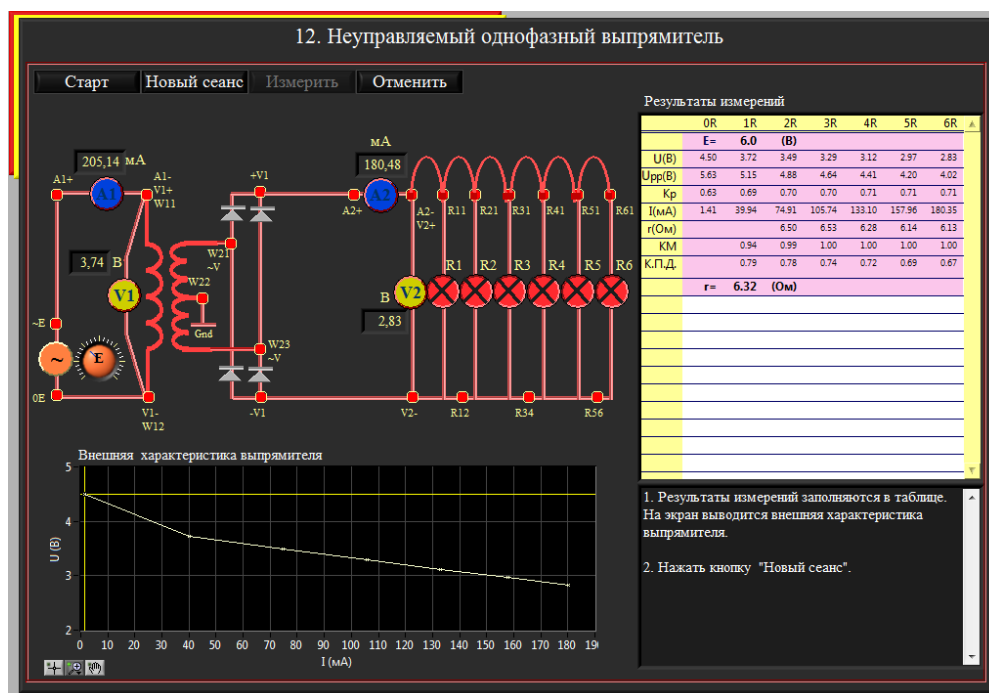


Рисунок 5.6 – Окно эксперимента неуправляемого однофазного выпрямителя

Кнопка **Старт** приводит систему в состояние готовности, на лицевую панель выводится электрическая схема выбранной лабораторной работы.

Кнопка **Новый сеанс** позволяет провести опыт с другими номиналами электронных компонентов.

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.

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 5.6, приведенном на экране.

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).

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Неуправляемый однофазный выпрямитель».

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** и следуйте инструкциям на экране.

2. Выставьте круговой регулятор напряжения источника 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 эксперимента неуправляемого однофазного выпрямителя окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 5.6.

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 **O** (выключен).

7. После завершения эксперимента в **Меню** на лицевой панели выберите элемент **Выход** для возврата в главное меню (рисунок 5.5).

2 эксперимент: «Стабилитрон». Приборы и компоненты:

1. Источник постоянного тока; 2. Амперметр (A1); 3. Вольтметр (V1).

Подготовка к проведению эксперимента «Стабилитрон».

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 5.5) двойным щелчком выберите эксперимент «Стабилитрон». На рисунке 5.7 показан пример окна данного эксперимента.

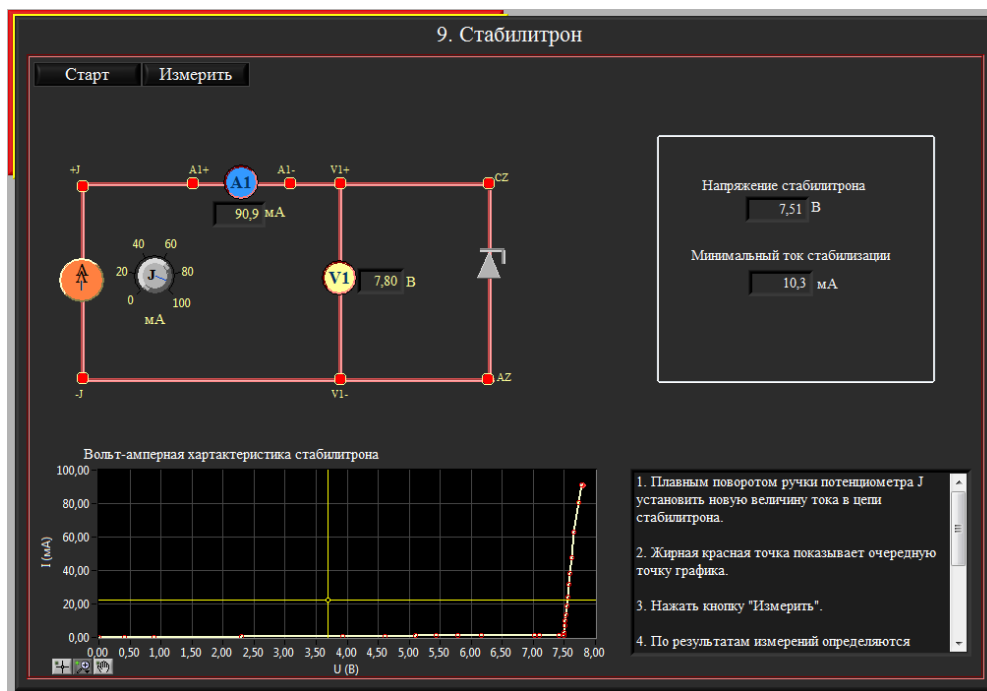


Рисунок 5.7 – Окно эксперимента «Стабилитрон»

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 5.7, приведенном на экране для схемы эксперимента «Стабилитрон».

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).

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Стабилитрон».

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** и следуйте инструкциям на экране.

2. Сохранить результаты эксперимента в папке *My Documents\Power Electronics*.

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

4. После завершения эксперимента в **Меню** на лицевой панели выберите элемент **Выход** для возврата в главное меню (рисунок 5.5).

3 эксперимент: «Тиристор». Приборы и компоненты:

1. Источник постоянного напряжения;
2. Источник постоянного напряжения;
3. Нагрузки;
4. Амперметры (**A1, A2**); 5. Вольтметры (**V1, V2**).

Подготовка к проведению эксперимента «Тиристор».

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 5.5) двойным щелчком выберите эксперимент **«Тиристор»**. На рисунке 5.8 показан пример окно данного эксперимента.

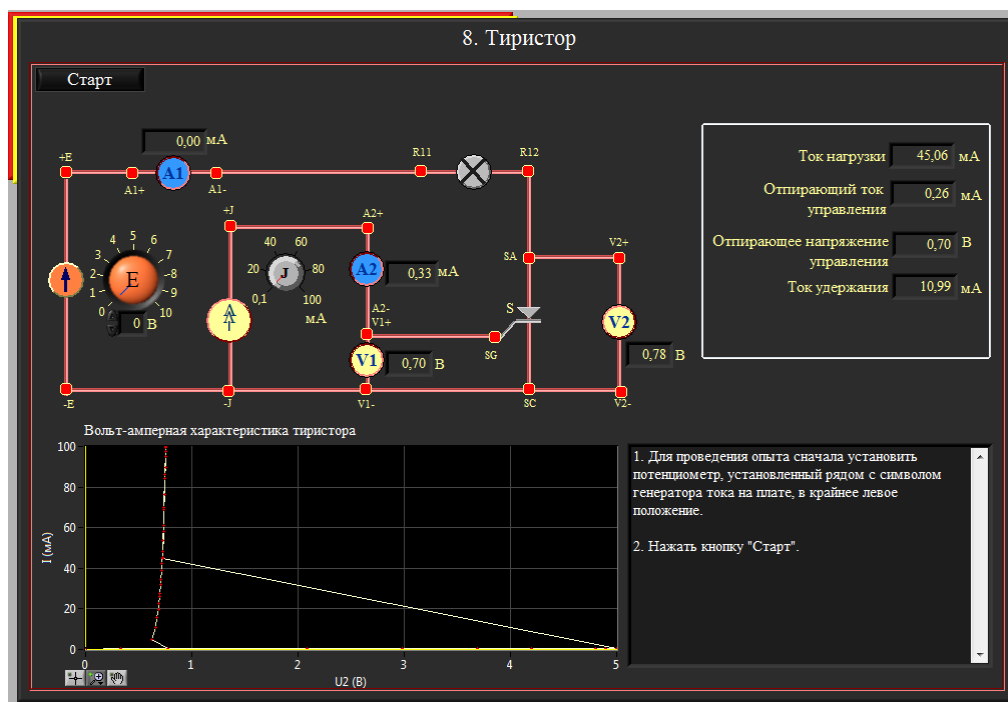


Рисунок 5.8 – Окно эксперимента «Тиристор»

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 5.8, приведенном на экране для схемы эксперимента «Тиристор».

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).

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Стабилитрон».

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** и следуйте инструкциям на экране.

2. Сохранить результаты эксперимента в папке **My Documents\Power Electronics**.

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

4. После завершения эксперимента в **Меню** на лицевой панели

выберите элемент **Выход** для возврата в главное меню (рисунок 5.5).

Обработка экспериментальных данных для данной лабораторной не требуется. Так как все необходимые вычисления и характеристики автоматически строятся в течение экспериментов, а потом сохраняются в полученный в результате измерений файл.

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить, как образуется p - n -переход. Свойства p - n -перехода, потенциальный барьер.
2. Виды полупроводниковых диодов, назначение, область применения, основные параметры и характеристики.
3. В чем отличие идеальной ВАХ полупроводникового диода от реальной?
4. Что называют прямым и обратным включениями диода? Каковы их свойства?
5. Что называют дифференциальным сопротивлением диода? Как экспериментально определить дифференциальное сопротивление стабилитрона?
6. Назначение стабилитронов, их отличие от выпрямительных диодов.
7. Сравнить ВАХ стабилитрона и выпрямительного диода.
8. Основные параметры и характеристики стабилитронов.
9. Как экспериментально снять ВАХ стабилитрона?
10. Каковы особенности вольт-амперных характеристик неуправляемого тиристора?
11. Какие составляющие токов протекают в управляемом тиристоре?
12. Какими способами можно включить и выключить тиристор?

13. Как меняется вольт-амперная характеристика управляемого тиристора при изменении напряжения на управляющем электроде?

14. Начертите схему включения тиристора для определения его параметров.

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. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций / В.А. Прянишников. – Изд. 6-е. – СПб.: КОРОНА-Век, 2014. – 416 с. – ISBN 978-5-7931-0522-4.

2. Лачин, В. И. Электроника : учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савёлов. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д. : Феникс, 2010. – 703, [1] с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17655-9

3. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: полный курс : учебное пособие / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкий, А. И. Гуров ; под ред. О. П. Глудкина. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2005. – 768 с. – ISBN 5-93517-002-7.

4. Горбачёв, Г. Н. Промышленная электроника: учебник для вузов / Г. Н. Горбачёв, Е. Е. Чаплыгин; под ред. В. А. Лабунцова. - М. : Энергоиздат, 1988. – 320 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Направление	20.03.01 Техносферная безопасность
Профиль	Пожарная безопасность
Квалификация выпускника	бакалавр
Форма обучения	заочная

Оглавление

Введение	5
Практическое занятие 1	176
Эквивалентные преобразования в электрических цепях	176
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	180
Практическое занятие 2	181
Анализ режимов цепей постоянного тока с использованием законов Ома и Кирхгофа	181
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	189
Практическое занятие 3	190
Анализ режимов цепей постоянного тока методами контурных токов и узловых потенциалов	190
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	199
Практическое занятие 4	199
Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока	199
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	210
Практическое занятие 5	211
Расчет однофазных цепей синусоидального тока	211
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	232
Практическое занятие 6	233
Расчет трехфазных цепей синусоидального тока	233
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	242
Практическое занятие 7	243
Расчет параметров трансформаторов	243
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	251
Практическое занятие 8	251
Расчет параметров вращающихся электрических машин	251
Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме	87
Практическое занятие 9	
Анализ результатов измерения электрических величин	88

Практическое занятие 1

Тема: Эквивалентные преобразования в электрических цепях

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

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

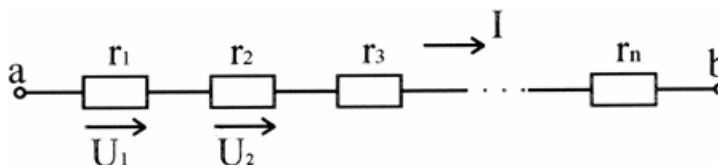


Рисунок 1.1 – Последовательное соединение сопротивлений

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*

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

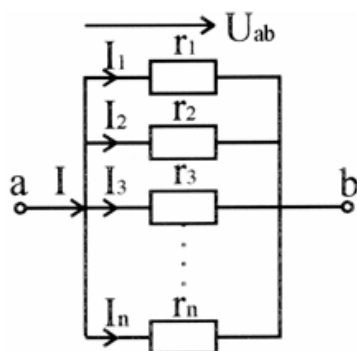


Рисунок 1.2 – Параллельное соединение сопротивлений

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).

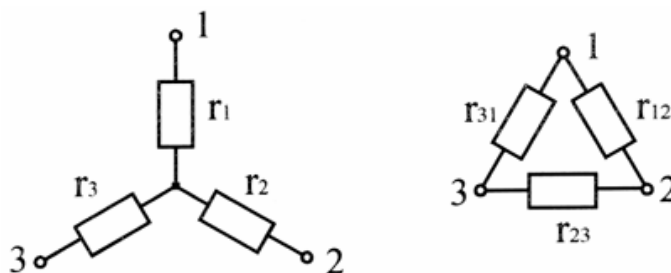


Рисунок 1.3 – Соединение сопротивлений r_1 , r_2 и r_3 звездой; соединение сопротивлений r_{12} , r_{23} и r_{31} треугольником

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)

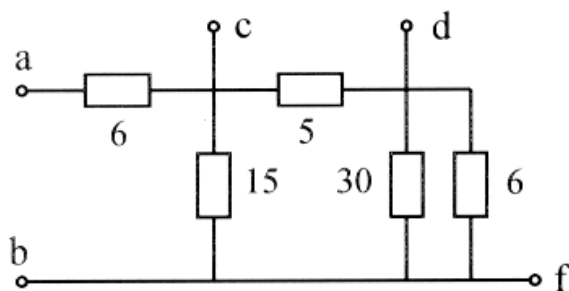


Рисунок 1.4

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

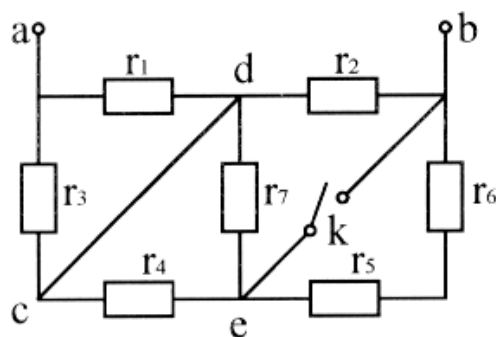


Рисунок 1.5

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. ($3,25 \text{ Ом}$)

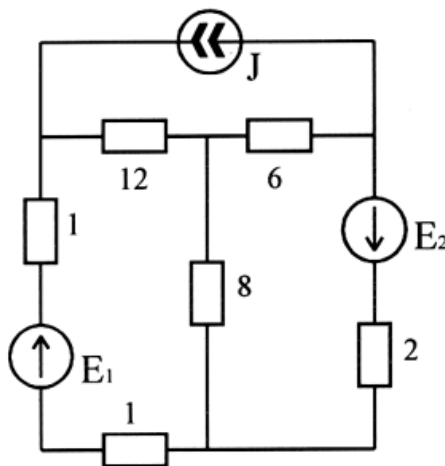


Рисунок 1.6

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.

