

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

для студентов направления подготовки

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(Направленность (профиль) «Автомобили и автомобильное хозяйство»)

Содержание

<i>Предисловие</i>	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1	4
Исследование линейных цепей постоянного тока (4 ч)	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2	37
Последовательное соединение потребителей однофазного переменного тока. Резонанс напряжений и токов в цепях синусоидального тока (4 ч)	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3	72
Трехфазные цепи. Исследование цепи трехфазного тока при различных схемах соединения нагрузки (4 ч)	72
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4	95
Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (4 ч)	95
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5	112
Исследование характеристик диодов, стабилитронов, тиристорov (2ч)	112
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	123

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование линейных цепей постоянного тока (4 ч)

Цель работы: Формирование у студента компетенции. В связи с этим выполняются следующие задачи:

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.

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:

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

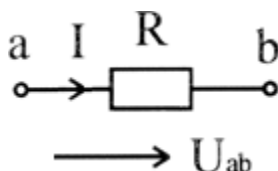


Рисунок 1.1 – Участок цепи

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, заключенный между двумя узлами, включающий в себя один или несколько последовательно соединенных элементов, по которым протекает один и тот же ток. 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) 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.

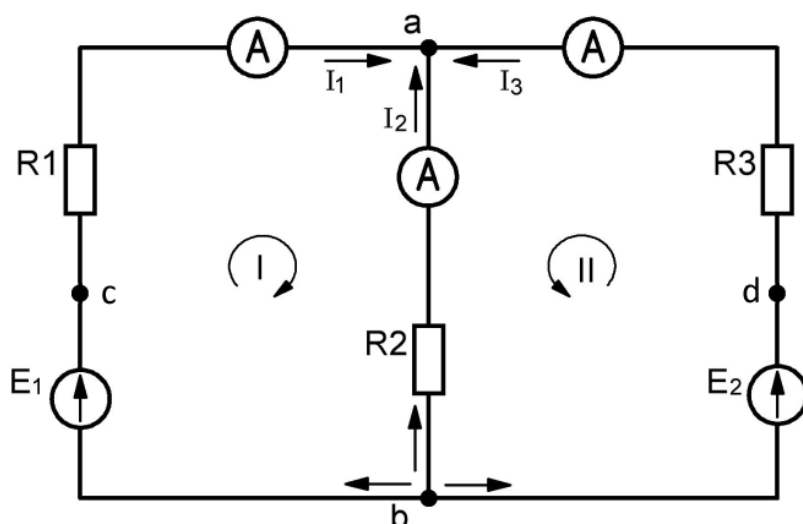


Рисунок 1.1 – Схема линейной электрической цепи постоянного тока

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, минус количество уравнений по первому закону Кирхгофа. Уравнения записываются для контуров, не содержащих источники

тока. 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, число уравнений по двум 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).

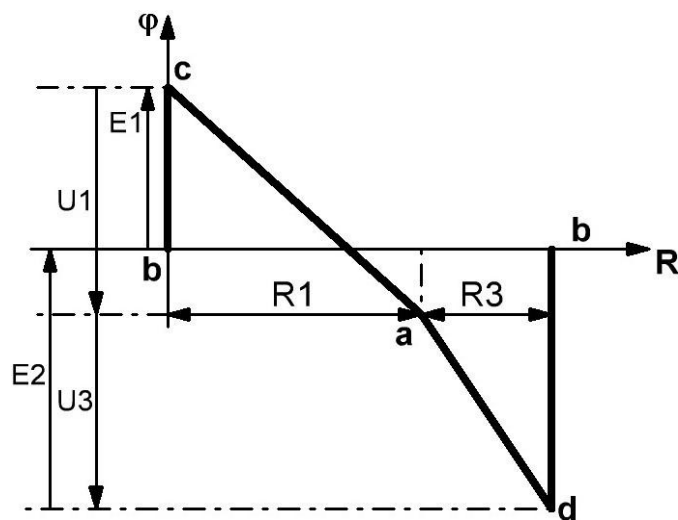


Рисунок 1.2 – Потенциальная диаграмма

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.

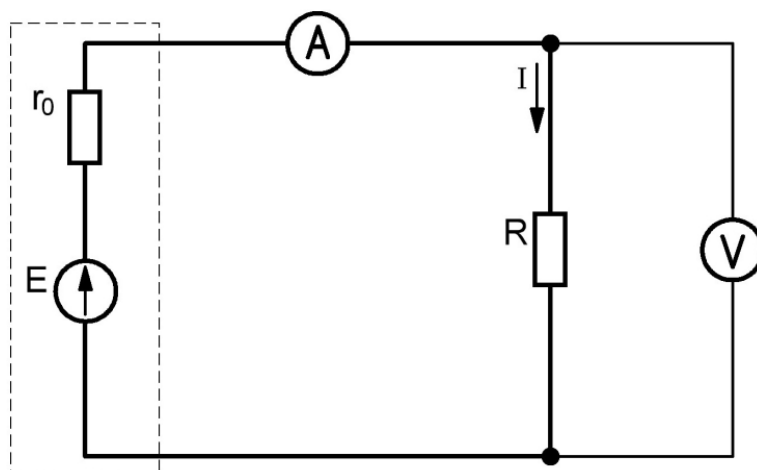


Рисунок 1.3 – Схема замещения неидеального источника напряжения

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.

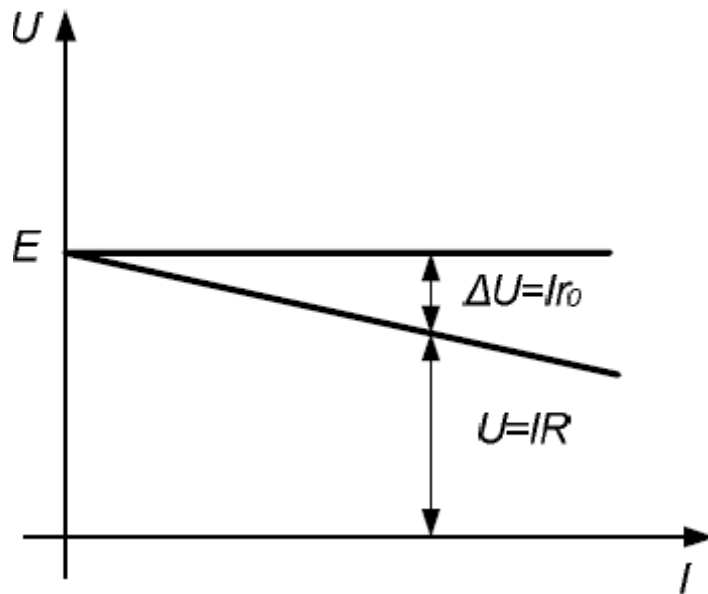


Рисунок 1.4 – Внешняя характеристика источника напряжения

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).

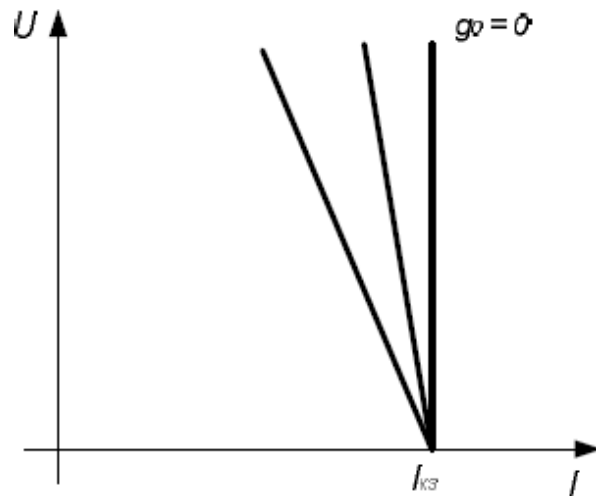


Рисунок 1.5 – Внешняя характеристика источника тока

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 ($I = 0; U = U_{xx}$) и режиму короткого замыкания $U = 0; I = I_{kz}$.

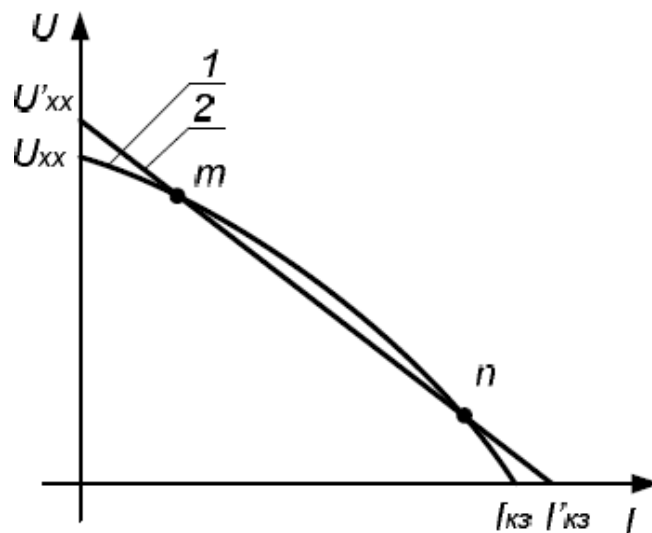


Рисунок 1.6 – Аппроксимация внешней характеристики источника тока

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 .

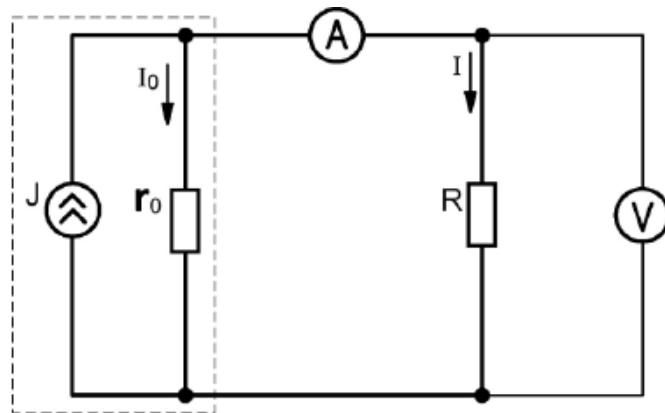


Рисунок 1.7 – Схема замещения неидеального источника тока

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

Аппаратура, 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).