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:

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

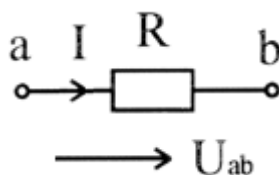


Рисунок 2.1 – Участок цепи

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:

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

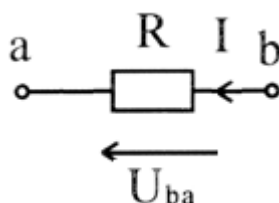


Рисунок 2.2

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

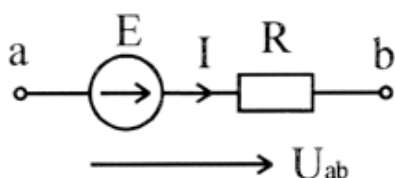


Рисунок 2.3 – Участок цепи, содержащий ЭДС

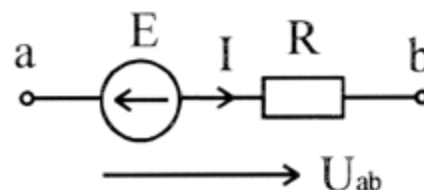


Рисунок 2.4 – Участок цепи содержащий ЭДС

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:

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

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.

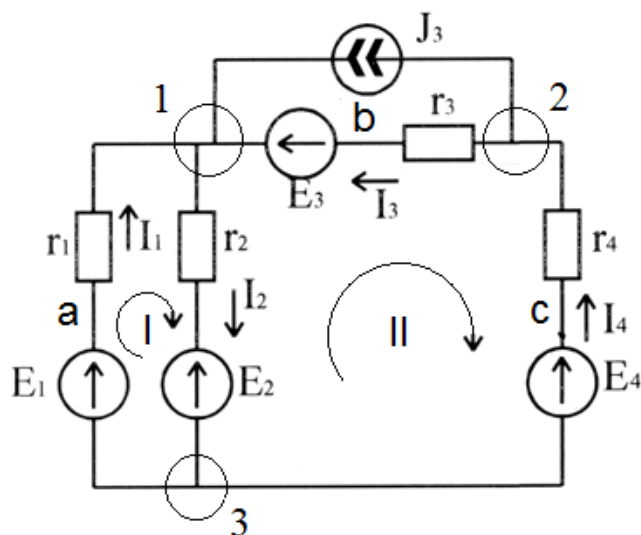


Рисунок 2.5 – Схема электрической цепи

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 y и ветвей b электрической цепи. Так, в рассматриваемой цепи имеется три узла, обозначенных цифрами 1, 2 и 3 всего $y = 3$. 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.

$$1 \text{ узел: } I_1 - I_2 + I_3 + J_3 = 0$$

$$2 \text{ узел: } I_4 - I_3 - J_3 = 0$$

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.

$$\text{I контур: } I_1 \cdot r_1 + I_2 \cdot r_2 = E_1 - E_2,$$

$$\text{II контур: } -I_2 \cdot r_2 - I_3 \cdot r_3 - I_4 \cdot r_4 = E_2 - E_3 - E_4.$$

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:

$$\begin{aligned}
\varphi_3 &= 0; \\
\varphi_a &= \varphi_3 + E_1; \\
\varphi_1 &= \varphi_a - I_1 \cdot r_1; \\
\varphi_b &= \varphi_1 - E_3; \\
\varphi_2 &= \varphi_b + I_3 \cdot r_3; \\
\varphi_c &= \varphi_2 + I_4 \cdot r_4; \\
\varphi_3 &= \varphi_c - E_4 = 0.
\end{aligned}$$

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.

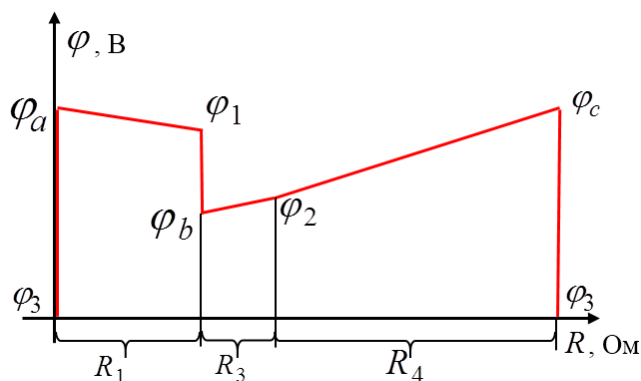


Рисунок 2.6 – Потенциальная диаграмма

Задания

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

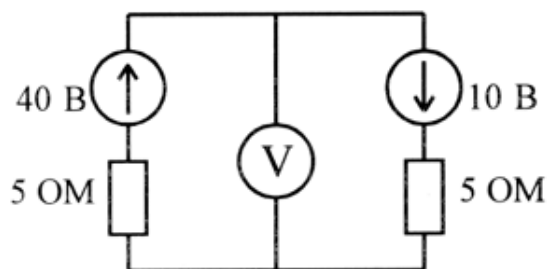


Рисунок 2.7

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)

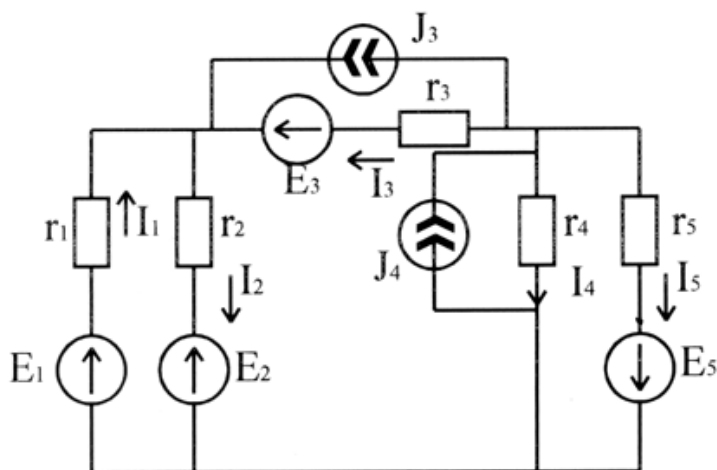


Рисунок 2.8

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.

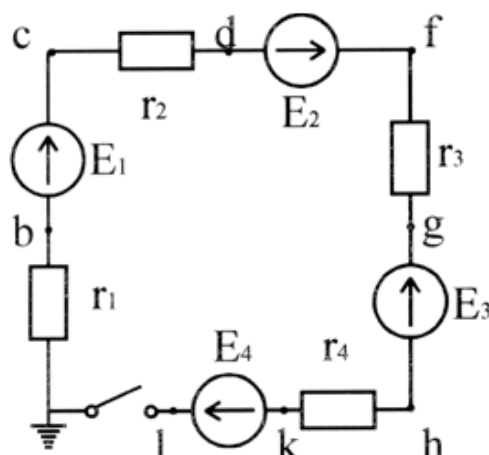


Рисунок 2.9

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

З. 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.

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.

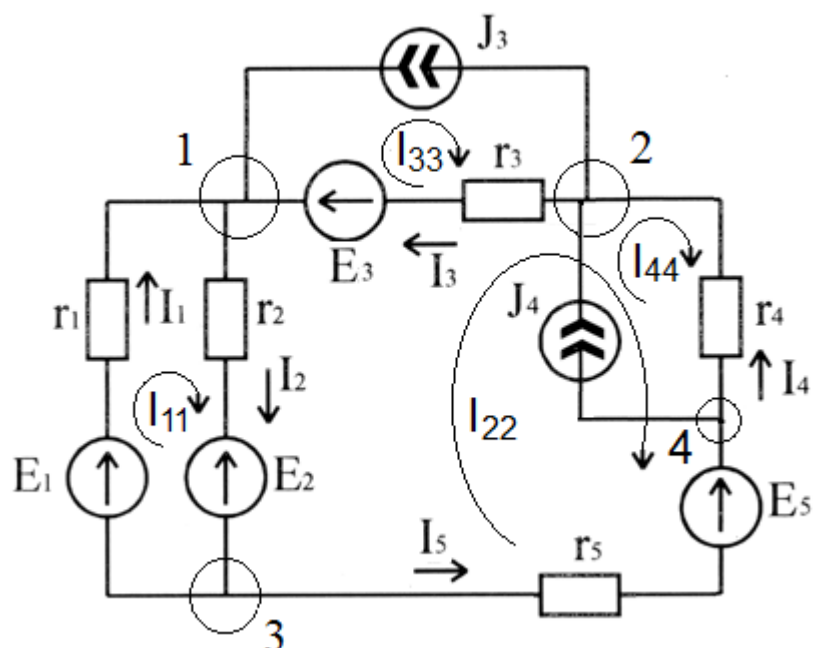


Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи для расчета по методу контурных токов

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:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{11} - I_{22}; I_3 = I_{33} - I_{22}; \\ I_4 = -I_{44} - I_{22}; I_5 = -I_{22}.$$

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 φ 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 φ 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.

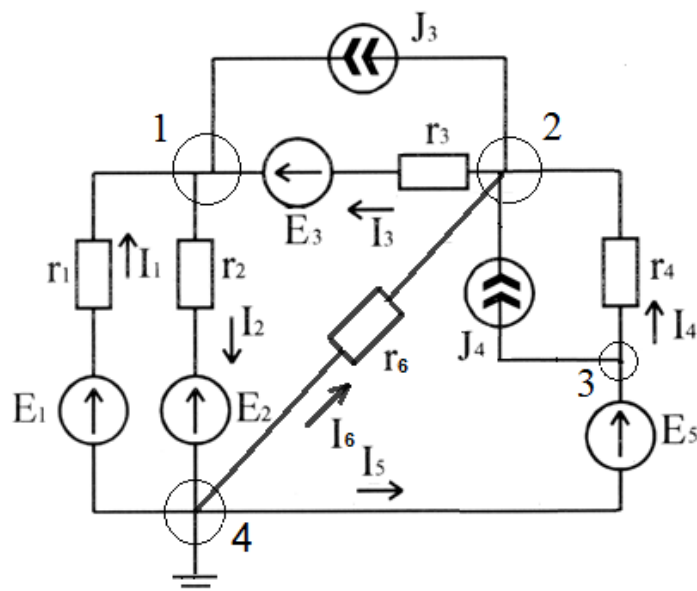


Рисунок 3.2 – Схема электрической цепи для расчета по методу узловых потенциалов

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 $g_{23} = \frac{1}{r_4}$.

$$J_{SS} = \sum_S E \cdot g + \sum_S J, \text{ где } \sum_S E \cdot g \text{ – алгебраическая сумма произведений ЭДС}$$

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

$$J_{11} = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3} + J_3, \quad J_{22} = -\frac{E_3}{r_3} - J_3 + J_4.$$

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:

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

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

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

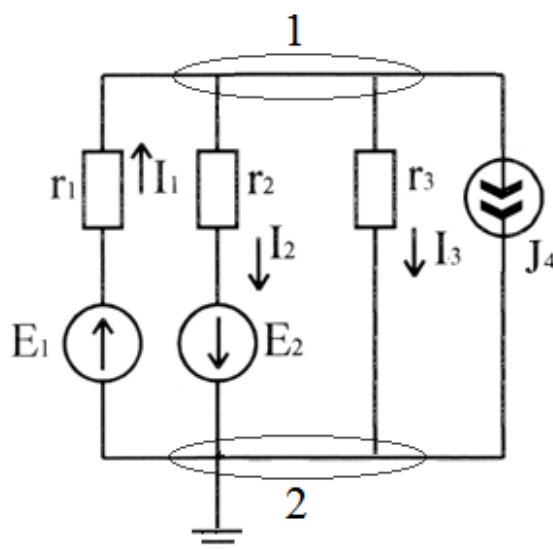
$$I_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{r_4};$$

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

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

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:

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

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)

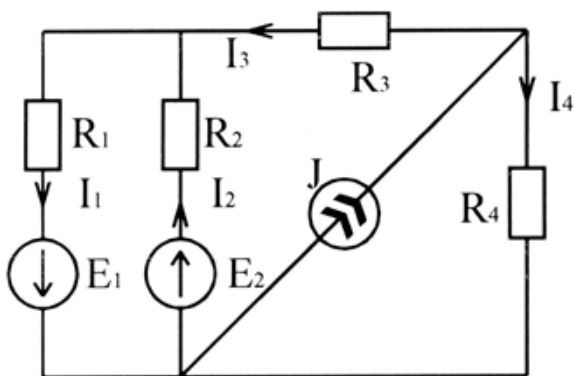


Рисунок 3.4

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)

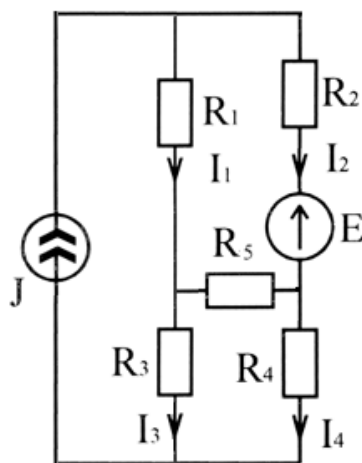


Рисунок 3.5

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.

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

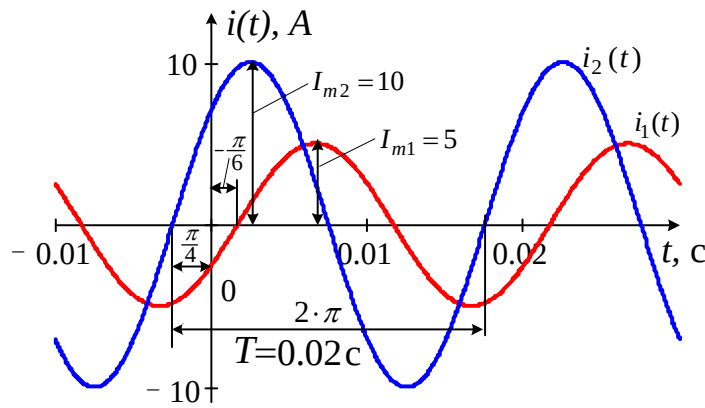
Основные понятия синусоидального тока.

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 φ 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 $\omega \cdot t$. Начальная фаза отсчитывается всегда от момента, соответствующего началу синусоиды, до момента начала отсчета времени $t = 0$. При положительной начальной фазе $\varphi_2 = \frac{\pi}{4}$ начало синусоиды тока $i_2(t)$ 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 $\dot{I}_m$.

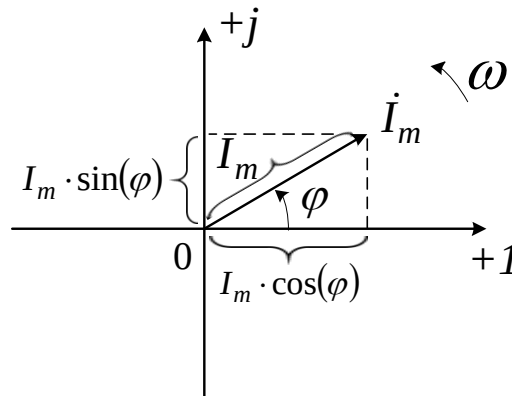


Рисунок 4.2 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

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

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

где $\dot{I}_m$ – комплексная величина, модуль (длина вектора) которой равен I_m ;

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

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

$I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ называют алгебраической формой записи комплексного числа $\dot{I}_m$.

$I_m \cdot \cos(\varphi)$ – *вещественная* часть комплекса $\dot{I}_m$ или *активная* составляющая тока $\dot{I}_m$.

$j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – *мнимая* часть комплекса $\dot{I}_m$ или *реактивная* составляющая тока $\dot{I}_m$.

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

Пример.

Запишем в комплексном виде синусоидальные токи

$$i_1(t) = 5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{\pi}{6}\right) \text{ и } i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right):$$

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

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

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

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

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 $i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$.

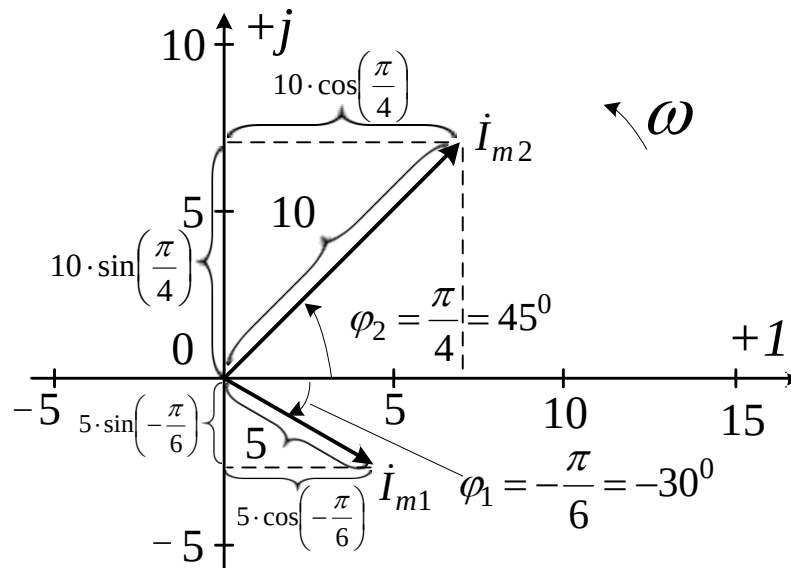


Рисунок 4.3 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

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 $i_2(t) = I_{m1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_2)$ 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 φ искомого тока. Для этого сложим два тока в комплексном виде $\dot{I}_{m1}$ и $\dot{I}_{m2}$, 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 , $\dot{I}_{m1}$, $\dot{I}_{m2}$ вращались вокруг начала координат с угловой скоростью ω , 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).