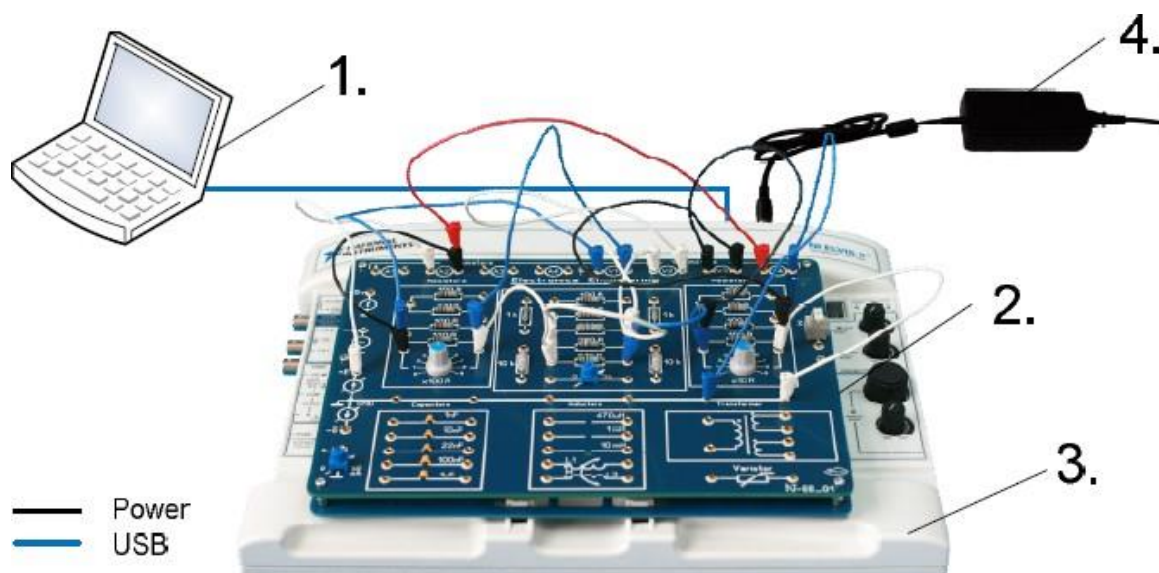


Рисунок 1.8 –Лабораторный стенд, подключаемый к ПЭВМ: 1 – персональный компьютер (ПЭВМ); 2 – макетная плата; 3 – контрольно-измерительное оборудование NI ELVIS II, подключаемое к (1) по USB; 4 – блок питания, обеспечивающий электропитание NI ELVIS II и макетной платы

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, 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 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.

Методика и порядок выполнения работы

Описание макетной платы лабораторного стенда.

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

Макетная плата условно разделена на зоны (рисунок 1.9):

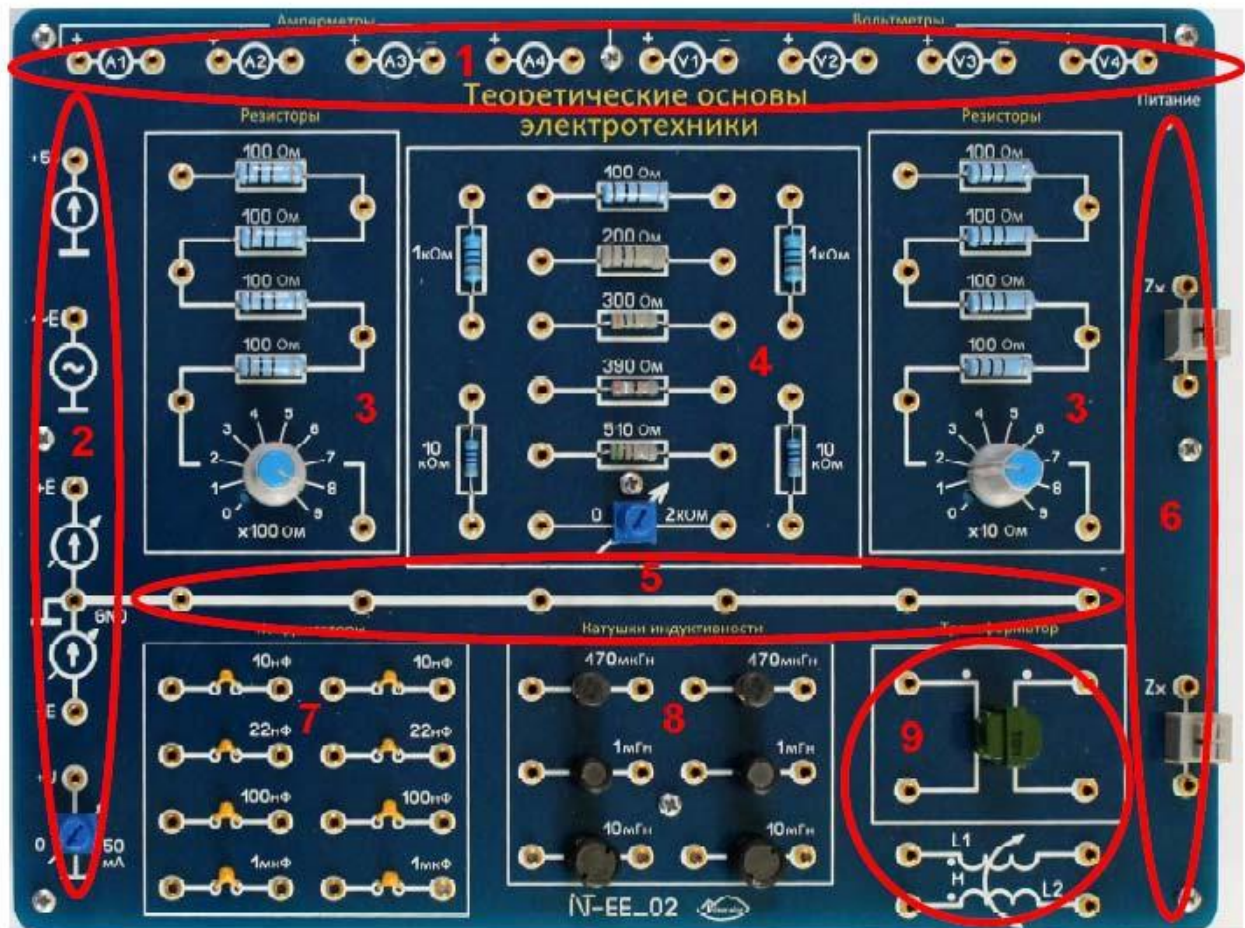


Рисунок 1.9 – Макетная плата и зоны элементов на ней

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

Таблица 1.1 – Параметры источников электрической энергии

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

3. Зоны:

- с 4 последовательно соединенными резисторами по 100 Ом и галетным переключателем 0..900 Ом с шагом 100 Ом;
 - с 4 последовательно соединенными резисторами по 100 Ом и галетным переключателем 0..90 Ом с шагом 10 Ом.
4. Зона независимых резисторов (100 Ом, 200 Ом, 300 Ом, 390 Ом, 510 Ом, 1 кОм, 10 кОм) и переменный резистор, 2 кОм.
5. Зона подключения к «нейтрали» («земля»).
6. Клеммы для подключения внешних компонентов.
7. Зона независимых конденсаторов (10нф, 22нф, 100нф, 1мкф).
8. Зона независимых и последовательно соединенных индуктивностей (470мкГн, 1мГн, 10мГн).
9. Зона трансформатора.

Работа с макетной платой лабораторного стенда.

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

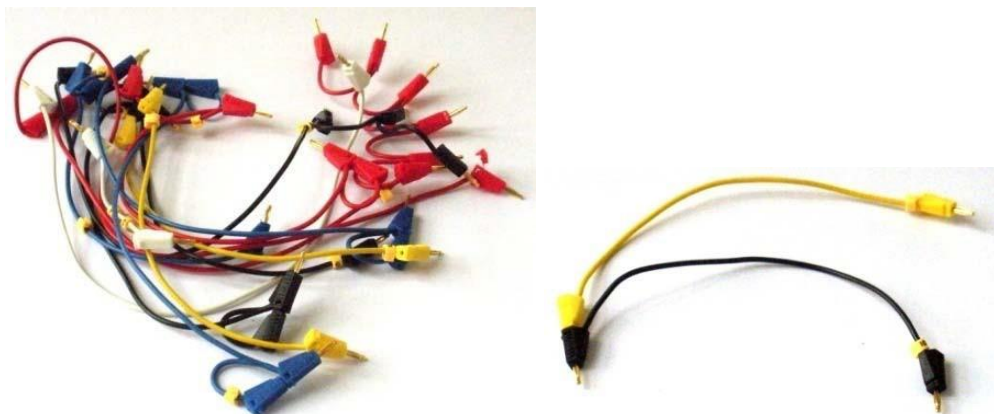


Рисунок 1.10 – Соединительные провода

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



Рисунок 1.11 – Выключатель питания NI ELVIS II

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

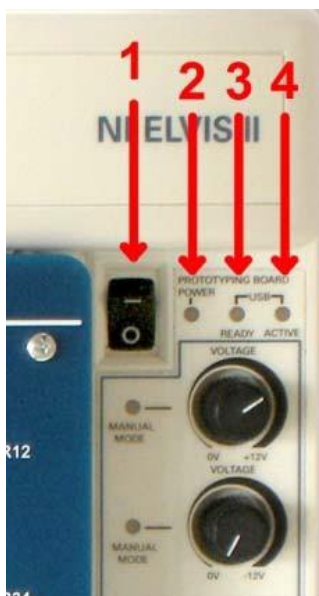


Рисунок 1.12 – Выключатель питания платы и индикаторы

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

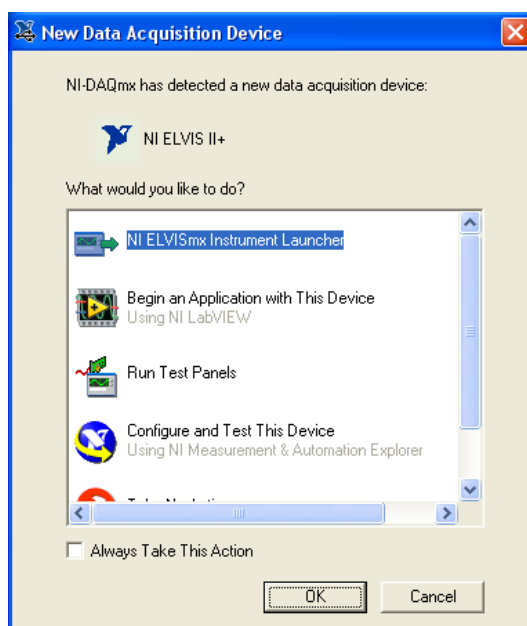
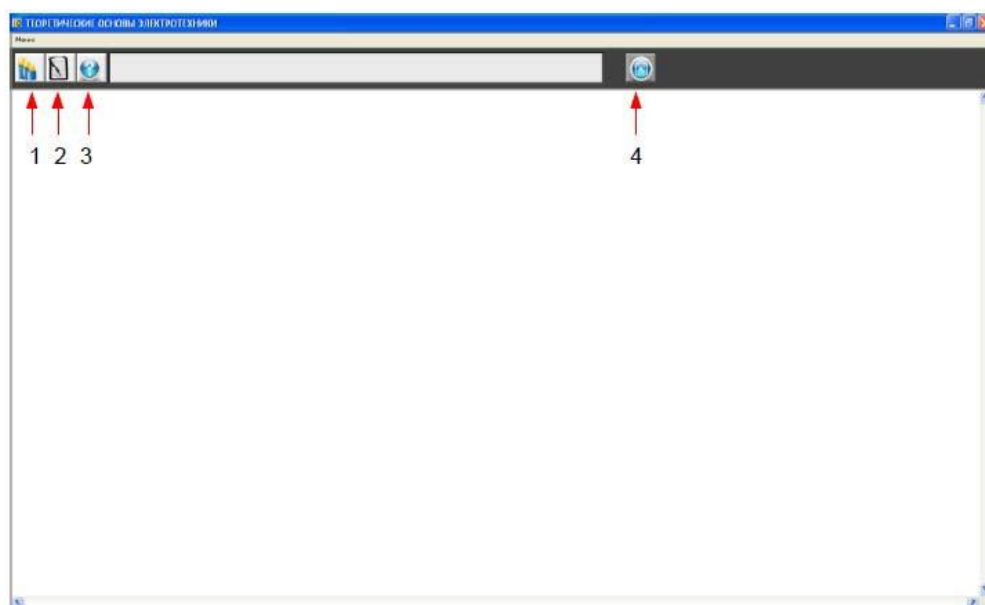


Рисунок 1.13 – Мастер выбора устройства сбора данных

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

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

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



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

Рисунок 1.14 – Начальное окно программы

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

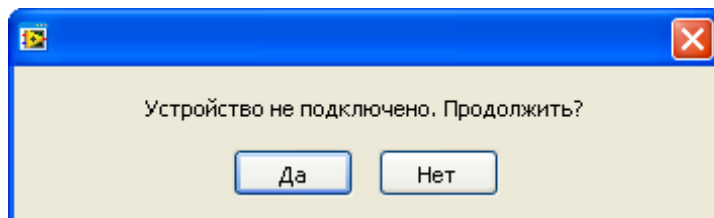


Рисунок 1.15 – Сообщение ошибки о невозможности обнаружения платы

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

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

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

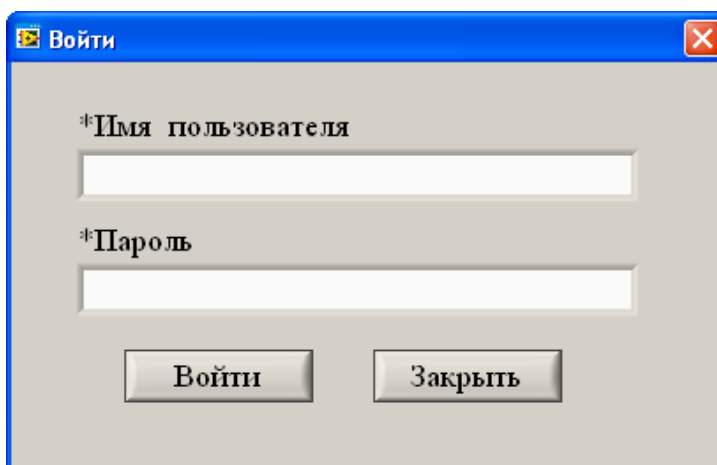


Рисунок 1.16 – Вход пользователя

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

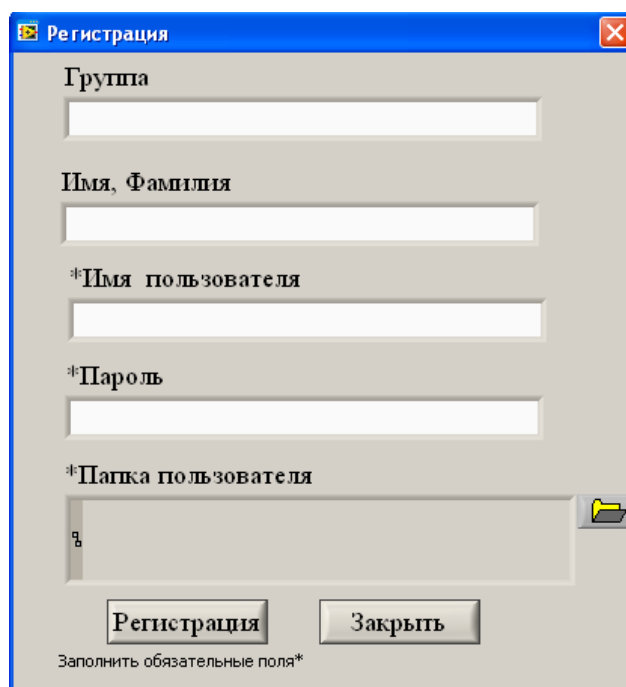


Рисунок 1.17 – Окно регистрации

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**.

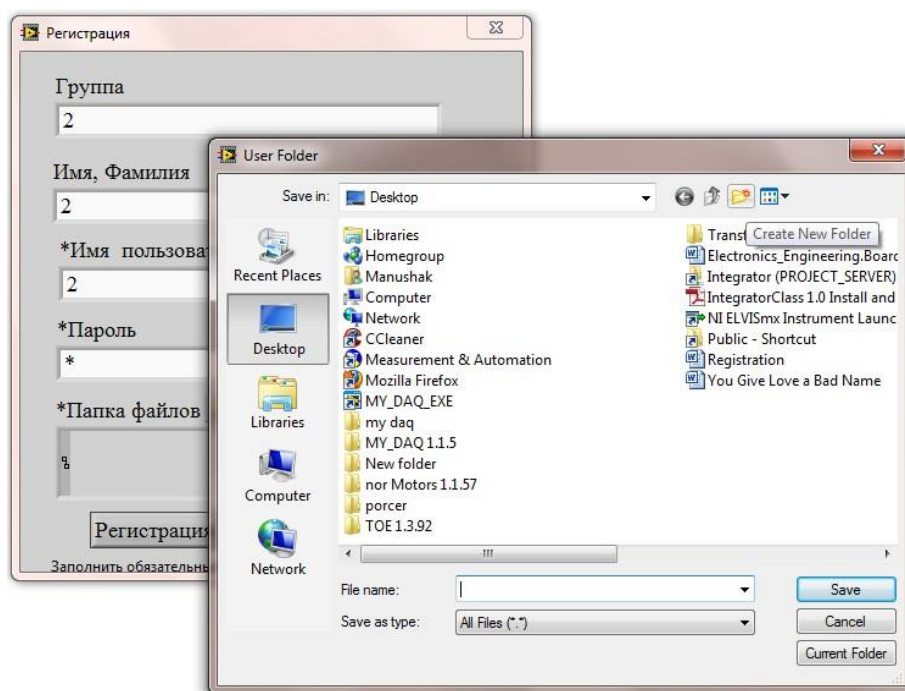


Рисунок 1.18

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

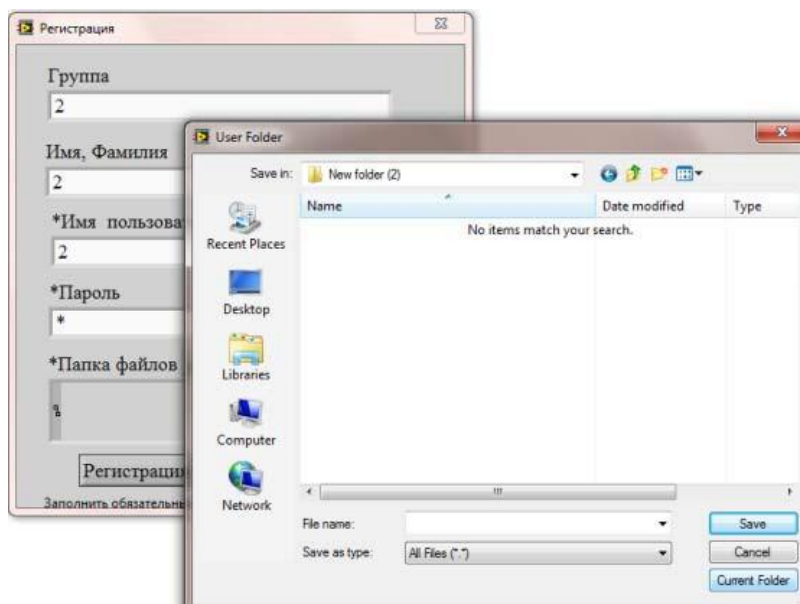


Рисунок 1.19 – Выбор рабочей папки

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.