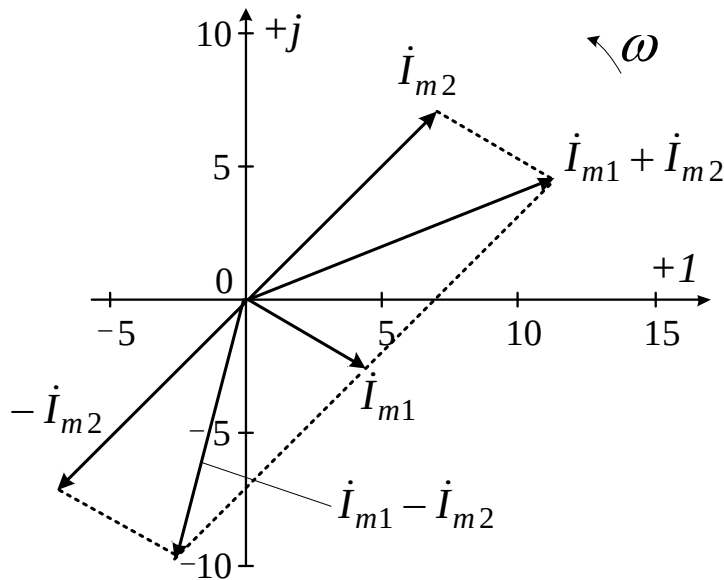


Рисунок 4.4 – Сложение и вычитание синусоидальных величин на комплексной плоскости

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

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

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

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

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

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:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{m1} \cdot \dot{I}_{m2} &= 5 \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{6}\right)} \cdot 10 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)} = 50 \cdot e^{j \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{6}\right)} = 50 \cdot e^{j \cdot (15^\circ)}, \\ \frac{\dot{I}_{m1}}{\dot{I}_{m2}} &= \frac{5}{10} \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{4}\right)} = 0,5 \cdot e^{j \cdot \left(-\frac{5}{12} \cdot \pi\right)} = 0,5 \cdot e^{j \cdot (-75^\circ)}.\end{aligned}$$

Умножение в алгебраической форме записи:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{m1} \cdot \dot{I}_{m2} &= (4,33 - j \cdot 2,5) \cdot (7,071 + j \cdot 7,071) = \\ &= 4,33 \cdot 7,071 + j \cdot 7,071 \cdot 4,33 - j \cdot 2,5 \cdot 7,071 - j \cdot 2,5 \cdot j \cdot 7,071.\end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{aligned}\frac{\dot{I}_{m1}}{\dot{I}_{m2}} &= \frac{(4,33 - j \cdot 2,5)}{(7,071 + j \cdot 7,071)} = \frac{(4,33 - j \cdot 2,5) \cdot (7,071 - j \cdot 7,071)}{(7,071 + j \cdot 7,071) \cdot (7,071 - j \cdot 7,071)} = \\ &= \frac{4,33 \cdot 7,071 - j \cdot 7,071 \cdot 4,33 - j \cdot 2,5 \cdot 7,071 + j \cdot 2,5 \cdot j \cdot 7,071}{7,071 \cdot 7,071 - j \cdot 7,071 \cdot 7,071 + j \cdot 7,071 \cdot 7,071 + 7,071 \cdot 7,071} = \\ &= \frac{12,94 - j \cdot 48,295}{100} = 0,129 - j \cdot 0,483\end{aligned}$$

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).

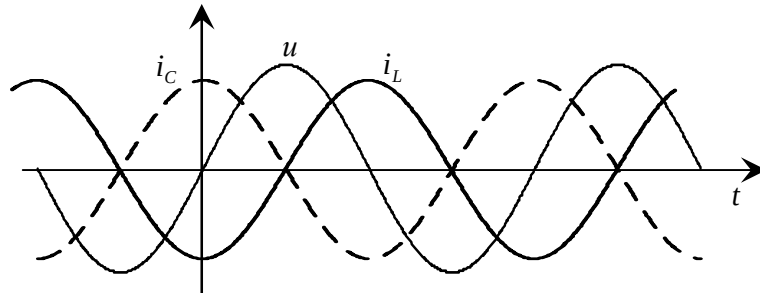


Рисунок 4.5 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе напряжения равной нулю

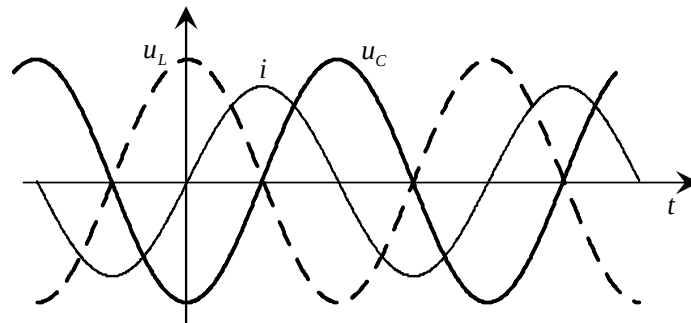


Рисунок 4.6 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах. При начальной фазе тока равной нулю

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.

$$\text{а) } i_1(t) = 100 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ), \mu\text{А}; \quad i_2(t) = 120 \cdot \sin(\omega \cdot t - 45^\circ), \mu\text{А};$$

$$\text{б) } i_1(t) = -20 \cdot \sin(\omega \cdot t - 112^\circ), \mu\text{А}; \quad i_2(t) = 50 \cdot \sin(\omega \cdot t + 250^\circ), \mu\text{А};$$

$$\text{в) } i_1(t) = 50 \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ), \mu\text{А}; \quad i_2(t) = 25 \cdot \sin(\omega \cdot t + 110^\circ), \mu\text{А};$$

3. Катушка с активным сопротивлением $R = 10$ Ом, индуктивностью $L = 0,05$ Гн подключена к источнику синусоидального напряжения (рисунок 7.7), действующее значение которого $U = 120$ В, $f = 50$ 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. ($X_L = 15,7$ Ом, $Z = 18,6$ Ом, $\varphi = 57^\circ 30'$, $I = 6,45$ А, $U_{X_L} = 103$ В, $U_R = 64,5$ В)

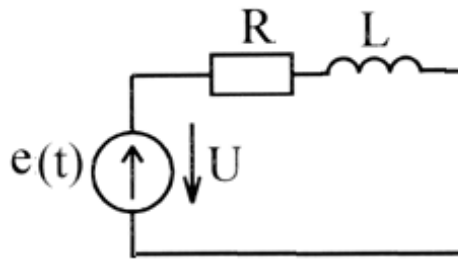


Рисунок 4.7

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

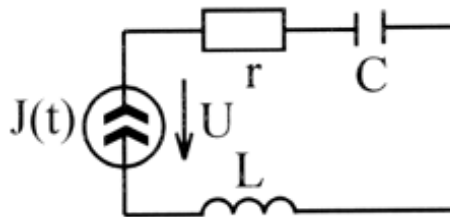


Рисунок 4.8

$$(u_r(t) = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ),$$

$$u_L(t) = 25 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ),$$

$$u_C(t) = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t - 60^\circ),$$

$$u(t) = 20,6 \cdot \sin(\omega \cdot t + 44^\circ),$$

$$p(t) = 17,67 - 18 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + 74^\circ)).$$

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.

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.

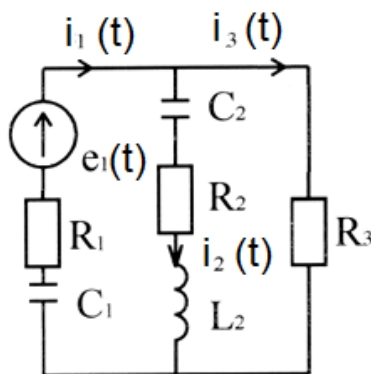


Рисунок 5.1 – Схема электрической цепи синусоидального тока

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:

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

Мгновенное значение напряжения на индуктивной катушке $u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$ заменено комплексом $\dot{I}_m \cdot j \cdot \omega \cdot L$, 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 $\dot{I}_m \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right)$, 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 $\dot{I}$ и напряжений $\dot{U}$, которые в $\sqrt{2}$ раз меньше соответствующих амплитудных комплексов $\dot{I}_m$ $\dot{U}_m$. 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.

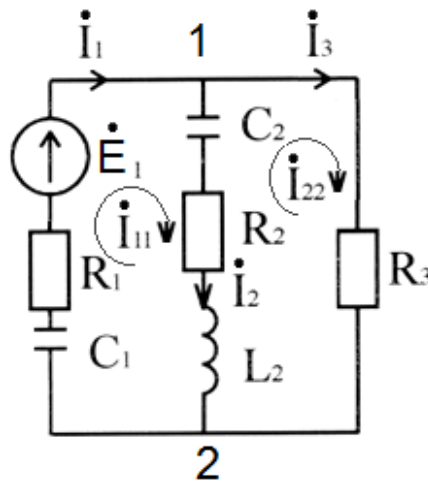


Рисунок 5.2 – Схема электрической цепи синусоидального тока

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

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

Решив систему уравнений (5.3), получим комплексы неизвестных токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$. 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 $\dot{I}_{11}$, $\dot{I}_{22}$ взяты по часовой стрелке. Источников тока в схеме нет. Таким образом, система уравнений по методу контурных токов будет иметь две строки и два столбца:

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

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.

$\dot{E}_{mm}$ – комплекс алгебраической суммы ЭДС, входящих в контур m . В нашем случае $\dot{E}_{11} = \dot{E}_1$, $\dot{E}_{22} = 0$.

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

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \cdot (R_1 - j \cdot X_{C_1} - j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}) - \dot{I}_{22} \cdot (-j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}) = \dot{E}_1 \\ -\dot{I}_{11} \cdot (-j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2}) + \dot{I}_{22} \cdot (-j \cdot X_{C_2} + R_2 + j \cdot X_{L_2} + R_3) = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

Решив полученную систему (5.5) относительно $\dot{I}_{11}$ и $\dot{I}_{22}$, найдем токи в ветвях электрической цепи.

Токи в ветвях электрической цепи, через контурные токи определяются следующим образом: $\dot{I}_1 = \dot{I}_{11}$; $\dot{I}_2 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22}$; $\dot{I}_3 = \dot{I}_{22}$.

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 $\dot{U}_{12} = -\dot{U}_{21}$ по методу двух узлов:

$$\dot{U}_{12} = (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) = -\dot{U}_{21} = -(\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) = \frac{\dot{E}_1 \cdot \frac{1}{R_1 - j \cdot X_{C_1}}}{\frac{1}{R_1 - j \cdot X_{C_1}} + \frac{1}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} + \frac{1}{R_3}}. \quad (5.6)$$

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

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{R_1 - j \cdot X_{C_1}}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}; \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2}{R_3}.$$

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 $\dot{I}_1$ используем закон Ома:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}_1}{R_1 - j \cdot X_{C_1} + \frac{R_3 \cdot (R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}}; \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}; \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}. \end{aligned}$$

Комплексное сопротивление относительно источника $\dot{E}_1$ 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 $\dot{I}_2$, 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 $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$ определялись через параллельное токораспределение $\dot{I}_1$ 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.

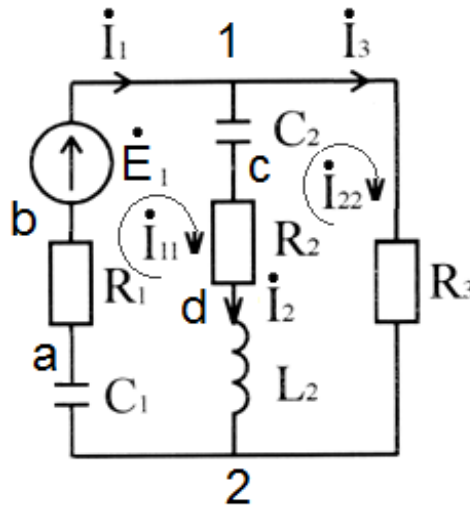


Рисунок 5.3 – Схема электрической цепи синусоидального тока

Решение.

Воспользуемся методом двух узлов

$$\dot{U}_{12} = (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) = -\dot{U}_{21} = -(\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) = \frac{\dot{E}_1 \cdot \frac{1}{R_1 - j \cdot X_{C_1}}}{\frac{1}{R_1 - j \cdot X_{C_1}} + \frac{1}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} + \frac{1}{R_3}}.$$

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

$$\dot{E}_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot \varphi_1}, \text{ т.к. } E_m = 200 \cdot \sqrt{2}, \text{ а } \varphi_1 = 0. \text{ Тогда } \dot{E}_1 = 200 \cdot e^{j \cdot 0} = 200 \text{ В}.$$

Подставим в выражение $\dot{U}_{12}$ полученные значения:

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

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 $\dot{U}_{12}$, получим:

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

Теперь найдем ток $\dot{I}_1$, используя закона Ома:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}_1 - (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{R_1 - j \cdot X_{C_1}} = \frac{200 - \left(\frac{600 + j \cdot 200}{9} \right)}{10 - j \cdot 10} = \frac{1800 - 600 - j \cdot 200}{10 - j \cdot 10} = \\ &= \frac{(1200 - j \cdot 200)}{(90 - j \cdot 90)} = \frac{(1200 - j \cdot 200) \cdot (90 + j \cdot 90)}{(90 - j \cdot 90) \cdot (90 + j \cdot 90)} = \\ &= \frac{1200 \cdot 90 + j \cdot 90 \cdot 1200 - j \cdot 200 \cdot 90 + 200 \cdot 90}{90^2 + 90^2} = \frac{126000 + j \cdot 90000}{16200} = \\ &= \frac{70}{9} + j \cdot \frac{50}{9} \approx 7,778 + j \cdot 5,556. \end{aligned}$$

В показательной форме записи ток $\dot{I}_1$ равен:

$$\dot{I}_1 = |\dot{I}_1| \cdot e^{j \cdot \arg(\dot{I}_1)} = \sqrt{\left(\frac{70}{9}\right)^2 + \left(\frac{50}{9}\right)^2} \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{50/9}{70/9}\right)} = \sqrt{\frac{7400}{81}} \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{5}{7}\right)} \approx 9,558 \cdot e^{j \cdot (35,538^\circ)}.$$

Ток $\dot{I}_2$ будет равен:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} = \frac{\frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9}}{10 + j \cdot 5 - j \cdot 10} = \frac{40}{9} + j \cdot \frac{40}{9} \approx 4,444 + j \cdot 4,444.$$

Ток $\dot{I}_2$ в показательной форме записи $\dot{I}_2 = |\dot{I}_2| \cdot e^{j \cdot \arg(\dot{I}_2)} \approx 6,285 \cdot e^{j \cdot (45^\circ)}.$

Ток $\dot{I}_3$ будет равен:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2}{R_3} = \frac{\frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9}}{20} = \frac{10}{3} + j \cdot \frac{10}{9} \approx 3,333 + j \cdot 1,111.$$

Ток $\dot{I}_3$ в показательной форме записи $\dot{I}_3 = |\dot{I}_3| \cdot e^{j \cdot \arg(\dot{I}_3)} \approx 3,514 \cdot e^{j \cdot (18,435^\circ)}.$

Таким образом, запишем мгновенные значения токов:

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

Векторная диаграмма токов.