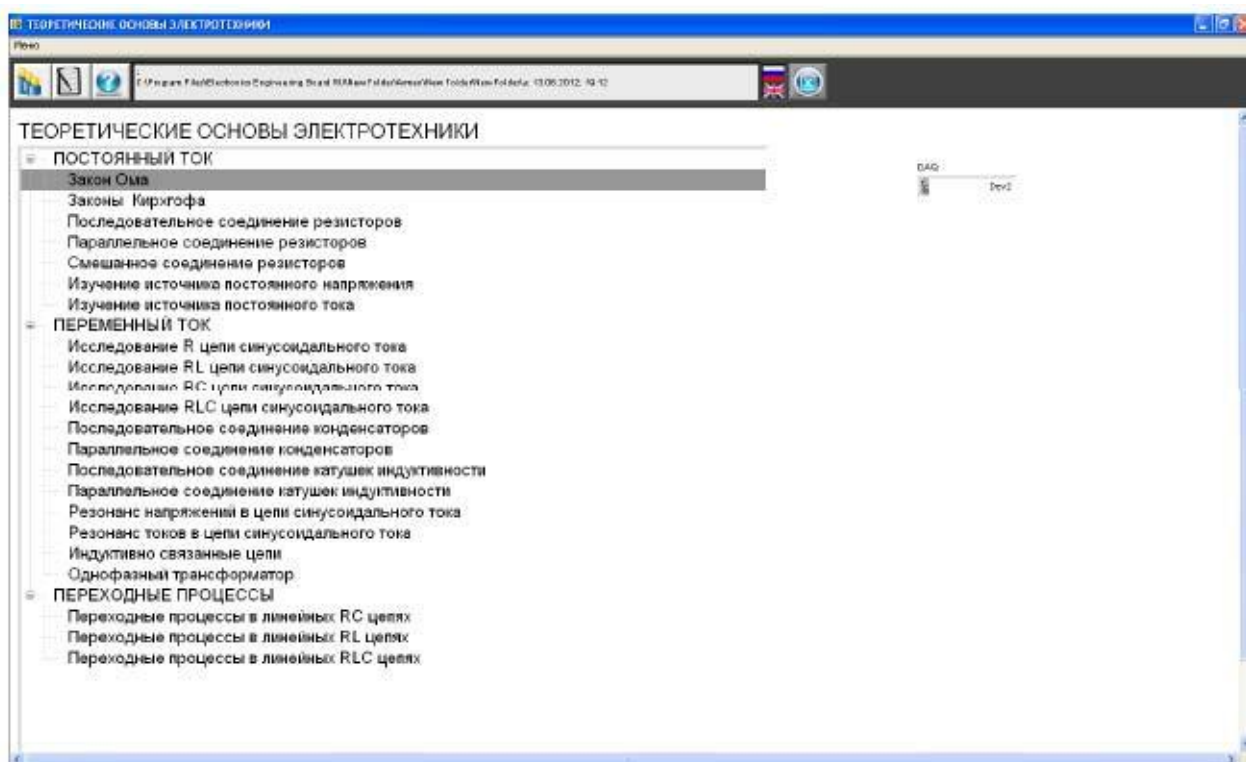


Рисунок 1.20 – Окно главного меню

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**, (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).

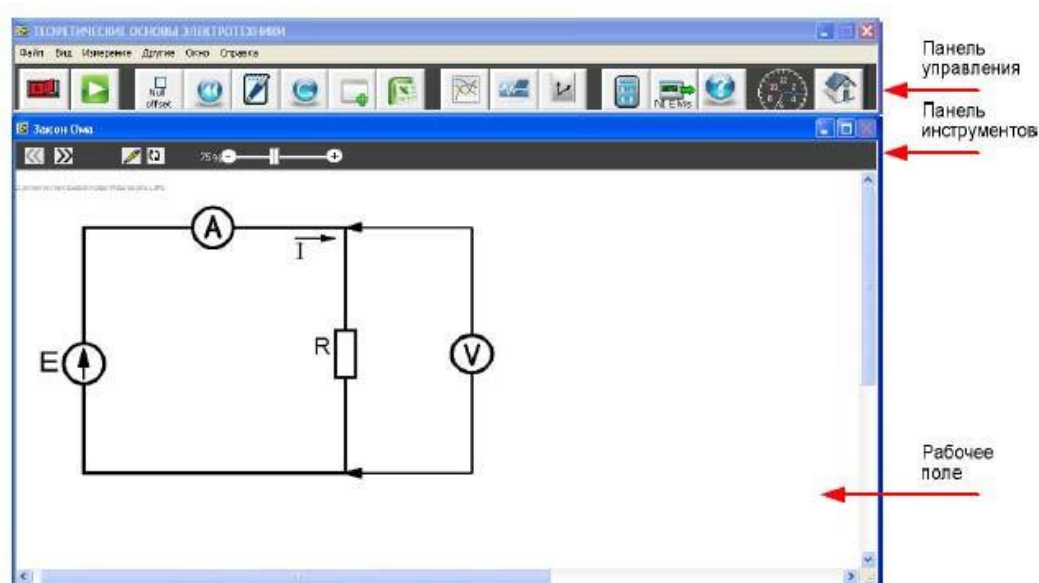


Рисунок 1.21 – Лицевая панель эксперимента «Закон Ома»

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).

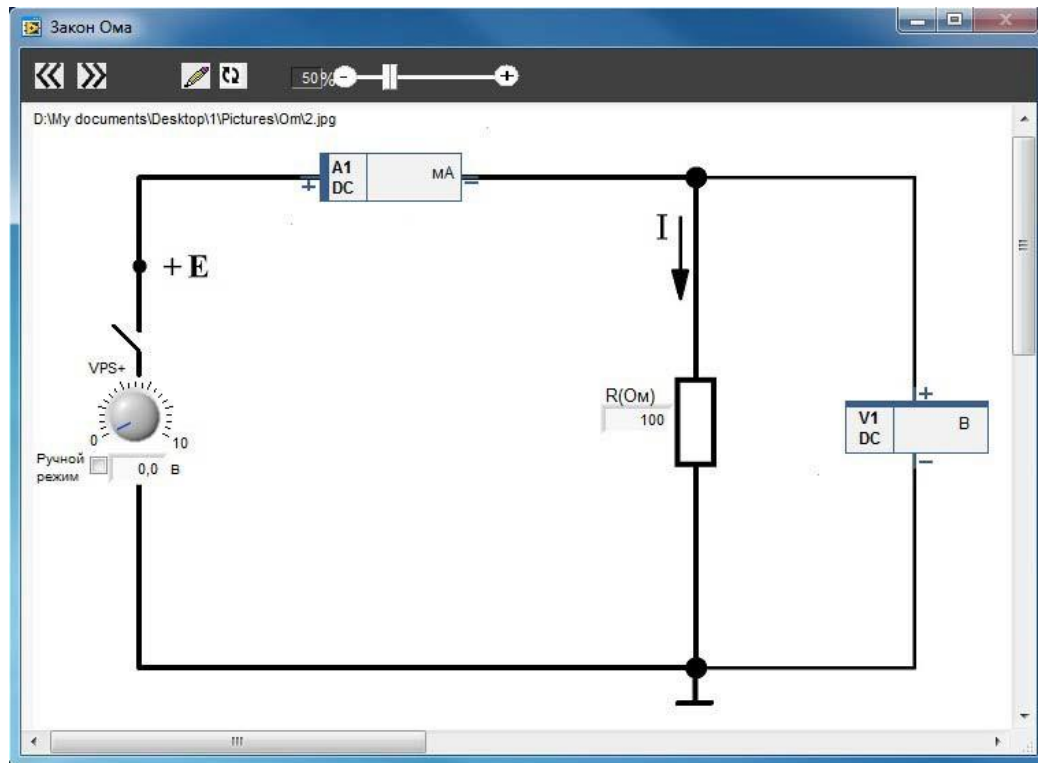


Рисунок 1.22 – Схема электрической цепи эксперимента «Закон Ома»

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 (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.

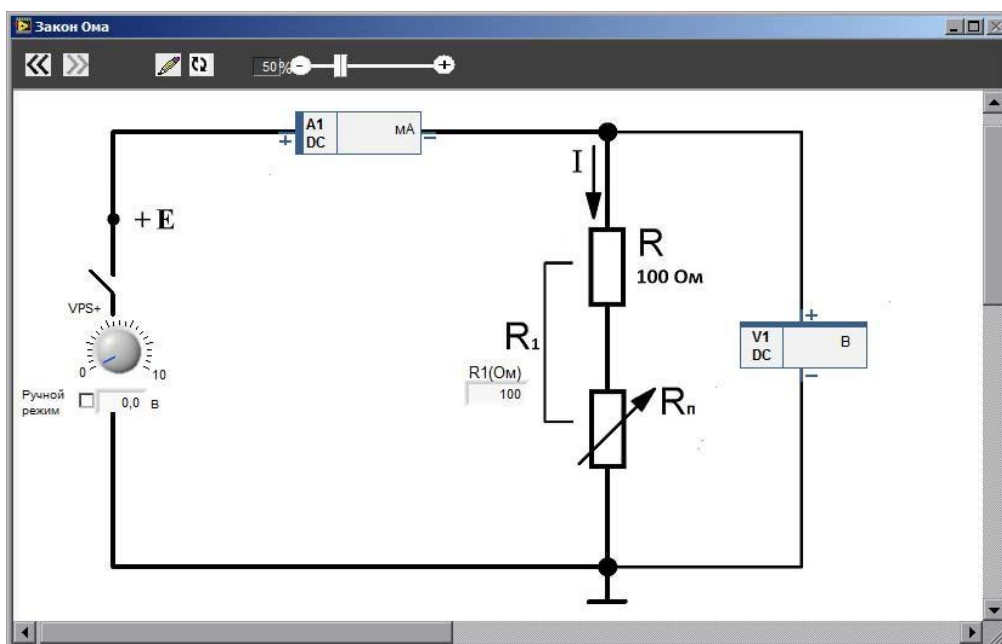


Рисунок 1.24 – Схема для исследования зависимости $I = f(R)$

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 (В)</i>	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 (таблица 1.3).

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

20. Нажмите **Стоп**.

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

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

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

Подготовка к проведению эксперимента

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

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

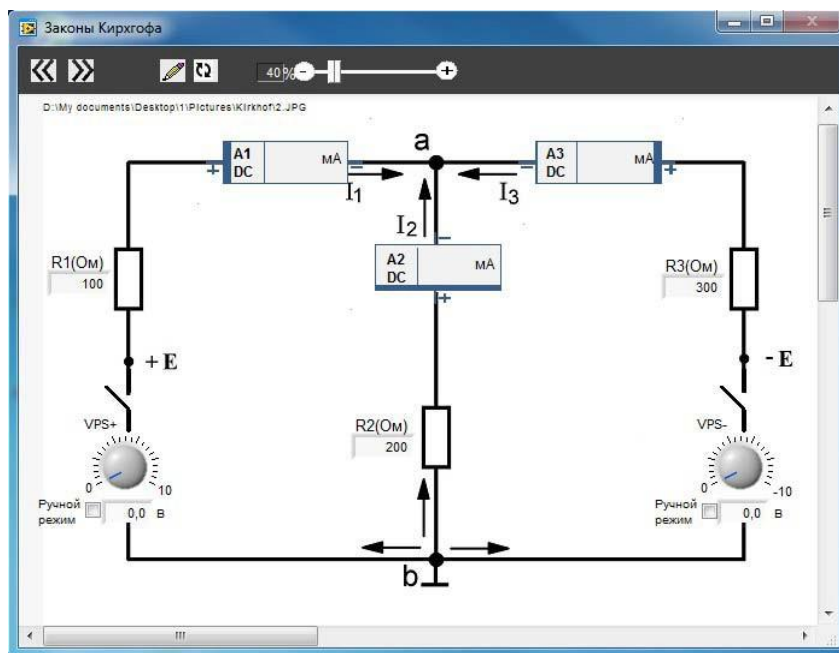


Рисунок 1.25 – Схема для изучения 1 закона Кирхгофа

3. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой, показанной на рисунке 1.25. Установите номиналы сопротивлений, соответствующие заданному преподавателем варианту (N) (таблица 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 (таблица 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).

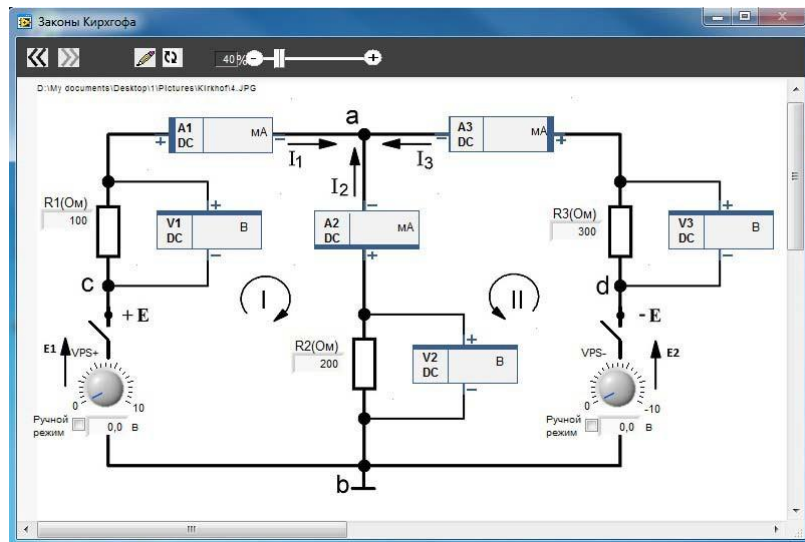


Рисунок 1.26 – Схема для изучения 2 закона Кирхгофа

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 (таблица 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.

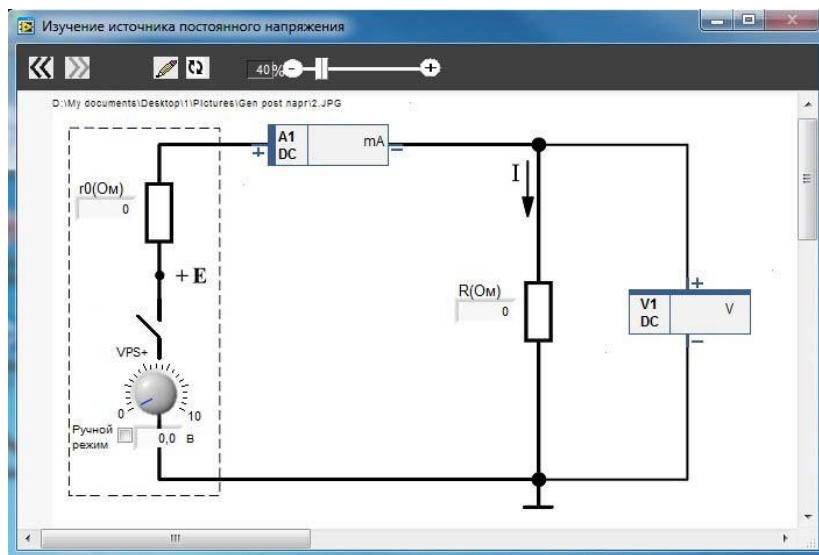


Рисунок 1.27 – – Схема для изучения источника постоянного напряжения

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

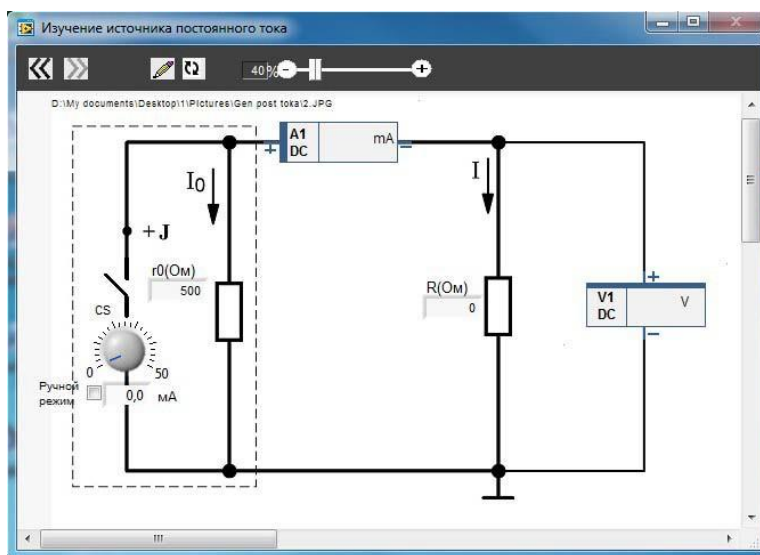


Рисунок 1.28 – Схема для изучения источника постоянного тока

3. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунке 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 x10 Ом, пошагово увеличивайте сопротивление цепи (от 0 до 50 Ом с шагом 10 Ом). На каждом шаге, нажимая **Запись**, записывайте показания приборов.

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

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

7. Нажмите **Стоп**.

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

Обработка экспериментальных данных

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

Обработка результатов 1 эксперимента.

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

каждом шаге измерения, определите относительную погрешность

$\sigma_i = \frac{R_i - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100\%$ 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.			[Ом]		
N	Измерить		Рассчитать		
	V1	A1	R	Погрешность σ	Среднее значение R
	[В]	[мА]	[Ом]	[%]	[Ом]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

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

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

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

Таблица 1.8

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

Для 2 эксперимента необходимо:

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

Таблица 1.9

N	Установить					Измерить			Рассчитать	
	$E1$	$E2$	$R1$	$R2$	$R3$	$A1$	$A2$	$A3$	ΣIa	ΣIb
	$[B]$		$[Om]$			$[mA]$			$[mA]$	

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	
	$E1$	$E2$	$R1$	$R2$	$R3$	$V1$	$V2$	$V3$	$\sum_{k=1}^m E_k - \sum_{i=1}^n V_i$	$\sum_{k=1}^m E_k - \sum_{i=1}^n V_i$
	$[B]$		$[Om]$			$[B]$			Контур I	Контур II
									$[B]$	$[B]$

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

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

Для 3 эксперимента необходимо:

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

Таблица 1.11

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

9. По данным эксперимента постройте внешнюю характеристику.

Для 4 эксперимента необходимо:

10. По данным эксперимента рассчитайте внутреннее сопротивление

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

Таблица 1.12

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

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

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

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.

Вопросы для защиты работы:

1. Понятие электрическая цепь, 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.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

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

Цель работы: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8. В связи с этим выполняются следующие задачи:

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.

Теоретическое обоснование

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

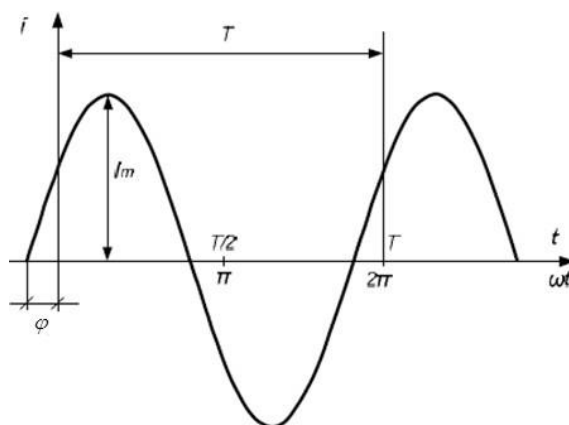


Рисунок 2.1 – График функции синусоидального тока

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $\dot{I}_m$.

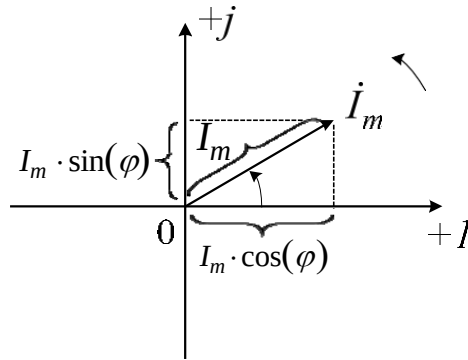


Рисунок 2.2 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

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:

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

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

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

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

$I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – алгебраическая форма 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).