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

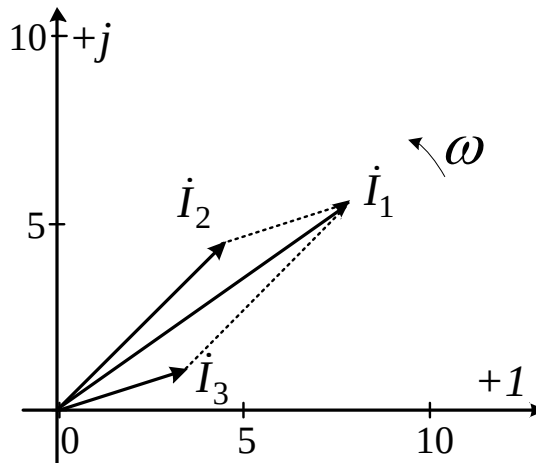


Рисунок 5.4 – Векторная диаграмма токов

Определим потенциалы точек электрической схемы рисунок 5.3.

$$\dot{\phi}_2 = 0;$$

стрелку вектора $\dot{U}_{ac}$, а второй индекс – от какой точки. Наглядное представление о фазовом расположении различных векторов дает векторная диаграмма токов и напряжений. Аналитические расчеты электрических цепей синусоидального тока рекомендуется сопровождать построением векторных диаграмм, чтобы иметь возможность качественно контролировать эти расчеты. Качественный контроль заключается в сравнении направлений различных векторов на комплексной плоскости, которые получают при аналитическом расчете, с направлением этих векторов исходя из физических соображений. Например, в рассматриваемом случае, на векторной диаграмме напряжение $\dot{U}_{L_2}$ должно опережать ток $\dot{I}_2$ на 90° , а напряжение $\dot{U}_{C_1}$ – отставать от тока $\dot{I}_1$ на 90° .

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:

$$P_{\text{пол}} = U_{R_1} \cdot I_1 + U_{R_2} \cdot I_2 + U_{R_3} \cdot I_3 = \left(|\dot{I}_1| \right)^2 \cdot R_1 + \left(|\dot{I}_2| \right)^2 \cdot R_2 + \left(|\dot{I}_3| \right)^2 \cdot R_3,$$

где U_{R_1} , U_{R_2} , U_{R_3} – действующие значения напряжения на резисторах, $|\dot{I}_1|$ – модуль (длина вектора) комплекса тока $\dot{I}_1$.

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

Реактивная мощность в цепи переменного тока:

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

Комплекс полной мощности получаемой нагрузкой от источника ЭДС $\dot{E}_1$:

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

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 $\dot{S}_{\text{отд}}$, отдаваемой (генерируемой) источником ЭДС $\dot{E}_1$, определяется следующим образом:

$$\dot{S}_{\text{отд}} = \dot{E}_1 \cdot \dot{I}_1^*,$$

где $\dot{I}_1^*$ – сопряженный комплекс тока $\dot{I}_1$. Для рассматриваемой схемы $\dot{I}_1 = 7,778 + j \cdot 5,556$. Сопряженный комплекс тока $\dot{I}_1^*$ отличается от простого комплекса $\dot{I}_1$ тем, что у мнимой части тока $\dot{I}_1$ необходимо изменить знак $\dot{I}_1^* = 7,778 - j \cdot 5,556$ (в рассматриваемом случае знак «плюс» меняется на «минус»).

Таким образом, $\dot{S}_{\text{отд}} = 200 \cdot (7,778 - j \cdot 5,556) = 1556 - j \cdot 1111.$

Вещественная часть комплекса полной мощности $\dot{S}_{\text{отд}}$ обозначается $P_{\text{отд}}$ и является активной мощностью, генерируемой источником $\dot{E}_1$. Мнимая часть – это реактивная мощность $Q_{\text{отд}}$. В рассматриваемом случае $P_{\text{отд}} = 1,556$ кВт, $Q_{\text{отд}} = -j \cdot 1,111$ 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.

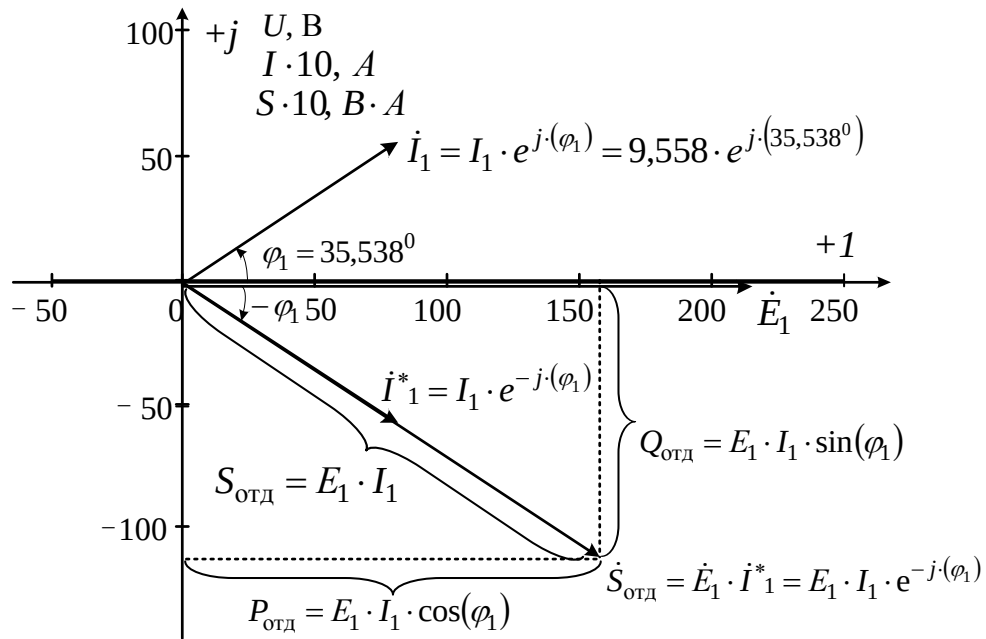


Рисунок 5.7 – Векторная диаграмма токов, напряжений и мощностей
Измерение активной мощности в цепи переменного тока.

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.

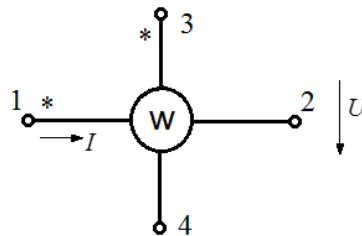


Рисунок 5.8 – Изображение ваттметра на электрической схеме

Ваттметр измеряет значение $W = \operatorname{Re}[\dot{U} \cdot \dot{I}^*] = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$, 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).

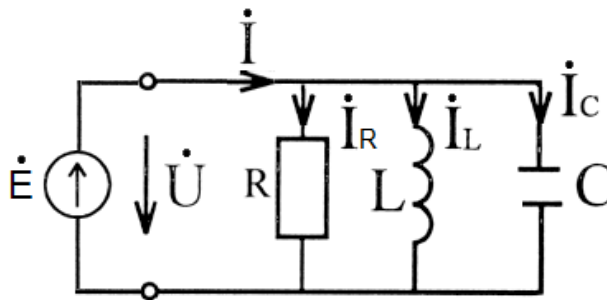


Рисунок 5.9 – Параллельный колебательный контур

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

$$\dot{I} = \dot{U} \cdot \underline{Y},$$

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

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

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

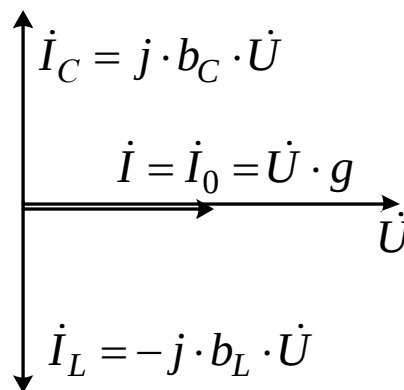


Рисунок 5.10 – Векторная диаграмма токов при параллельном резонансе

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 $d = \frac{1}{Q}$.

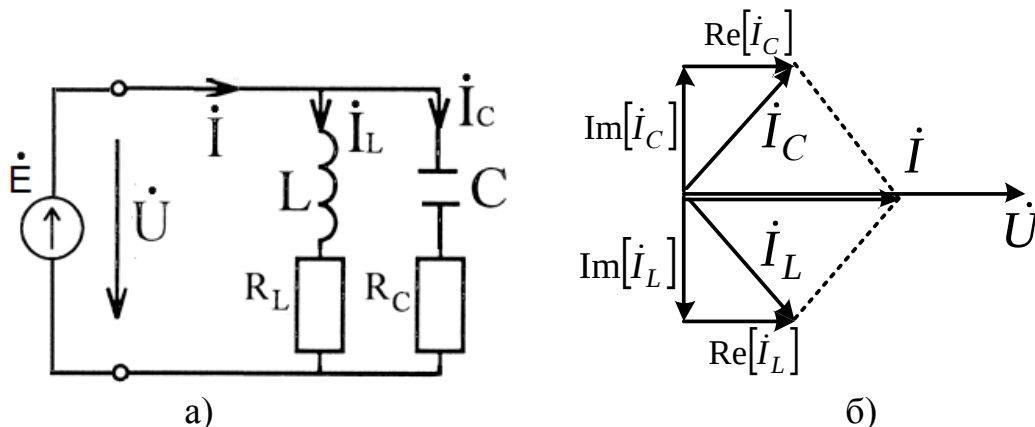


Рисунок 5.11 – Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б) параллельного колебательного контура в режиме резонанса

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

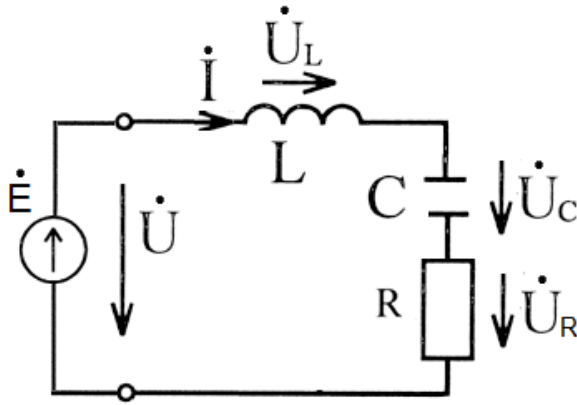


Рисунок 5.12 – Последовательный колебательный контур
По закону Ома комплексная величина тока в контуре определяется

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

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.

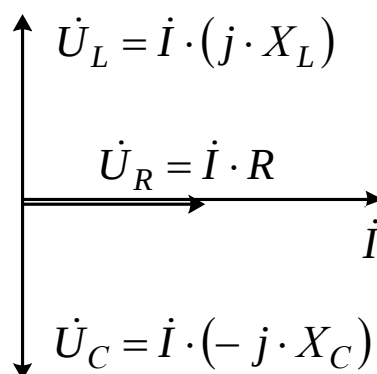


Рисунок 5.13 – Векторная диаграмма напряжений при последовательном резонансе

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

поток, 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.

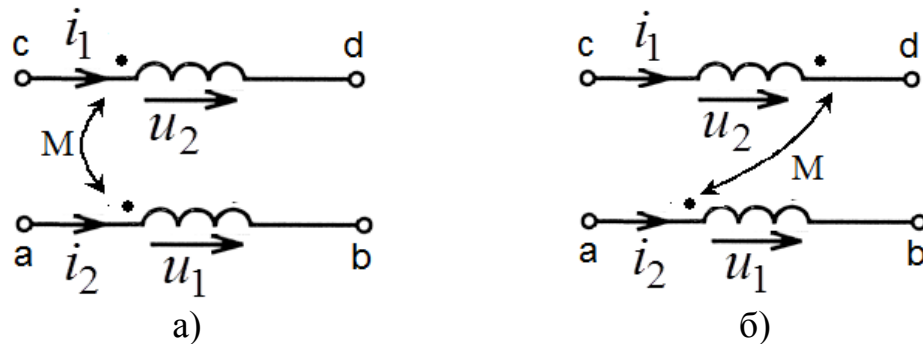


Рисунок 5.14 – Схема замещения электрической цепи

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:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2, \quad \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1;$$

при встречном включении –

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2, \quad \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1.$$

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 будут 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)

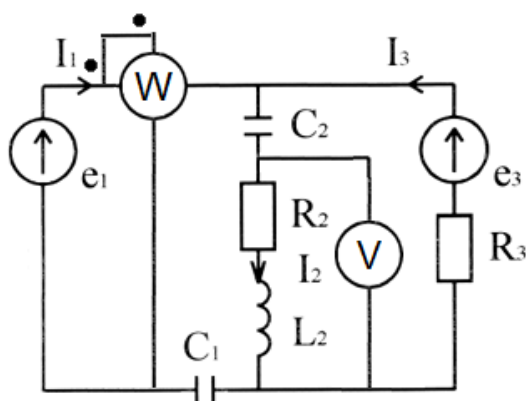


Рисунок 5.15

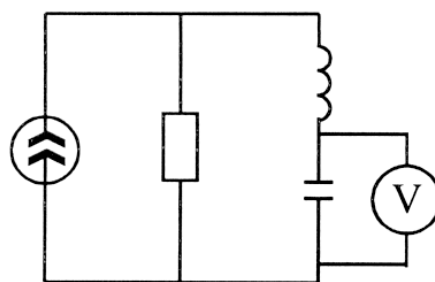


Рисунок 5.16

2. Источник тока $J(t) = 10 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, частота которого может изменяться, подключен к схеме рисунок 5.16 с параметрами $R = 10$ Ом, $C = 1$ 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: $U(t) = 10 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(500 \cdot t)$, В; $R = 16$ Ом; $L = 1,6$ мкФ. ($C = 25$ мкФ, $I = 0,625$ А, $I_L = I_C = 1,25$ А)

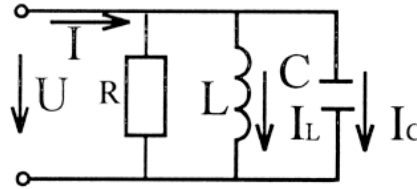


Рисунок 5.17

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

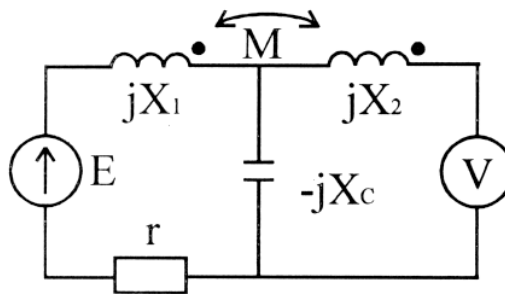


Рисунок 5.18

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. ($\dot{I}_1 = 0.3 \cdot e^{-j \cdot 10^\circ}$ А, $\dot{I}_2 = 0.97 \cdot e^{j \cdot 41^\circ}$ А, $\dot{I}_3 = 1.18 \cdot e^{j \cdot 30^\circ}$ А)

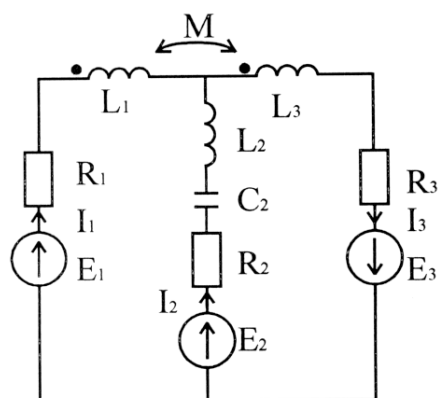


Рисунок 5.19

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.

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.

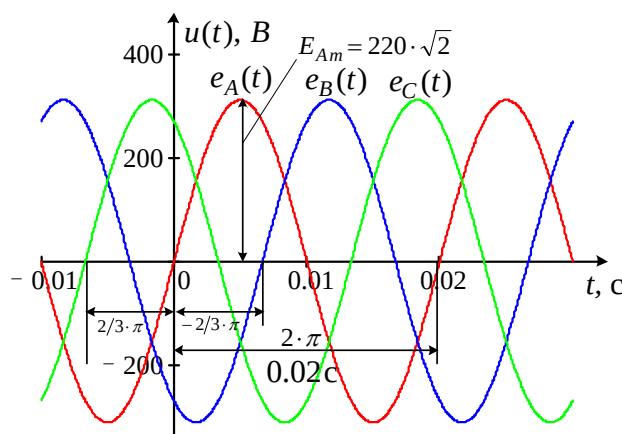


Рисунок 6.1 – Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС

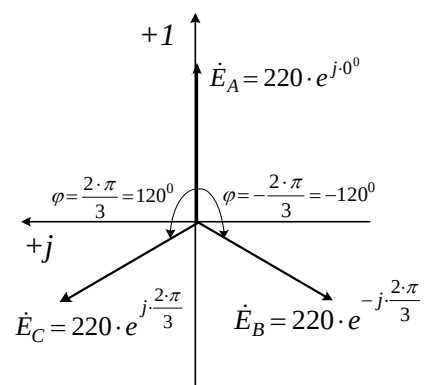


Рисунок 6.2 – Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС

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 .