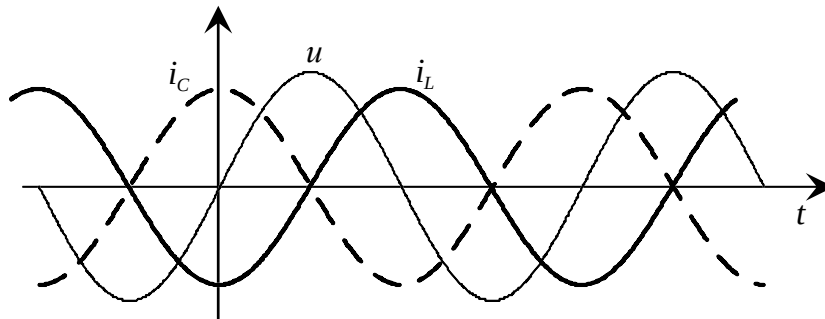


Рисунок 2.3 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах при начальной фазе напряжения, равной нулю

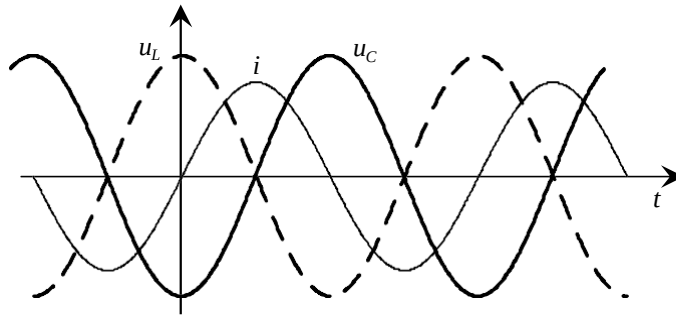


Рисунок 2.4 – Мгновенные токи и напряжение на индуктивном и емкостном элементах при начальной фазе тока, равной нулю

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 $u(t) = u_C(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$, то ток через емкостной элемент определится из выражения:

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

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

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

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

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

Таким образом, мгновенная мощность определится следующим образом:

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

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

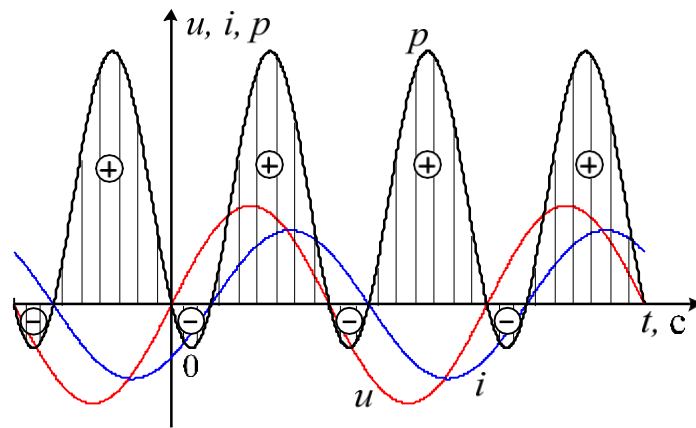


Рисунок 2.5 – График изменения мгновенных значений величин: синусоидального напряжения, тока и мощности

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

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

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

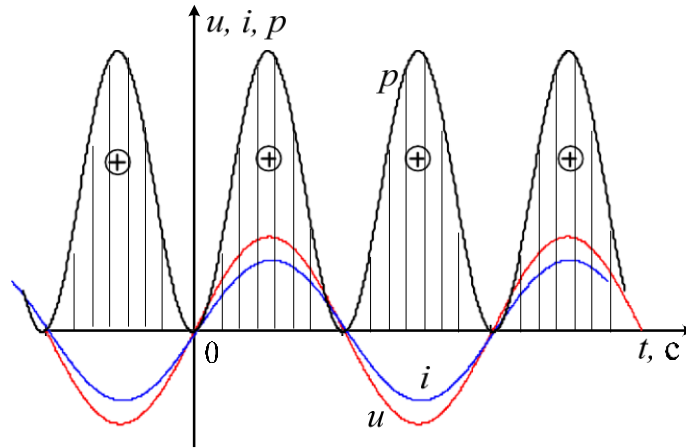


Рисунок 2.6 – Графики изменения мгновенных значений активной мощности и синусоидальных напряжения и тока, совпадающих по фазе

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

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

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

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

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

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

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

Резонансный режим работы цепей переменного тока.

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

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

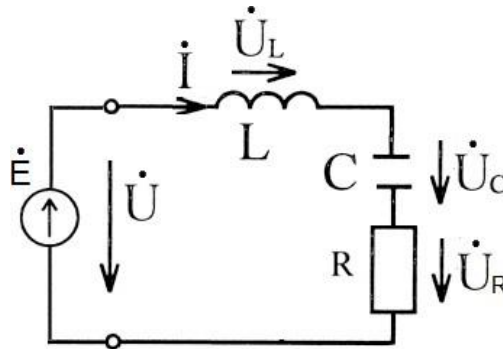


Рисунок 2.7 – Последовательный колебательный контур

По закону Ома комплексная величина тока в контуре определяется

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

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).

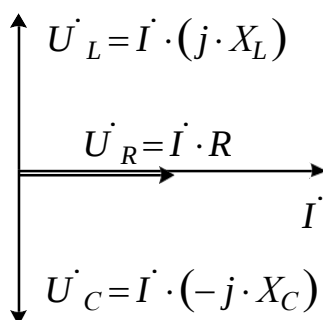


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма напряжений при последовательном резонансе

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).

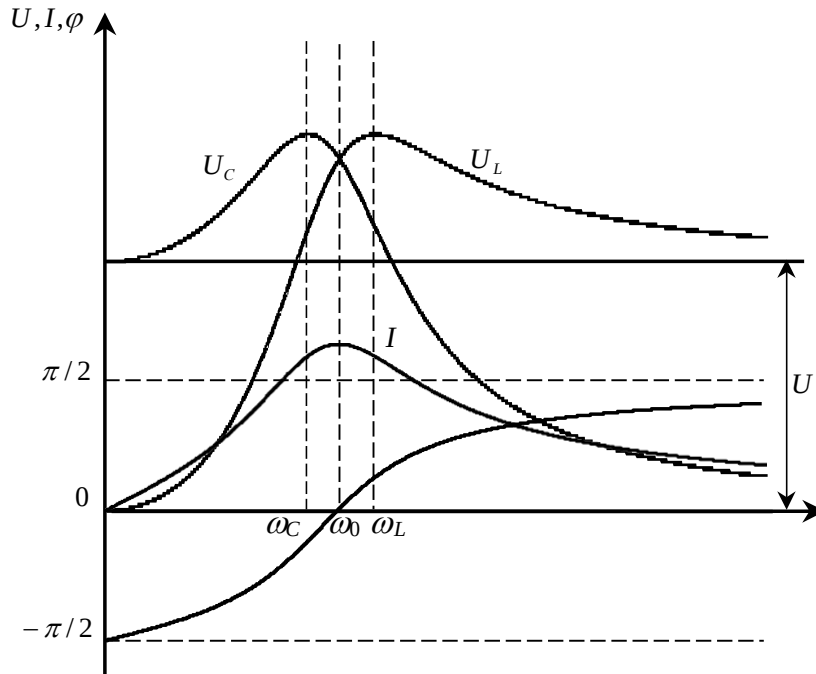


Рисунок 2.9 – Резонансные кривые

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).

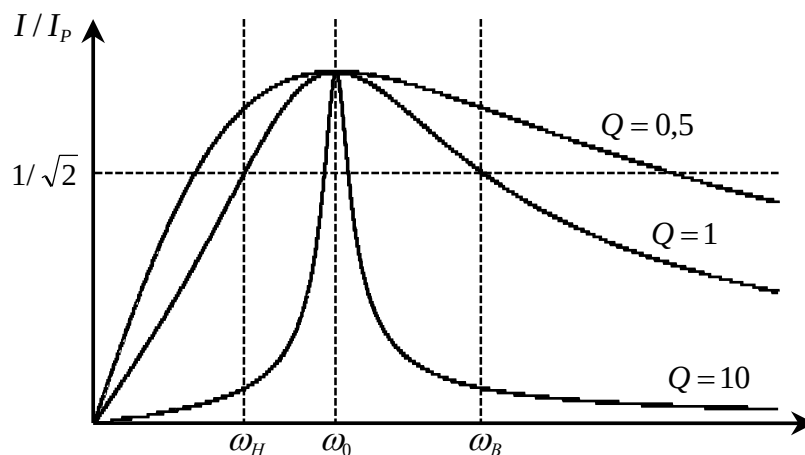


Рисунок 2.10 – Зависимость полосы пропускания контура от его добротности

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 $\dot{U}$

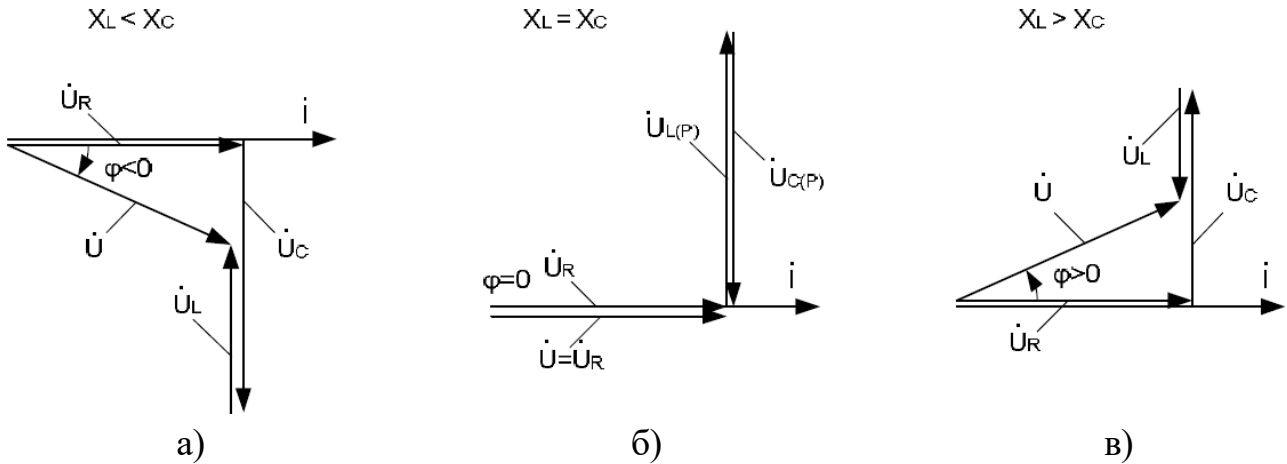


Рисунок 2.11 – Векторные диаграммы последовательного колебательного контура

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

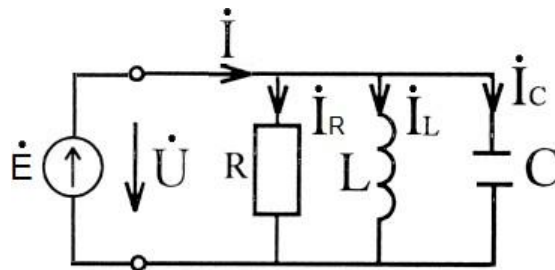


Рисунок 2.12 – Параллельный колебательный контур

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

$$\begin{aligned} \text{где } Y &= \frac{1}{R} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L} + \left(\frac{1}{-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}} \right) = \frac{1}{R} - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot L} \right) + j \cdot (\omega \cdot C) = \\ &= \frac{1}{R} - j \cdot \left(\frac{1}{\omega \cdot L} - \omega \cdot C \right) = g - j \cdot (b_L - b_C) \text{ – комплексная проводимость цепи;} \end{aligned}$$

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

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

Действующее значение тока I

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

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

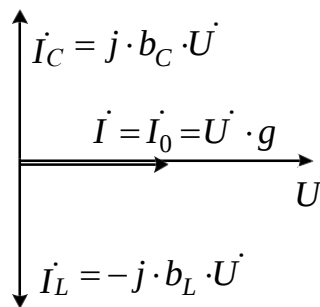


Рисунок 2.13 – Векторная диаграмма токов при параллельном резонансе

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):

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

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 $d = 1/Q$.

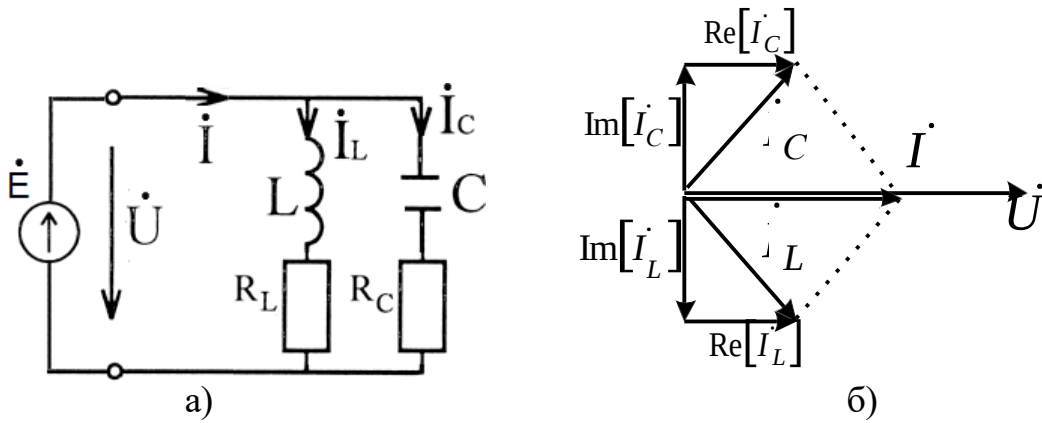


Рисунок 2.14 – Электрическая схема (а) и векторная диаграмма (б)

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.

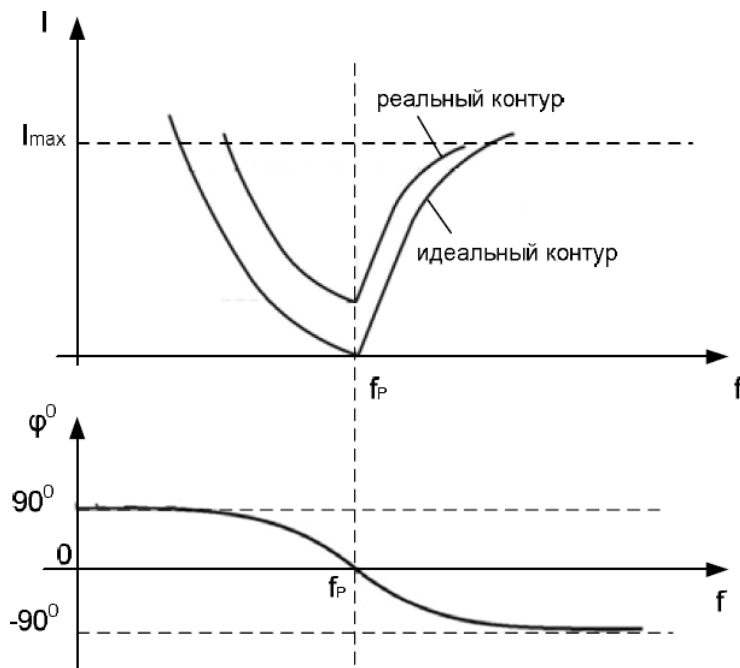


Рисунок 2.15 – Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики

Аппаратура, оборудование и материалы

Аналогично лабораторной работы 1.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1.

Методика и порядок выполнения работы

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 ПКX, где X – это № компьютера, указанный на мониторе в правом верхнем углу. В строке **Пароль** нужно указать 1111.

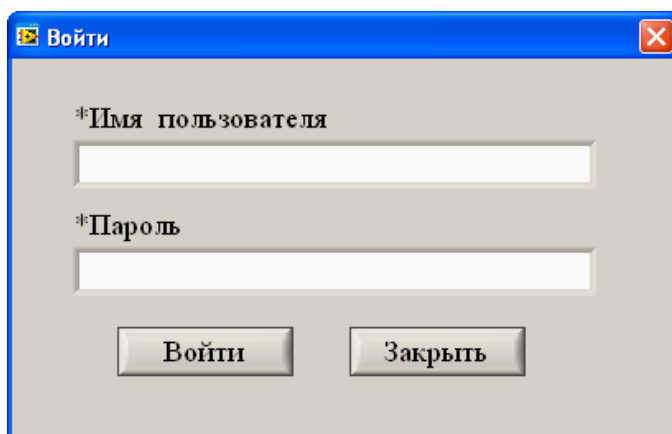


Рисунок 2.16 – Вход пользователя

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

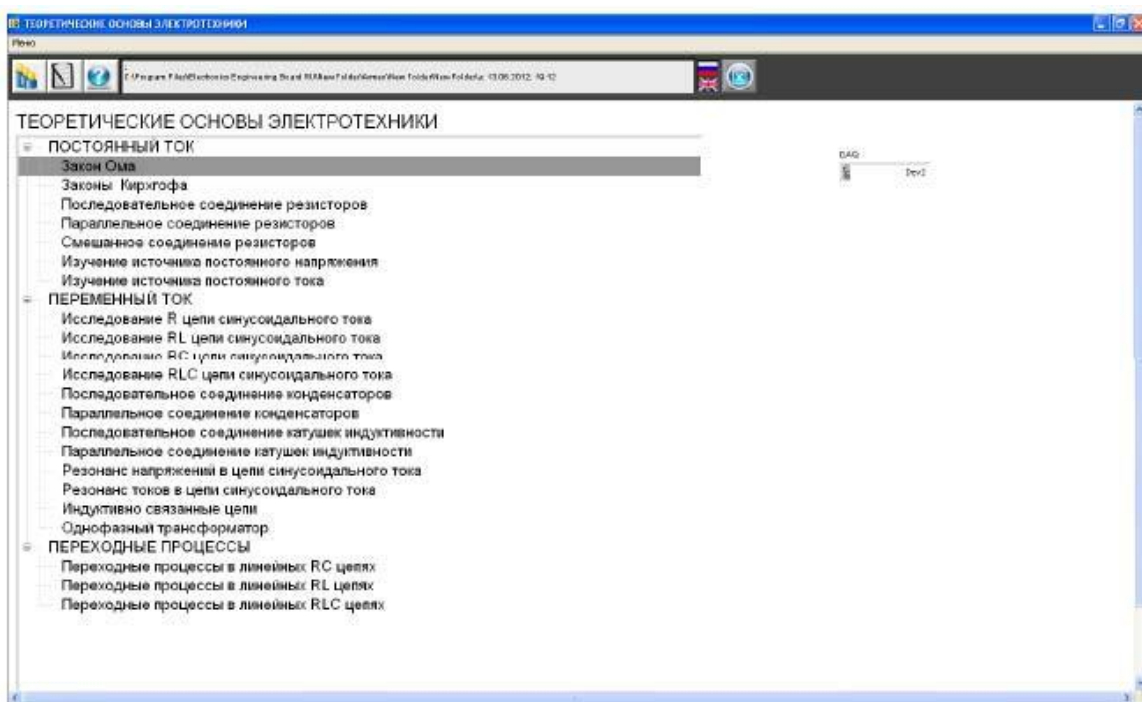


Рисунок 2.17 – Окно главного меню

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

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

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

1 эксперимент: «Исследование RL цепи синусоидального тока».