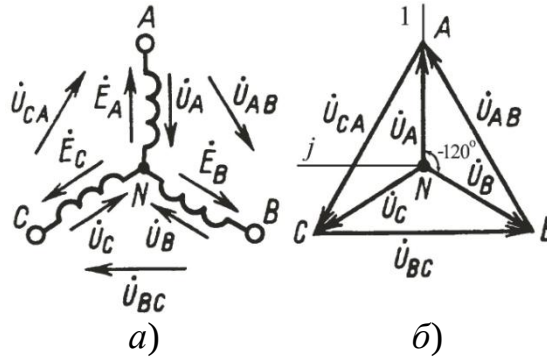


Рисунок 6.3 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора звездой (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

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

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

линейные напряжения (рисунок 6.3 б)

$$\dot{U}_{AB} = U_\phi \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}; \dot{U}_{BC} = U_\phi \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{2}}; \dot{U}_{CA} = U_\phi \cdot e^{j \cdot \frac{5 \cdot \pi}{6}}. \quad (6.3)$$

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.

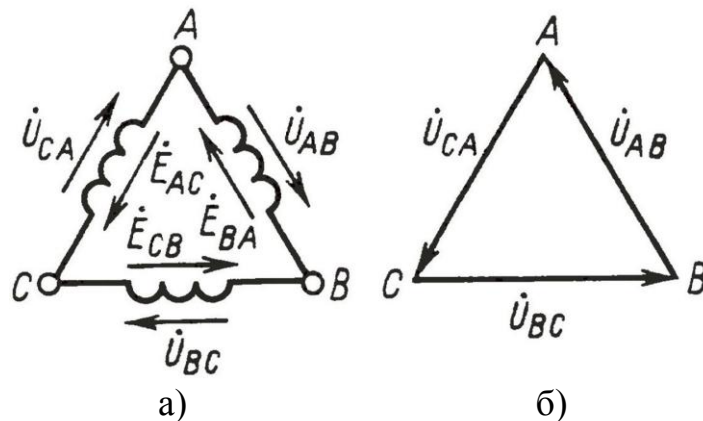


Рисунок 6.4 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора треугольником (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

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 $\dot{U}_{nN}$ равно нулю, а токи в фазах

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{(\underline{Z} + \underline{Z}_л)}, \quad (6.6)$$

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

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

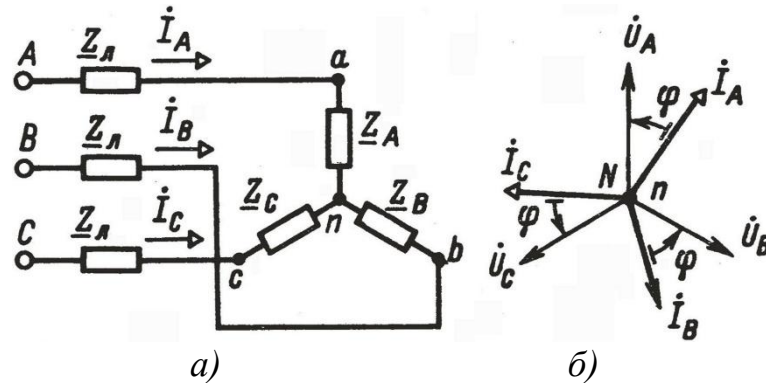


Рисунок 6.5 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

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

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB}/(\underline{Z}); \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC}/(\underline{Z}); \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA}/(\underline{Z}). \quad (6.8)$$

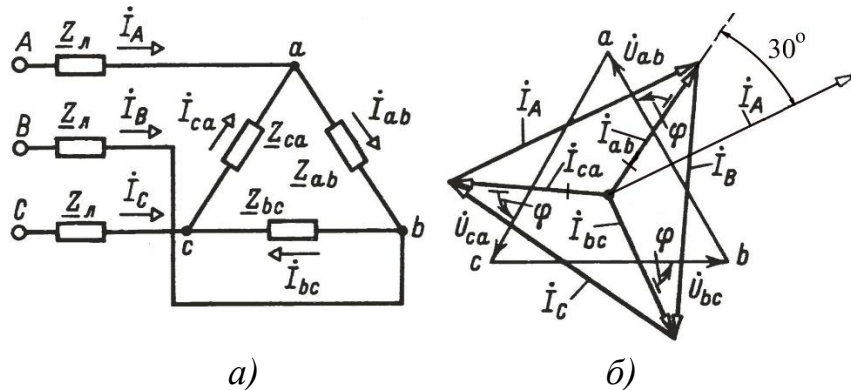


Рисунок 6.6 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

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

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

Линейные токи приемника определяются разностью фазных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (6.10)$$

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 6.6 б),

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{6}}; \dot{I}_B = \dot{I}_A \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}; \dot{I}_C = \dot{I}_A \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}. \quad (6.11)$$

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_\phi}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_\phi}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_\phi}. \quad (6.12)$$

Фазные токи определяются через линейные:

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

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

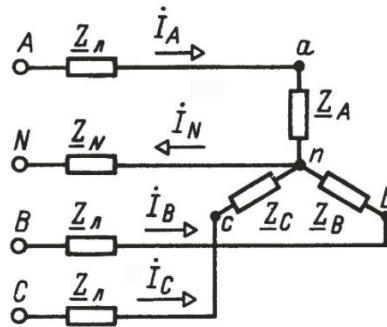


Рисунок 6.7 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (6.14)$$

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

Линейные токи и ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_L}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_L}; \quad \dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_N}. \quad (6.15)$$

По первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (6.16)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \frac{\dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_B - \dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad \dot{U}_{Bn} = \frac{\dot{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_C - \dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \\ \dot{U}_{Cn} &= \frac{\dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_A - \dot{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \end{aligned} \quad (6.17)$$

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{An} / (\underline{Z}_A + \underline{Z}_L); \quad \dot{I}_B = \dot{U}_{Bn} / (\underline{Z}_B + \underline{Z}_L); \quad \dot{I}_C = \dot{U}_{Cn} / (\underline{Z}_C + \underline{Z}_L). \quad (6.18)$$

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:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A - \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B; \quad \dot{U}_{bc} = \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B - \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C; \\ \dot{U}_{ca} &= \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C - \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A; \end{aligned} \quad (6.19)$$

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / (\underline{Z}_{ab}); \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / (\underline{Z}_{bc}); \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / (\underline{Z}_{ca}), \quad (6.20)$$

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:

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

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

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

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).

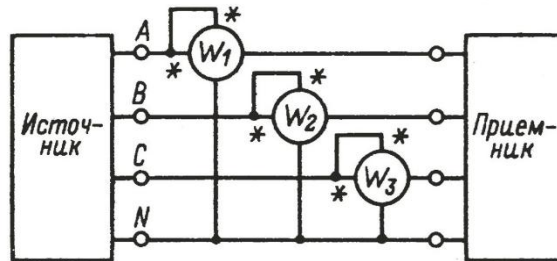


Рисунок 6.8 – Схема для измерения мощности трехфазной цепи с нейтральным проводом

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.

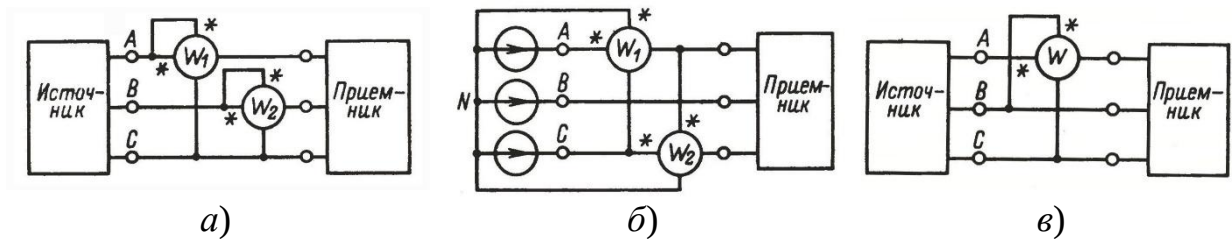


Рисунок 6.9 – Схемы для измерения трехфазной активной мощности в цепи без нейтрального провода (а) и реактивной мощности при несимметричной (б) и симметричной нагрузке (в)

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; $i = 3\sqrt{2} \sin \omega t \text{ А}$).

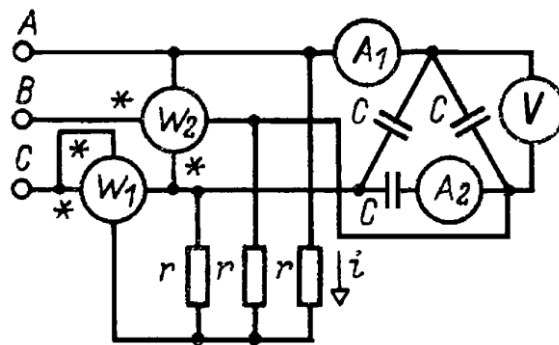


Рисунок 6.10

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. ($\dot{I}_A = 37,9e^{-j60^{0}10'}$ А,

$$\dot{I}_B = 27,4e^{-j67^{0}40'} \text{ А, } \dot{I}_C = 41,6e^{-j108^{0}35'} \text{ А, } \dot{I}_N = 24,8e^{-j49^{0}25'} \text{ А,}$$

$$\dot{U}_{an} = 170e^{-j3^{0}15'} \text{ В, } \dot{U}_{bn} = 230e^{-j134^{0}20'} \text{ В, } \dot{U}_{cn} = 208e^{j108^{0}35'} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{AN} = 195e^{-j2^{0}5'} \text{ В, } \dot{U}_{BN} = 243e^{-j125^{0}} \text{ В, } \dot{U}_{CN} = 213e^{-j110^{0}45'} \text{ В}).$$

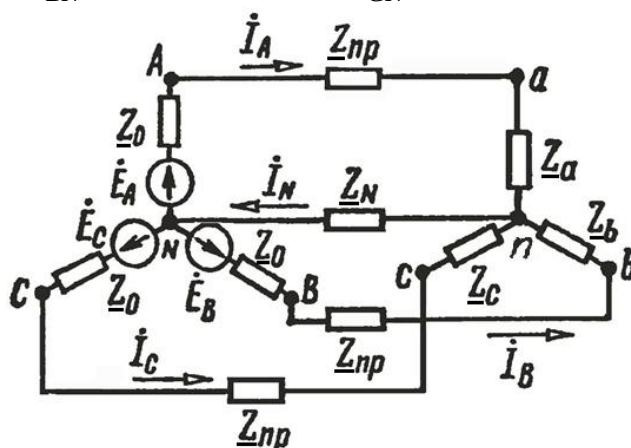


Рисунок 6.11

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

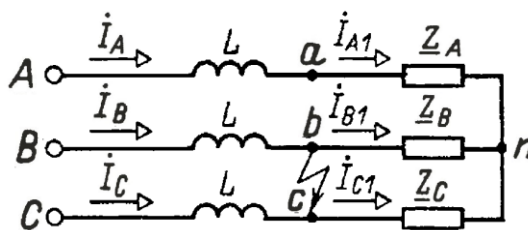


Рисунок 6.12

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.

Практическое занятие 7

Тема: Расчет параметров трансформаторов

Цель: Научиться рассчитывать параметры схемы замещения трансформатора и параметры его режима работы.

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости знать параметры трансформатора являющегося важным элементом систем электроснабжения.

Теоретическая часть

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Режимы работы трансформатора и КПД.

Схема замещения реального двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь представлена на рисунке 7.1.

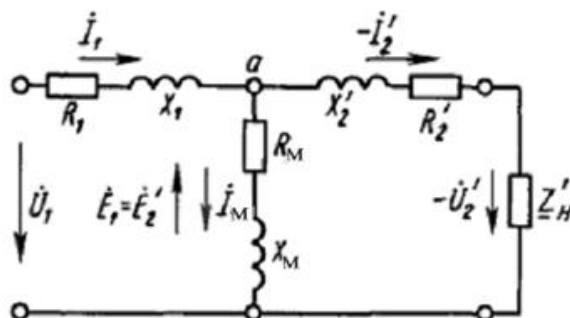


Рисунок 7.1 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

На рисунке 7.1 приняты следующие обозначения: R_1 , X_1 – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки; R_2' , X_2' – активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной; R_M , X_M – активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания; U_1 – первичное напряжение; U_2' – вторичное напряжение, приведенное к первичному; I_1 , I_2' , I_M – токи в соответствующих ветвях.

В связи с тем, что у первичной и вторичной обмоток трансформатора неодинаковое количество витков (т.е. $k \neq 1$), первичные и вторичные напряжения, токи и сопротивления имеют различный порядок. Следовательно, для развязки магнитной связи и возможности совместного решения уравнений, описывающих работу трансформатора, параметры вторичной обмотки должны быть приведены к первичной обмотке. Для этого

вторичное напряжение и ЭДС следует умножить на коэффициент трансформации, вторичный ток разделить на коэффициент трансформации, а вторичное сопротивление умножить на квадрат коэффициента трансформации:

$$E'_2 = k \cdot E_2 = E_1, U'_2 = k \cdot U_2, I'_2 = I_2 / k, R'_2 = k^2 \cdot R_2, X'_2 = k^2 \cdot X_2. \quad (7.1)$$

Представленная схема замещения трансформатора описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 + Z_M \cdot \dot{I}_M; \\ -\dot{U}'_2 = R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2 + Z_M \cdot \dot{I}_M; \\ \dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (7.2)$$

Учитывая, что $Z_M \dot{I}_M = -\dot{E}_1$, система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 - \dot{E}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}_1 - R'_2 \cdot \dot{I}'_2 - j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (7.3)$$

Параметры схемы замещения трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте *холостого хода* к первичной обмотке с помощью регулятора напряжения (РН) подводят номинальное напряжение $U_0 = U_{\text{ном}}$, а ко вторичной – вольтметр (рисунок 7.2).

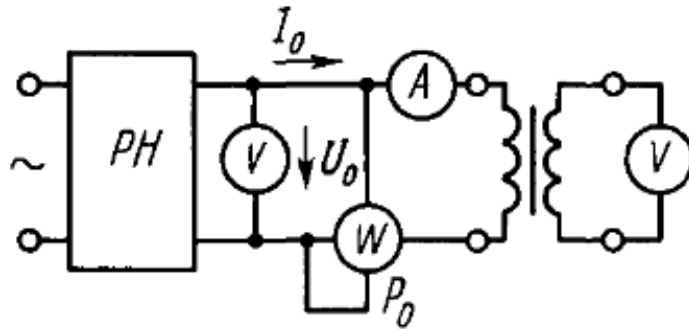


Рисунок 7.2 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

Измерив ток холостого хода I_0 и мощность P_0 можно рассчитать сопротивления:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}, R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (7.4)$$

а также коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (7.5)$$

и коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}. \quad (7.6)$$

Схема замещение трансформатора (рисунок 7.1) в режиме холостого хода приводится к виду, представленному на рисунке 7.3.

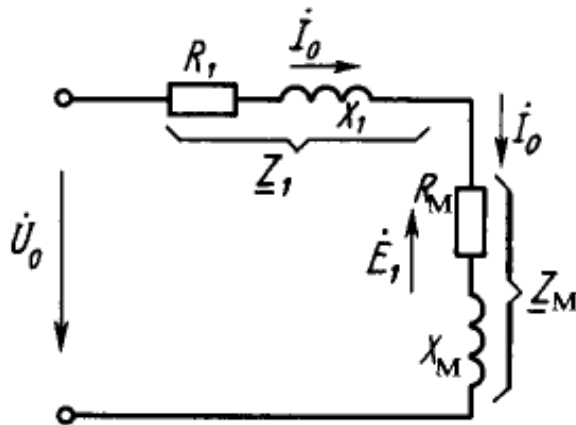


Рисунок 7.3 – Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

При холостом ходе справедливы следующие соотношения:

$$Z_0 = Z_1 + Z_M; R_0 = R_1 + R_M; X_0 = X_1 + X_M. \quad (7.7)$$

Учитывая, что в силовых трансформаторах R_1 и X_1 во много раз меньше R_M и X_M , можно сказать, что

$$Z_0 \approx Z_M; R_0 \approx R_M; X_0 \approx X_M. \quad (7.8)$$

По этой же причине мощность холостого хода трансформатора равна магнитным потерям в магнитопроводе. Эти потери также называют потерями в стали трансформатора.

В опыте *короткого замыкания* вторичные обмотки замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам во избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы по обмоткам проходил номинальный ток (рисунок 7.4).

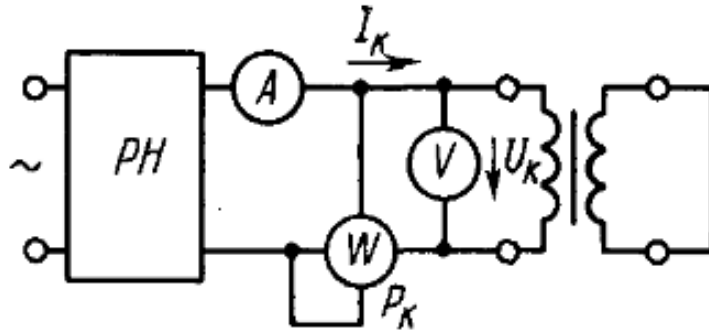


Рисунок 7.4 – Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Полное Z_K , активное R_K и реактивное X_K сопротивления короткого замыкания рассчитываются по формулам, аналогичным для случая холостого хода.

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}, R_K = \frac{P_K}{I_K^2}, X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (7.9)$$

Согласно схеме замещения (рисунок 7.1):

$$Z_K = Z_1 + \frac{Z_M \cdot Z'_2}{Z_M + Z'_2}. \quad (7.10)$$

Так как Z_M во много раз больше Z'_2 , то в знаменателе Z'_2 можно пренебречь, тогда

$$Z_K = Z_1 + Z'_2; R_K = R_1 + R'_2; X_K = X_1 + X'_2. \quad (7.11)$$

Обычно принимают

$$Z_1 = Z'_2 = 0,5 \cdot Z_K; R_1 = R'_2 = 0,5 \cdot R_K; X_1 = X'_2 = 0,5 \cdot X_K. \quad (7.12)$$

Учитывая (7.11) схему замещения трансформатора (рисунок 7.1) в режиме короткого замыкания можно привести к виду, представленному на рисунке 7.5.

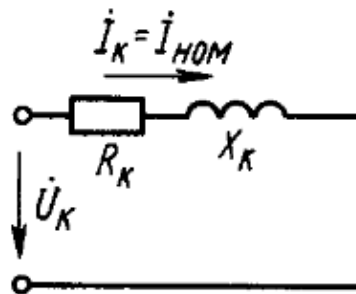


Рисунок 7.5 – Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Таким образом, в режиме короткого замыкания мощность расходуется на электрические потери в обмотках трансформатора. Эти потери также называют потерями в меди трансформатора.

Полные потери мощности в трансформаторе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P = P_0 + P_K. \quad (7.13)$$

При режиме, отличном от номинального, следует учитывать коэффициент загрузки трансформатора, влияющий на электрические потери:

$$k_3 = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}, \quad (7.14)$$

где $I_{2\text{ном}}$ – номинальный ток вторичной обмотки.

Под *номинальным* следует понимать такой режим работы трансформатора, при котором основные параметры (мощность, напряжение, ток) соответствуют величинам, на которые он рассчитан по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. В номинальном режиме трансформатор имеет наибольший коэффициент полезного действия и не перегревается. Трансформаторы могут работать и при ненормальных условиях. Обычно, при нагрузке меньше номинальной, КПД и коэффициент мощности меньше номинальных. При нагрузках больше номинальных появляется опасность перегрева обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя их изоляции.

Номинальный ток первичной обмотки может быть определен по формуле:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} \quad (7.15)$$

где $S_{1\text{ном}}$, $U_{1\text{ном}}$ – номинальные мощность и напряжение первичной обмотки трансформатора.

Потери мощности трансформатора при любом режиме будут определяться по формуле:

$$\Delta P = P_0 + k_3^2 \cdot P_K. \quad (7.16)$$

Мощность, передаваемая потребителям P_2 , равна мощности, потребляемой трансформатором из сети P_1 за вычетом потерь ΔP :

$$P_2 = P_1 - \Delta P = P_1 - P_0 - k_3^2 \cdot P_K. \quad (5.17)$$

Тогда коэффициент полезного действия трансформатора равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + k_3^2 \cdot P_K} 100\%. \quad (5.18)$$

Трансформаторы относят к статическим не имеющим вращающихся деталей электрическим машинам переменного тока. Основными параметрами силовых трансформаторов используемых при разработке систем электроснабжения являются: полная номинальная мощность $S_{1\text{ном}}$, номинальное напряжение первичной $U_{1\text{ном}}$ и вторичной $U_{2\text{ном}}$ обмотки.

Примеры решения задач

Пример.

Для трехфазного трансформатора мощностью $S_{1\text{ном}} = 100$ кВА, соединение обмоток которого $Y-Y-0$, известно: $U_{1\text{ном}} = 6000$ В, $U_{20} = 400$ В, $u_K = 5,5\%$, $P_K = 2400$ Вт, $P_0 = 600$ Вт, $I_0 = 0,07 I_{1\text{ном}}$ Вт. Определить:

- 1) Сопротивление обмоток трансформатора R_1, X_1, R_2, X_2 ;
- 2) Эквивалентное сопротивление Z_0 и его составляющие R_0, X_0 ;
- 3) Коэффициент полезного действия при загрузке в 60% и $\cos\varphi_H = 0,87$.

Решение.

Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,6 \text{ А.}$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = 0,7 \cdot I_{1\text{ном}} = 0,7 \cdot 9,6 = 0,67 \text{ А.}$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$z_K = U_{K\Phi} / I_{K\Phi} = u_K \cdot U_{1\text{ном}\Phi} / I_{1\text{ном}} = 0,055 \cdot 6000 / \sqrt{3} \cdot 9,6 = 19,6 \text{ Ом.}$$

В знаменателе появляется множитель $\sqrt{3}$, т.к. в справочных данных указывается линейное значение $U_{1\text{НОМ}}$, а т.к. схема соединения Y-Y-0, то $U_{1\text{НОМ}\Phi} = U_{1\text{НОМ}} / \sqrt{3}$.

$r_K = P_K / 3I_K^2 = 2400 / 3 \cdot 9,6^2 = 8,7$ Ом. (В знаменателе появляется множитель 3, т.к. в справочных данных значение P_K указывается суммарное для трех фаз, а сопротивления вычисляются для одной фазы.)

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{19,6^2 - 8,7^2} = 17,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$r_1 = r'_2 = 0,5 \cdot r_K = 0,5 \cdot 8,7 = 4,35 \text{ Ом.}$$

$$x_1 = x'_2 = 0,5 \cdot x_K = 0,5 \cdot 17,9 = 8,95 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки определим, учитывая коэффициент приведения:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15.$$

$$r_2 = r'_2 / k^2 = 4,35 / 225 = 0,0193 \text{ Ом.}$$

$$x_2 = x'_2 / k^2 = 8,95 / 225 = 0,0398 \text{ Ом.}$$

Сопротивления намагничивающей ветви:

$$z_0 = U_0 / I_0 = 6000 / \sqrt{3} \cdot 0,67 = 5180 \text{ Ом.}$$

$$r_0 = P_0 / I_0^2 = 600 / 3 \cdot 0,67^2 = 447 \text{ Ом.}$$

$$x_0 = \sqrt{5180^2 - 447^2} = 5160 \text{ Ом.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{k_3 \cdot S_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_H}{k_3 \cdot S_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_H + P_0 + k_3^2 \cdot P_K} 100\% = \\ &= \frac{0,6 \cdot 100000 \cdot 0,87}{0,6 \cdot 100000 \cdot 0,87 + 600 + 0,6^2 \cdot 2400} 100\% = 97,3\%. \end{aligned}$$

Задания

1. Для трехфазного трансформатора, паспортные данные которого приведены в таблице 7.1, определить КПД при загрузке в 50% и $\cos\varphi=0,9$, а также сопротивления Т-образной схемы замещения. Обмотки соединены по схеме Y-Δ.

Таблица 7.1 – Паспортные данные трансформатора

$S_{\text{ном}}$, кВА	$U_{1\text{ном}}$, кВ	$U_{2\text{ном}}$, В	I_0 , %	u_k , %	P_0 , Вт	P_k , Вт
60	35	400	11,1	4,55	502	1200

2. Трехфазный трансформатор имеет паспортные данные, представленные в таблице 7.2, соединение обмоток Y-Y-0. Требуется определить коэффициент мощности холостого хода, сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора, сопротивления Z_0 , R_0 , X_0 . При какой загрузке работает трансформатор, если известно, что при $\cos\varphi=0,75$ КПД составил 85%?

Таблица 7.2 – Паспортные данные трансформатора

$S_{\text{ном}}$, кВА	$U_{1\text{ном}}$, кВ	$U_{2\text{ном}}$, В	I_0 , %	u_k , %	P_0 , Вт	P_k , Вт
30	10	400	9,0	5,0	850	300

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой трансформатор?
2. Какие режимы работы трансформатора вы знаете?
3. В чем заключается суть опытов холостого хода и короткого замыкания?
4. Какие потери определяют в опытах холостого хода и короткого замыкания?
5. Как рассчитать сопротивление первичной и вторичной обмотки по опытам короткого замыкания?
6. Как рассчитать сопротивление ветви намагничивания по опытам холостого хода?
7. Что такое коэффициент трансформации? коэффициент загрузки трансформатора?
8. Для чего параметры вторичной обмотки приводят к первичной обмотке?
9. Как рассчитать КПД трансформатора?

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. Вольдек А.И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. – 349 с.

Практическое занятие 8

Тема: Расчет параметров вращающихся электрических машин

Цель: Получить навыки расчета параметров асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока.

Актуальность темы практического занятия заключается в необходимости знать параметры вращающихся электрических машин, используемых в промышленности и при строительстве.

Теоретическая часть

Асинхронные машины – наиболее распространенные электрические машины. В основном их используют в качестве электрических двигателей. Благодаря простоте устройства и высокой надежности их широко применяют для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов, и т.д.

Асинхронная машина (рисунок 8.1) состоит из подвижной части – ротора (3), и неподвижной – статора (1). Токи обмотки статора двухполюсной машины создают двухполюсный магнитный поток, проходящий через статор (1), ротор (3) и зазор между ними.

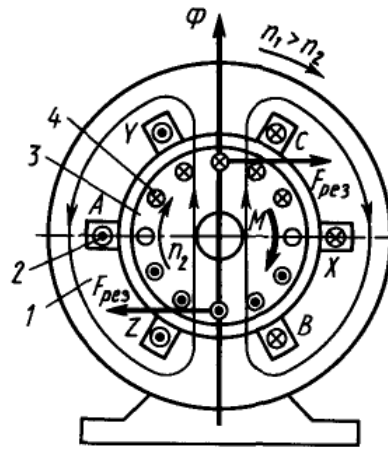


Рисунок 8.1 – Электромагнитная схема асинхронной машины

Обмотка статора (2) создает магнитное поле, вращающееся с частотой (синхронной)

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ об/сек;} \quad (8.1)$$

где f_1 – частота тока статора, p – число пар полюсов.

Магнитное поле вращается в направлении чередования фаз A, B, C обмотки статора.

Магнитный поток Φ_1 , создаваемый обмоткой статора (рисунок 8.1), при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора (4), индуцирует в них ЭДС, и если обмотка ротора замкнута, то в ней возникают токи i_2 , частота которых f_2 при неподвижном роторе ($n = 0$) равна первичной частоте f_1 .

Если обмотка ротора является трехфазной, то в ней индуцируется трехфазный ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора Φ_2 , число полюсов $2p$, направление и скорость вращения которого при $n = 0$

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1 \quad (8.2)$$

такие же, как и у потока статора. Поэтому потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя Φ .

В результате взаимодействия токов ротора с потоком возникают действующие на проводники ротора механические силы F и вращающий электромагнитный момент M .

Если развиваемый момент больше статического тормозного момента на валу, то ротор двигателя придет во вращение в направлении вращения поля с некоторой скоростью $n_2 < n_1$, т. е. будет вращаться с некоторым отставанием или скольжением, относительно поля статора. Такой режим называют *двигательным*.

Относительная разность скоростей вращения поля статора и ротора называется скольжением.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}. \quad (8.3)$$

Скорость ротора, выраженная через скольжение s , равна

$$n = (1 - s) \cdot n_1 \quad (8.4)$$

При пуске двигателя ($n = 0$) согласно (6.3) $s = 1$, а при вращении ротора синхронно с полем статора или, как говорят, с синхронной скоростью ($n = n_1$) $s = 0$. При $n = n_1$ магнитное поле статора относительно ротора неподвижно и токи в роторе индуцироваться не будут, поэтому $M = 0$ и такой скорости вращения двигатель достичь не может. Вследствие этого в режиме двигателя всегда $0 < n < n_1$ и $0 < s < 1$.

При вращении ротора в сторону поля частота пересечения полем проводников ротора пропорциональна разности скоростей $(n_1 - n)$ и частота тока в обмотке ротора

$$f_2 = p \cdot (n_1 - n) = s \cdot p \cdot n_1 = s \cdot f_1. \quad (8.5)$$

Момент на валу двигателя M зависит от мощности и на валу P и частоты вращения n :

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n} \quad (8.6)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость развиваемого момента на валу от скорости вращения или от скольжения при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ (рисунок 8.2). На рисунке 8.2

обозначено критическое скольжение $s_{кр}$, критический (максимальный) момент $M_{кр}$ и пусковой момент $M_{п}$.

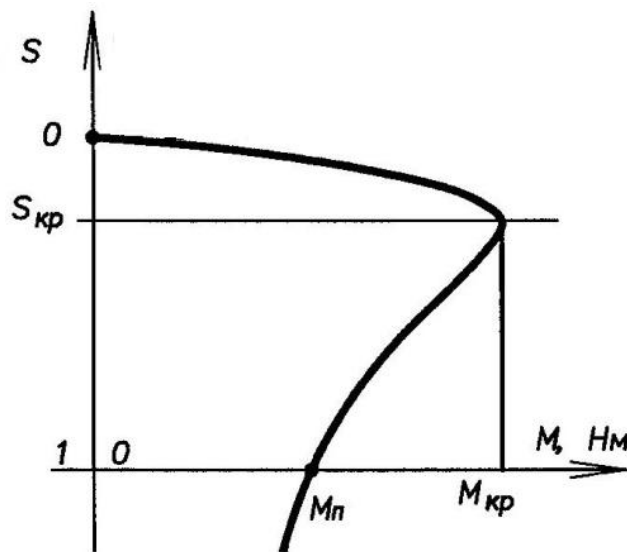


Рисунок 8.2 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Зная максимальный (критический) момент $M_{кр}$, можно построить приблизительную механическую характеристику по формуле:

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}}}, \quad (8.7)$$

где

$$s_{кр} = s_{ном} \cdot \left(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1} \right). \quad (8.8)$$

где $k_m = M_{кр} / M_{ном}$ – кратность максимального момента, т.е. отношение максимального момента при номинальном напряжении к номинальному.

Машина постоянного тока (рисунок 8.3) состоит из неподвижной части – индуктора, и подвижной части. Индуктор состоит из полюсов и стального ярма, к которому прикрепляются полюсы 1 с обмоткой возбуждения, создающие основной магнитный поток. Вращающаяся часть машины состоит из укрепленных на валу цилиндрического якоря 2 и коллектора 3. В пазы на внешней поверхности якоря укладываются катушки обмотки якоря. Концы витка соединены с изолированными от вала медными

пластинами коллектора, которые вместе составляют кольцо. Для отвода/подвода тока к вращающемуся коллектору на него нажимают две неподвижные щетки 4, с помощью которых обмотка якоря соединяется с внешней цепью.

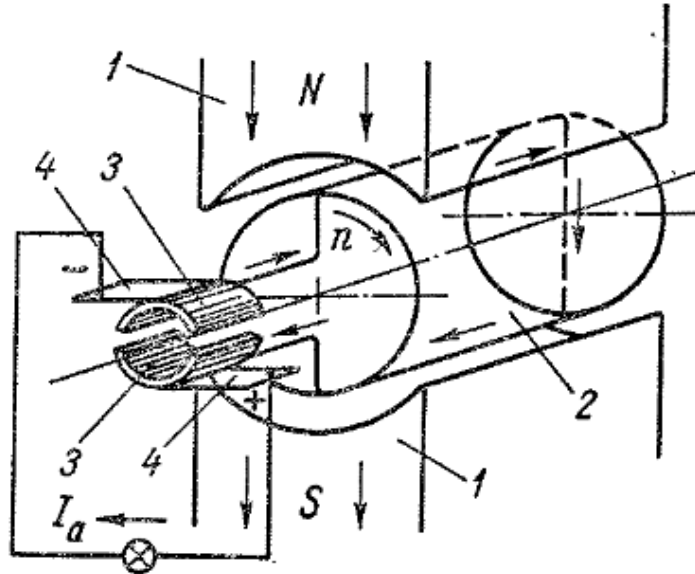


Рисунок 8.3 – Устройство простейшей машины постоянного тока

В генераторе постоянного тока коллектор является механическим выпрямителем, который преобразовывает переменный ток обмотки якоря в постоянный ток во внешней цепи. Напряжение постоянного тока на зажимах якоря генератора будет меньше ЭДС якоря E_a на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря r_a :

$$U_a = E_a - I_a \cdot r_a. \quad (8.9)$$

В генераторе при установившемся режиме работы электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{В}} - M_{\text{ТР}} - M_{\text{С}}, \quad (8.10)$$

где $M_{\text{В}}$ – момент на валу генератора, развиваемый первичным двигателем;

$M_{\text{ТР}}$ – момент сил трения;

$M_{\text{С}}$ – тормозной момент, вызываемый потерями на гистерезис и вихревые токи в сердечнике якоря.

Развиваемая электромагнитным моментом мощность называют электромагнитной мощностью $P_{\text{ЭМ}}$:

$$P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ}} \cdot \Omega, \quad (8.11)$$

где $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ – представляет собой угловую скорость вращения.

По способу возбуждения ГПТ делятся на: генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением (рисунок 8.4).

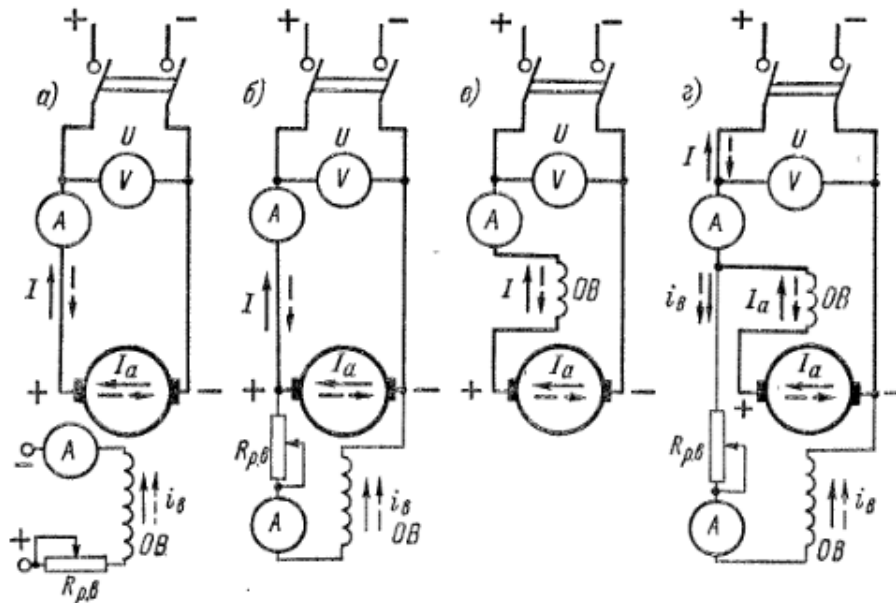


Рисунок 8.4 – Способы возбуждения ГПТ: а – независимое, б – параллельное, в – последовательное, г – смешанное

Генераторы независимого возбуждения делятся на генераторы с электромагнитным возбуждением, в которых обмотка возбуждения питается постоянным током от постороннего источника (аккумуляторная батарея, вспомогательный генератор выпрямитель переменного тока и др.), и на магнитоэлектрические генераторы с полюсами в виде постоянных магнитов.

В генераторах с самовозбуждением обмотки возбуждения питаются электрической энергией, вырабатываемой в самом генераторе. Генераторы с самовозбуждением в зависимости от способа включения обмоток возбуждения делятся на 1) генераторы параллельного возбуждения, или шунтовые, 2) генераторы последовательного возбуждения, или серийные 3) генераторы смешанного возбуждения, или компаундные.

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток в обмотке якоря. Напряжение, приложенное к якорю машины в режиме двигателя равно:

$$U_a = E_a + I_a \cdot r_a. \quad (8.12)$$

В двигателе при установившемся режиме работы электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{В}} + M_{\text{ТР}} + M_{\text{С}}, \quad (8.13)$$

где $M_{\text{В}}$ – тормозной момент на валу двигателя, развиваемый рабочей машиной.

ЭДС якоря можно определить как

$$E_a = c_e \cdot \Phi_{\delta} \cdot n, \quad (8.14)$$

где c_e – конструктивный коэффициент, постоянный для конкретного типа машины;

Φ_{δ} – основной намагничивающий поток.

Электромагнитный момент также может быть найден через намагничивающий поток:

$$M_{\text{ЭМ}} = c_m \Phi_{\delta} I_a, \quad (8.15)$$

где $c_m = c_e / 2\pi$.

Способы пуска двигателей постоянного тока:

- 1) прямой, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети;
- 2) реостатный, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока;
- 3) путем плавного повышения питающего напряжения, которое подается на обмотку якоря.

Ток в двигателе равен

$$I_a = \frac{U - E_a}{r_a}. \quad (8.16)$$

При пуске двигателя $n = 0$ и $E_a = 0$, тогда $I_a = U / r_a$. В нормальных машинах r_a очень мало и в связи с этим ток якоря при пуске может в десятки

раз превышать номинальное значение. В связи с этим прямой пуск применяют только для двигателей малой мощности, в которых $I_{\Pi} = (4 \div 6) \cdot I_{\text{ном}}$.

Для снижения пускового тока в двигателях большой и средней мощности применяют реостатный пуск, включая в цепь якоря реостат. В этом случае ток якоря равен:

$$I_a = \frac{U - E_a}{r_a + r_p}, \quad (8.17)$$

где r_p – сопротивление пускового реостата.

При пуске двигателя сопротивление реостата максимально, его подбирают таким образом, чтобы $I_{\Pi} = (1,4 \div 1,8) \cdot I_{\text{ном}}$ для машин большой и средней мощности и $I_{\Pi} = (2 \div 2,5) I_{\text{ном}}$ для машин малой мощности. При разгоне двигателя сопротивление пускового реостата постепенно уменьшают, в конце концов, полностью исключая его из цепи якоря.

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока. Их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах). Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода. В зависимости от этого различают турбогенераторы (приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами), гидрогенераторы (приводятся во вращение гидротурбинами) и дизель-генераторы (приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания).

Ротор синхронной машины вращается с той же скоростью и в том же направлении как и вращающееся магнитное поле. Статор 1 (рисунок 8.5) имеет такое же устройство, как и статор асинхронной машины.

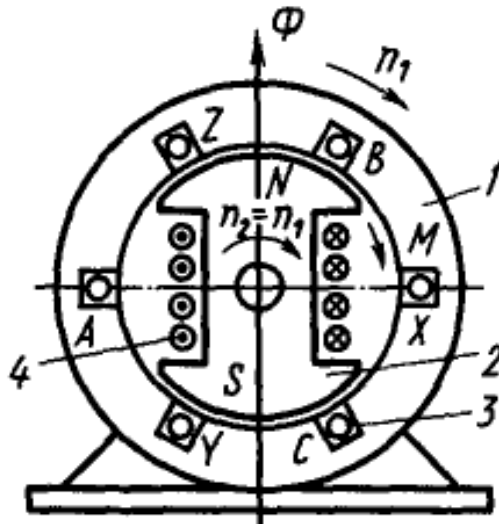


Рисунок 8.5 – Схема синхронной машины

Трехфазная или в общем случае n -фазная обмотка статора синхронной машины 3 выполняется с таким же числом полюсов, как и ротор, и называется также обмоткой якоря. Сердечник статора вместе с обмоткой называется также якорем. Ротор 2 имеет обмотку возбуждения 4, питаемую через два контактных кольца и щетки постоянным током от постороннего источника. В качестве источника чаще всего служит генератор постоянного тока относительно небольшой мощности, который называется возбудителем и устанавливается обычно на одном валу с синхронной машиной. Назначение обмотки возбуждения – создание в машине первичного магнитного поля.

Если ротор привести во вращение с некоторой скоростью n_2 и возбудить его, то поток возбуждения Φ будет пересекать проводники обмотки статора и в фазах последней будут индуцироваться ЭДС с частотой

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60}. \quad (8.18)$$

При нагрузке обмотка статора создает такое же по своему характеру вращающееся магнитное поле, как и обмотка статора асинхронной машины. Это поле статора вращается в направлении вращения ротора со скоростью

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (8.19)$$

Из (8.18) и (8.19) следует

$$n_1 = n_2. \quad (8.20)$$

Поля статора и ротора вращаются с одинаковой скоростью, т.е. *синхронно*, и образуют, таким образом, общее вращающееся поле.

Включение синхронных генераторов на параллельную работу с сетью.

На каждой электрической станции обычно бывает установлено несколько генераторов, которые включаются на параллельную работу в общую сеть. Все параллельно работающие генераторы должны отдавать в сеть ток одинаковой частоты. Поэтому они должны вращаться строго в такт, т.е. синхронно.

Условия синхронизации генераторов:

- 1) напряжение включаемого генератора U должно быть равно напряжению сети U или уже работающего генератора;
- 2) частота генератора f , должна равняться частоте сети;
- 3) чередование фаз генератора и сети должно быть одинаково;
- 4) напряжения U_G , и U_C должны быть в фазе.

Синхронные двигатели и синхронные компенсаторы.

Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными большое преимущество, заключающееся в том, что благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с $\cos\varphi = 1$ и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе с перевозбуждением даже отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален U , а у асинхронного двигателя U^2 . Поэтому при понижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность. Кроме того, использование возможности увеличения тока возбуждения синхронных двигателей позволяет увеличивать надежность их работы при аварийных

понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях условия работы энергосистемы в целом. Вследствие большого воздушного зазора добавочные потери в стали в клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем АД, благодаря чему КПД синхронных двигателей обычно выше.

С другой стороны, конструкция синхронных двигателей сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск и регулирование скорости вращения синхронных двигателей также сложнее. Тем не менее, их целесообразно применять всюду, где не требуется частых пусков и остановок и регулирования скорости вращения.

Для синхронного двигателя справедливы многие электромеханические соотношения, применяемые при расчете асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока: (8.6), (8.11), (8.13).

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу; при этом по обмотке якоря проходит практически только реактивный ток.

Синхронные компенсаторы предназначены для компенсации коэффициента мощности сети и поддержания нормального уровня напряжения сети в районах сосредоточения потребительских нагрузок. Нормальным является перевозбужденный режим работы синхронного компенсатора, когда он отдает в сеть реактивную мощность. В периоды спада потребительских нагрузок (например, ночью) напряжение сети стремится возрасти и для поддержания его на нормальном уровне необходимо загрузить сеть индуктивными токами, вызывающими в ней дополнительные падения напряжения. В этих случаях синхронные компенсаторы работают в недовозбужденном режиме, когда они потребляют

из сети индуктивный ток и реактивную мощность. Для этого каждый синхронный компенсатор снабжается автоматическим регулятором возбуждения или напряжения, который регулирует его ток возбуждения так, что напряжение на зажимах компенсатора остается постоянным.

Пример 1.

Номинальная мощность трехфазного четырехполюсного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{\text{ном}} = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 380$ В, номинальная частота вращения ротора $n_{\text{ном}} = 1420$ об/мин, номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} = 0.84$ и номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0.85$. Кратность пускового тока $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 6.5$, а перегрузочная способность двигателя равна $k_m = 1.8$. Определить:

- 1) потребляемую мощность;
- 2) номинальный и максимальный вращающие моменты;
- 3) пусковой ток;
- 4) номинальное и критическое скольжение.

Решение.

Потребляемая мощность:

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 10 / 0.84 = 11.9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9550 \cdot \frac{10}{1420} = 67.3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$M_{\text{max}} = k_m \cdot M_{\text{ном}} = 1.8 \cdot 67.3 = 121 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} = \frac{11.9 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.84} = 21.2 \text{ А.}$$

$$I_{\text{пуск}} = 6.5 \cdot I_{\text{ном}} = 6.5 \cdot 21.2 = 138 \text{ А.}$$

Номинальное и критическое скольжение:

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053,$$

где $n_1 = f_1 / p = 50 / 2 = 25$ об/сек = 1500 об/мин.

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} \left(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1} \right) = 0,053 \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Пример 2.

Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальные параметры: $P_{\text{НОМ}} = 5,2$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 230$ В, $n_{\text{НОМ}} = 2860$ об/мин. Сопротивление обмотки якоря $R_a = 0,75$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_b = 154$ Ом, механические и магнитные потери составляют 4% от номинальной мощности генератора. Определить момент на валу первичного двигателя.

Решение:

Номинальный ток нагрузки:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{5,2 \cdot 1000}{230} = 22,6 \text{ А.}$$

Ток возбуждения:

$$I_b = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_b} = \frac{230}{154} = 1,5 \text{ А.}$$

Ток якоря при номинальной нагрузке:

$$I_a = I_{\text{НОМ}} + I_b = 22,6 + 1,5 = 24,1 \text{ А.}$$

ЭДС генератора:

$$E_a = U_a + I_a \cdot R_a = E_a = U_{\text{НОМ}} + I_a \cdot R_a = 230 + 0,75 \cdot 24,1 = 248 \text{ В.}$$

Потери в МПТ состоят из механических и магнитных потерь, а также потерь в цепях якоря и возбуждения.

Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения:

$$\Delta P_a = I_a^2 \cdot R_a = 0,75 \cdot 24,1^2 = 435 \text{ Вт.}$$

$$\Delta P_b = I_b^2 \cdot R_b = 154 \cdot 1,5^2 = 346 \text{ Вт.}$$

Сумма механических потерь по условию

$$\Delta P_M = 0,04 \cdot P_{\text{НОМ}} = 0,04 \cdot 5200 = 208 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери:

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_M = 435 + 346 + 208 = 989 \text{ Вт.}$$

Мощность на валу первичного двигателя:

$$P_1 = \Delta P + P_{\text{НОМ}} = 989 + 5200 = 6189 \text{ Вт.}$$

Момент на валу первичного двигателя:

$$M_1 = 9,55 \cdot P_1 / n_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot 6189 / 2860 = 20,7 \text{ Н·м.}$$

Пример 3.

Определить номинальный момент, линейный ток статора, активную и реактивную мощность, потребляемую из сети синхронным двигателем.

Номинальные параметры двигателя: $P_{\text{НОМ}} = 990 \text{ кВт}$, $U_{\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ (опереж.) $n_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ об/мин}$, $\eta_{\text{НОМ}} = 85 \%$.

Решение:

Номинальная угловая скорость ротора:

$$\Omega_{\text{НОМ}} = 2\pi \cdot n_{\text{НОМ}} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1000}{60} = 105 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{990 \cdot 10^3}{105} = 9,43 \cdot 10^3 \text{ Н·м.}$$

Обмотка статора обычно соединяется звездой, в этом случае линейный ток статора равен:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{990 \cdot 1000}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,8} = 140,1 \text{ А.}$$

Активная и реактивная мощности, потребляемые из сети:

$$P = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{990}{0,85} = 1164,7 \text{ кВт,}$$

$$Q = P \cdot \tan(\varphi_{\text{НОМ}}) = 1164,7 \cdot 0,75 = 873,5 \text{ кВАр.}$$

Задания

1. Трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие параметры: $P_{\text{ном}} = 75 \text{ кВт}$, номинальная частота вращения ротора $n_{\text{ном}} = 735 \text{ об/мин}$, номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} = 0,92$ и номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$. Определить полную мощность двигателя в номинальном режиме, а также максимальный момент, если критическое скольжение равно 0,07.

2. Четырехполосный трехфазный асинхронный двигатель включен в трехфазную сеть частотой 60 Гц и вращается с частотой 1746 об/мин. Каково скольжения двигателя в этом режиме?

3. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, присоединенный к сети напряжением 220 В, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_{\text{ном}} = 20,5 \text{ А}$. Сопротивление обмотки якоря $R_a = 0,75 \text{ Ом}$, сопротивление цепи возбуждения $R_b = 258 \text{ Ом}$, механические и магнитные потери составляют 329,3 Вт. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1025 \text{ об/мин}$. Определить номинальную мощность на валу двигателя, номинальный КПД, номинальный вращающий момент, пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление пускового реостата для условия $I_{\text{пуск}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$.

4. Определить номинальный момент, номинальный КПД, активную и реактивную мощность, потребляемую из сети синхронным двигателем. Номинальные параметры двигателя: $P_{\text{ном}} = 4000 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.) $n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/мин}$, $I_{\text{ном}} = 443 \text{ А}$.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные элементы асинхронной машины.
2. Как определить частоту вращения статора асинхронного двигателя? ротора?
3. Что такое скольжение?

4. Покажите на механической характеристике асинхронного двигателя критический момент и критическое скольжение.
5. Назовите основные элементы машины постоянного тока.
6. Как определить напряжение на якоре машины постоянного тока в режиме двигателя и в режиме генератора?
7. Как зависит электромагнитный момент от тока якоря в двигателе постоянного тока?
8. Как определить ЭДС якоря через частоту вращения?
9. Зачем включают в цепь якоря добавочные сопротивления при пуске?
10. Назовите основные элементы синхронной машины.
11. Что такое синхронный компенсатор, для чего его применяют?
12. В чем заключаются достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?

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. Касаткин А.С. Электротехника: Учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. - 12-е изд. – М.: Академия, 2008. - 544 с. – ISBN 9785769557729.
4. Вольдек А.И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. – 349 с.

Практическое занятие 9

Тема: Анализ результатов измерения электрических величин

Цель: научиться определять показания приборов, измеряющих электрические величины

1. Теоретическая часть

Понятие о метрологических характеристиках измерительных приборов.

Объектами электрических измерений являются все электрические и магнитные величины: ток, напряжение, мощность, магнитный поток и т. д. Измерения осуществляются электроизмерительными приборами (ИП). Они находят применение также для измерения неэлектрических величин (температуры, давления и т. д.]. В этом случае неэлектрические величины преобразуются в пропорциональные им электрические величины.

По типу отсчетного механизма все ИП подразделяют на две группы: аналоговые (АИП) и цифровые (ЦИП). В АИП показания являются непрерывной функцией изменения входной измеряемой величины. Эти приборы используются либо для статических, либо для динамических измерений. Примером последних, например, является осциллограф. Для статических измерений применяются приборы, построенные на основе использования электромеханических измерительных механизмов (ИМ), электронные измерительные приборы (ЭИП), а также цифровые измерительные приборы (ЦИП). Электромеханические ИП основаны на преобразовании электрической энергии входного сигнала в механическую энергию, чаще всего, угловое перемещение подвижного отсчетного устройства. Эти приборы для своей работы забирают некоторую энергию от измеряемой цепи. Включение таких приборов в исследуемую электрическую цепь изменяет режим ее работы и, как результат, обуславливает появление погрешности взаимодействия прибора в измеряемой цепи, т. е. появляется методическая погрешность измерения.

В некоторых электронных приборах электромеханический ИП используют в качестве выходного отсчетного устройства. В этом случае энергия для работы ИП поступает от вспомогательного источника энергии, например, от батареи или от питающей прибор электрической сети. Эти

приборы создают заметно меньшую методическую погрешность. В ЦИП измеряемая или пропорциональная ей величина преобразуется в числовой эквивалент, который выводится на цифровой индикатор (дисплей). Современные ЦИП построены с использованием или микроконтроллера, или микропроцессора, что существенно повышает производительность и точность ЦИП. Эти приборы могут иметь дополнительные функции для обработки результатов измерения, автоматического выбора пределов измерения, распознавания полярности постоянного напряжения и т. д., а некоторые из них могут быть задействованными в автоматизированных измерительных установках и системах.

Основные понятия об электромеханических измерительных приборах (ЭМИП).

ЭМИП относятся к аналоговым ИП. Функционирование ЭМИП основано на использовании измерительных механизмов (ИМ), в которых реализуются различные физические принципы. ИМ обеспечивает преобразование значения измеряемой величины в пропорциональное изменение показания отсчетного устройства, например, стрелки прибора. ИП можно рассматривать как некоторое электромеханическое вычислительное устройство, у которого на отсчетное устройство выводится результат обработки входной величины по формуле, которая является аналитическим описанием физики работы ИМ. В этих ИМ вызывающему поворот стрелки моменту вращения, функционально связанному с измеряемой величиной (чаще всего с током в измерительной катушке), противодействует момент сопротивления закручивающейся пружины. Необходимо иметь в виду, что имеются ИИ типа логометров. В логометрах эта пружина отсутствует, а стрелка поворачивается под воздействием двух токов, каждый из которых протекает по своей рамке, причем одна рамка создает момент вращения в направлении отсчета измеряемой величины, а другая рамка создает противодействующий момент. Стрелка устанавливается в том месте шкалы

прибора, где эти два момента становятся равными. У логометров с противодействующей пружиной имеется корректор, позволяющий устанавливать стрелку на обесточенном приборе в нулевое положение.

В зависимости от используемого в приборе ИМ различают следующие ЭМИП:

- а) магнитоэлектрические;
- б) выпрямительные;
- в) термоэлектрические;
- г) электромагнитные;
- д) электродинамические;
- е) электростатические;
- ж) индукционные.

Конструкции ЭМИП различных систем изложены в учебной литературе. В зависимости от принципа исполнения ИМ, схемы его использования в ИП реализуются приборы для измерения тока, напряжения, мощности, электрической энергии и т. д.

Для правильного применения ИП важны его технические особенности. Эти особенности указываются на шкале условными обозначениями.

Цифровые средства измерений.

В практике электрических измерений все шире используются цифровые методы и средства преобразования, хранения, обработки, передачи и представления информации. Цифровые приборы вытесняют аналоговые средства при измерении самых различных физических величин. Среди цифровых средств измерений можно выделить две большие группы: измерительные приборы и измерительные преобразователи. К первой группе обычно относят автономные ИП, предназначенные в основном для статических однократных измерений, обычно выполняемых вручную оператором (пользователем). Ко второй группе относят цифровые преобразователи, используемые в составе информационно-измерительных

систем, измерительно-вычислительных систем и т. д. Преобразователи обладают высоким быстродействием.

Особенности работы электроизмерительных приборов в цепях постоянного, синусоидального и несинусоидального напряжений (токов)

1. Общие сведения по измерению параметров электрических сигналов

На практике электрические измерения производятся в широком диапазоне значений измеряемых величин и рабочих частот. В электрических цепях форма измеряемых электрических величин может существенно отличаться от классических форм функций времени: а) от формы неизменного во времени (постоянного) тока (напряжения); б) от формы синусоидального тока (напряжения). С несинусоидальными электрическими сигналами часто имеют дело при производстве измерений в преобразовательной и электродной технике, при переходных процессах, в электрических цепях переменного тока, в которых имеется хотя бы один элемент с нелинейной вольтамперной характеристикой. Поэтому имеет принципиальное значение выбор необходимой измерительной аппаратуры, четкое представление их принципа работы и с какими параметрами измеряемых величин следует интерпретировать их показания. Отметим, что при измерениях в цепях с несинусоидальными электрическими величинами измерение одной и той же величины приборами разных систем может дать несовпадающие результаты. При непонимании принципов работы приборов полученные результаты могут привести к неверным выводам. Поэтому в некоторых случаях, когда указываются режимы работы электрической цепи, то указываются типы приборов, с помощью которых эти измерения выполнены.

2. Особенности измерения в цепях постоянного тока

Напряжение постоянного тока от долей милливольт до сотен вольт можно измерять аналоговыми стрелочными вольтметрами с магнитоэлектрическим измерительным механизмом $ИМ_{(МЭ)}$. Они имеют

достаточно высокую точность (класс точности до 0,05). Следует отметить, что входное сопротивление магнитоэлектрического вольтметра, которое определяется значением добавочного сопротивления, включаемого последовательно с измерительной рамкой прибора, не превышает десятков килоом. Это ограничивает их применение при измерениях в высокоомных цепях, например, в электронных, так как приводит к появлению методической погрешности.

Для измерения напряжения постоянного тока в высокоомных цепях целесообразно использовать электронные аналоговые приборы, в которых в качестве отсчетного устройства используется ИМ_(мэ), однако широкое распространение получило использование, например, цифровых мультиметров, переведенных в режим измерений постоянного напряжения (режим *DCV*).

Для измерения больших постоянных токов может также использоваться ИМ_(мэ), однако его подключают параллельно либо встроенному в прибор малоомному токовому шунту, либо внешнему шунту. В последнем случае шунт имеет метрологические характеристики (класс точности), а падение напряжения на нем при протекании номинального тока составляет 75 мВ. При применении ЦМ используется режим их работы по постоянному току (*A₋*), а в цепь включается так же, как и амперметры, т. е. последовательно с нагрузкой. При этом ток не должен превышать указанного на пульте управления ЦМ.

В практике измерений больших постоянных токов находят применение мультиметры с клещами, однако конструкции этих клещей отличаются от рассмотренных выше тем, что в них встроены датчики Холла, параметры которых зависят от интенсивности постоянного магнитного поля, создаваемого проводником с постоянным током. Описание этих клещей в лабораторной работе не рассматривается. Эти же клещевые мультиметры способны выполнять измерение и переменных токов.

3. Особенности измерения в цепях синусоидального и несинусоидального (тока) напряжения

Измерение синусоидальных напряжений (токов) может выполняться аналоговыми приборами, в которых используются измерительные механизмы следующих систем: ИМ_(МЭ) с выпрямителем, например, типа тестер; ИМ_(ТЭ); ИМ_(ЭМ); аналоговыми электронными вольтметрами со стрелочным указателем на основе ИМ_(МЭ). В настоящее время широко используются ЦМ, в которых предусмотрен режим измерения переменного напряжения (ACV).

В большинстве случаев, если нет специальных указаний, вывод информации о величине тока (напряжения) в приборах осуществляется в действующих значениях синусоидально изменяющихся величин.

При этом необходимо иметь в виду следующее (далее формулы приведены применительно к измерению тока):

1) ИМ_(ЭМ) с выпрямителем реагирует:

– либо при однополупериодном выпрямлении на среднее значение переменного тока за полпериода

$$I_{\text{CP}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt, \quad (5.1)$$

– либо после двухполупериодного выпрямления на среднее значение переменного тока по модулю

$$I_{\text{CP}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt. \quad (5.2)$$

При этом необходимо учесть, что для несинусоидального тока его среднее значение (1.2) зависит от фазового сдвига гармонических составляющих разложения функции $i(t)$.

Для синусоидального тока его действующее и среднее значения связаны коэффициентом формы

$$K_{\Phi} = I / I_{\text{CP}}. \quad (5.3)$$

2) ИМ_(ЭМ) и ИМ_(ЭД) реагирует на действующее (среднеквадратичное) значение переменного тока, при этом необходимо иметь в виду:

– при измерении синусоидального тока $i(t)$ показание прибора определяется действующим значением синусоидального тока, определяемого выражением

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (5.4)$$

которое связано с амплитудой I_m синусоидального тока $i(t)$ выражением

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0.71 \cdot I_m; \quad (5.5)$$

– при измерении несинусоидального тока $i(t)$ показание прибора определяется действующим значением I несинусоидального тока согласно выражению

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}, \quad (5.6)$$

где постоянная составляющая I_0 разложения несинусоидального тока определяется выражением

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (5.7)$$

где $I_1, I_2, \dots$ – действующие значения первой, второй и т.д. гармоник несинусоидального тока $i(t)$.

3) Показания ЦМ в режиме измерения синусоидального напряжения (ACV) соответствуют действующему значению этого напряжения. При измерении несинусоидального напряжения ЦМ обычно показывает действующее значение несинусоидального напряжения, структура выражения которого соответствует выражению (1.6), но при этом не учитывается постоянная составляющая U_0 .

4. Измерению мощности. Общие сведения

Измерение мощности в цепях постоянного и переменного однофазного тока чаще всего производится электродинамическими или

ферродинамическими ваттметрами, работа которых основана на использовании $ИМ_{(эд)}$.

Электродинамические ваттметры выпускаются в виде переносных лабораторных многопредельных приборов. Их класс точности 0,1 – 0,5.

Ферродинамические ваттметры обычно используются в качестве щитовых приборов с классом точности 1,5 или 2,5.

Ваттметры имеют две обмотки: токовую и напряжения. Направление отклонения стрелки прибора зависит от подключения обмоток ваттметра, поэтому их зажимы имеют специальную маркировку, обеспечивающую правильное подключение прибора. Зажимы, обозначенные знаком * (звездочка), соединяются с проводами, идущими от источника питания. Зажимы, не имеющие этого обозначения, подключаются к нагрузке.

Частотный диапазон этих приборов ограничен, обычно он указывается на шкале прибора. Как правило, они используются при измерении мощности в цепях промышленной частоты.

При подведении к обмоткам ваттметра напряжения на нагрузке и протекающего тока через нагрузку показания прибора определяются выражениями:

– в цепях постоянного тока $P = U \cdot I$;

– в цепях синусоидального тока $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$, где φ – угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока,

– в цепях несинусоидального тока

$$P = U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 + \dots,$$

где φ_k – угол сдвига фаз между напряжением и током k -ой гармоники.

Если к ваттметру будет подведено напряжение одной выделенной гармоники из спектра гармоник напряжения на нагрузке, то при условии, что в токе будет присутствовать ток этой гармоники, прибор покажет потребляемую нагрузкой мощность только этой гармоники.

Отметим, что на основе ИМ_(эд) может быть реализован варметр для измерения реактивной мощности.

В практике электрических измерений все большее применение находят электронные и цифровые приборы для измерения мощности.

2. Задачи

1. Определить значение сопротивления добавочного резистора, включенного последовательно в цепь магнитоэлектрического вольтметра с пределом измерения 30 В, внутренним сопротивлением $R_A = 1000$ Ом и шкалой на 150 делений для расширения предела измерения напряжения до 300 В. Чему равна цена деления?

2. Определить предел измерения тока I_1 в схеме двухпредельного миллиамперметра (рисунок 5.1) с током полного отклонения рамки измерительного механизма $I_A = 50$ мкА, внутренним сопротивлением $R_A = 1,0$ кОм. Значения сопротивлений резисторов ступенчатого шунта $R_1 = 0,9$ Ом, $R_2 = 0,1$ Ом.

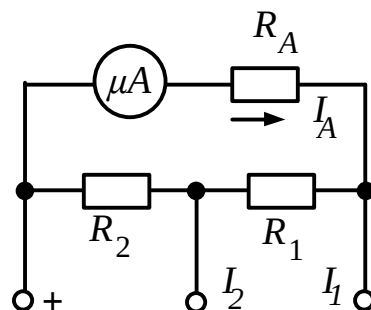


Рисунок 5.1

3. Определить суммарное сопротивление двух последовательно соединённых образцовых катушек сопротивления при $11 \pm 0,012$ и $2 \pm 0,025$ Ом.

4. Оценить годность амперметра класса точности 1,0 с пределом 10 А, если при его поверке методом сличения с образцовым амперметром класса точности 0,2 в точке 6 при повышении тока было зафиксировано 5,92 А, а при понижении – 6,09.

Вопросы к практическому занятию

1. Какие виды погрешностей вы знаете?
2. Какие приборы для измерения электрических величин вам известны?
3. Почему нельзя подключать амперметр непосредственно к источнику напряжения?
4. Следует ли соблюдать полярность подключения цифрового вольтметра к цепи, в которой протекает постоянный ток?
5. Каковы принципиальные особенности использования цифровых амперметров и вольтметров?

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. 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. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение объектов строительства: учебное пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 404 с. – ISBN 978-5-9795-0897-9.

4. Касаткин А.С. Электротехника: Учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. - 12-е изд. – М.: Академия, 2008. - 544 с. – ISBN 9785769557729.

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

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

7. Вольдек А.И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. – 349 с.