Приборы и компоненты:

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

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

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

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

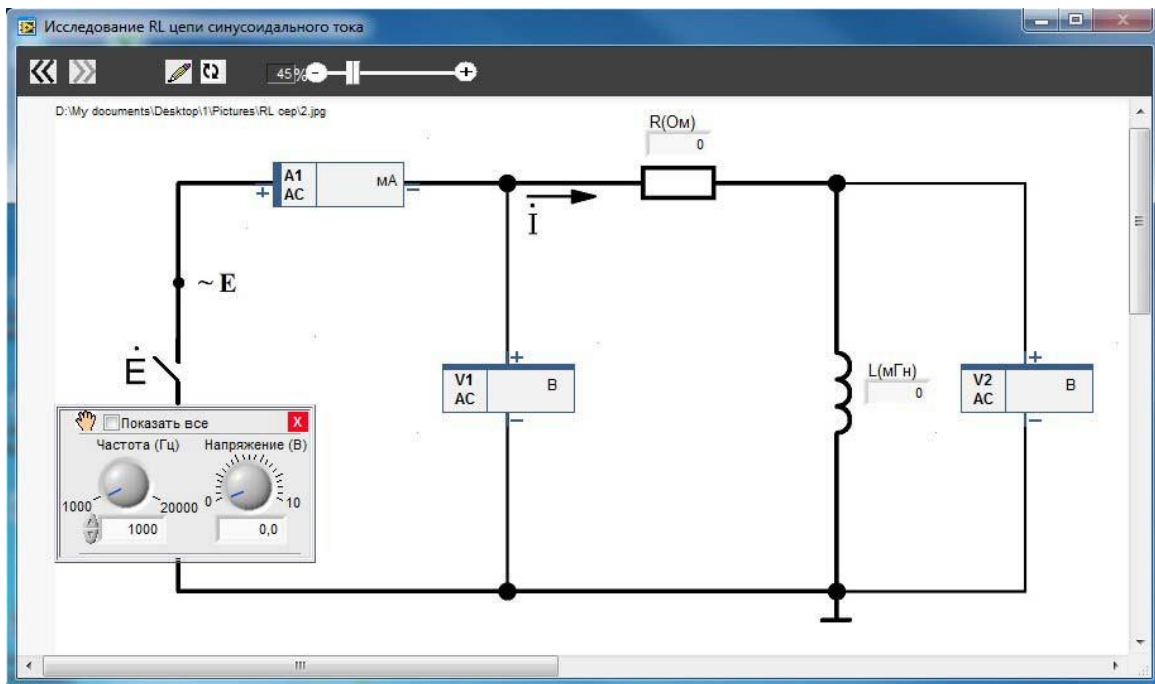


Рисунок 2.18 – Схема электрической цепи эксперимента

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

Таблица 2.1 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

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

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

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

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

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

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

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

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

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

Вкладка **Осциллограммы** (рисунок 2.19) состоит из следующих зон: зона отображения осциллограмм (1); зона выбора сигнала (2); зона управления осями, масштабирования, и синхронизации (3).

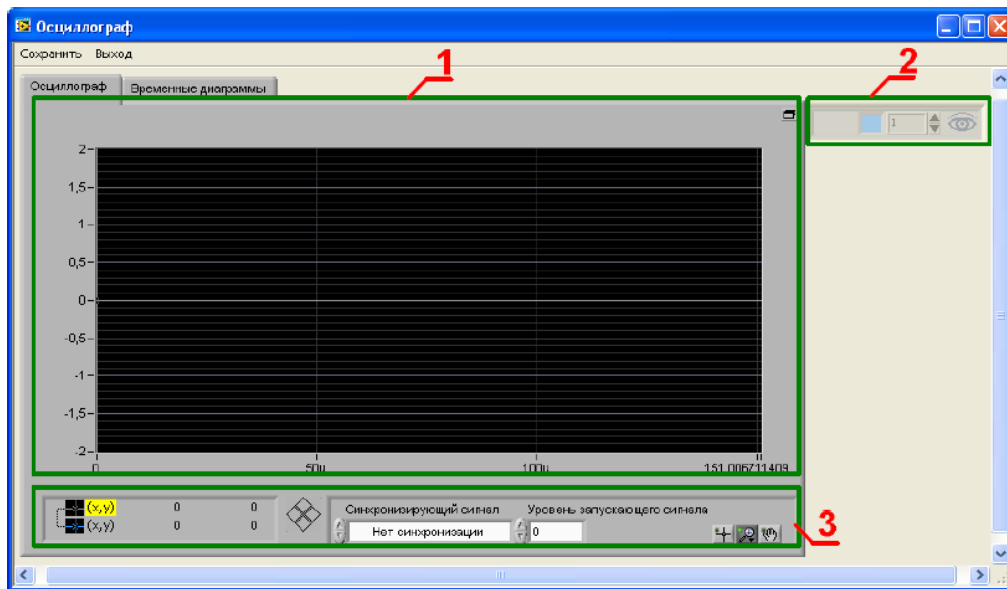


Рисунок 2.19 – Вкладка Осциллограммы

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

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

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

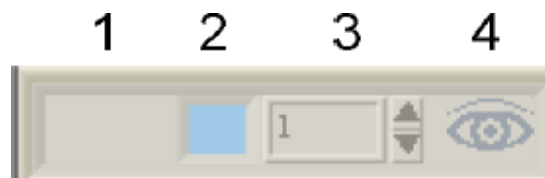


Рисунок 2.20 – Зона выбора сигнала: в поле 1 появятся названия всех инициированных в данной лабораторной работе приборов; в поле 2 доступно меню выбора цвета отображения; в поле 3 можно изменять цену деления шкалы для данного сигнала, при этом в поле индикации будет отображаться соответствующая цена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

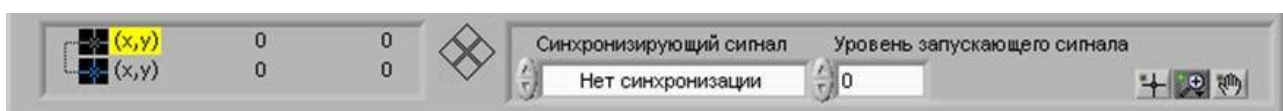


Рисунок 2.21 – Зона управления осями и масштабирования

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).

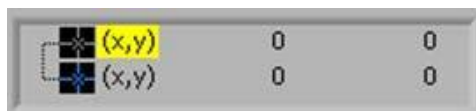


Рисунок 2.22 – Поле выбора/отображения координат курсора

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).

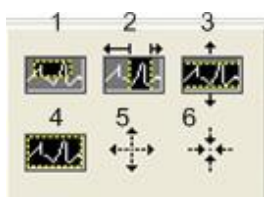


Рисунок 2.23 – Меню выбора масштаба: 1 – позволяет выбрать мышью произвольную прямоугольную область на графике и растянуть ее по диагонали на желаемый масштаб; 2 – позволяет выбрать мышью произвольную горизонтальную область на графике и растянуть ее по горизонтали на желаемый масштаб; 3 – позволяет выбрать 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 применяться сигнал с любого из инициированных в данной лабораторной работе измерителей. В качестве синхронизирующего зачастую используется сам исследуемый сигнал.

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

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

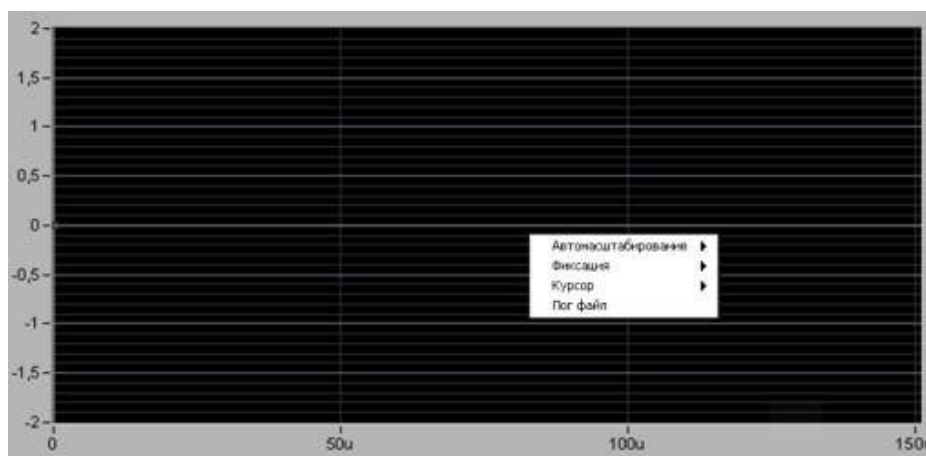


Рисунок 2.24 – Меню управления с элементами *Автомасштабирование*, *Фиксация*, *Курсор*, и *Лог файл*: элемент **Автомасштабирование** > **Y** (или **X**) > **Вкл.** (или **Выкл.**) включает или выключает автоматическое масштабирование по осям **Y** или **X**, соответственно; элемент **Фиксация** > **Вкл.**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

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

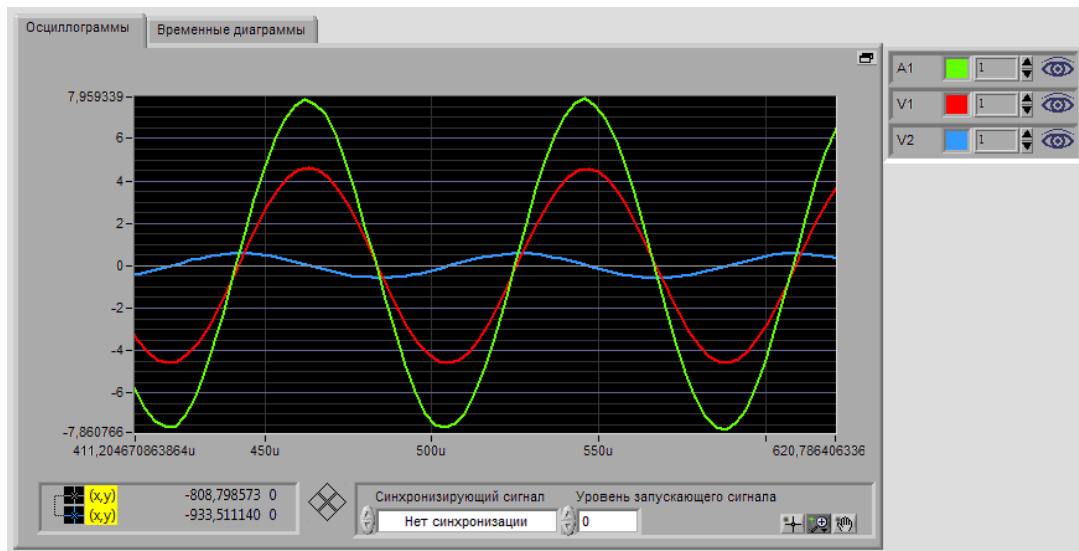


Рисунок 2.25 – Пример осциллограмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1**

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

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

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

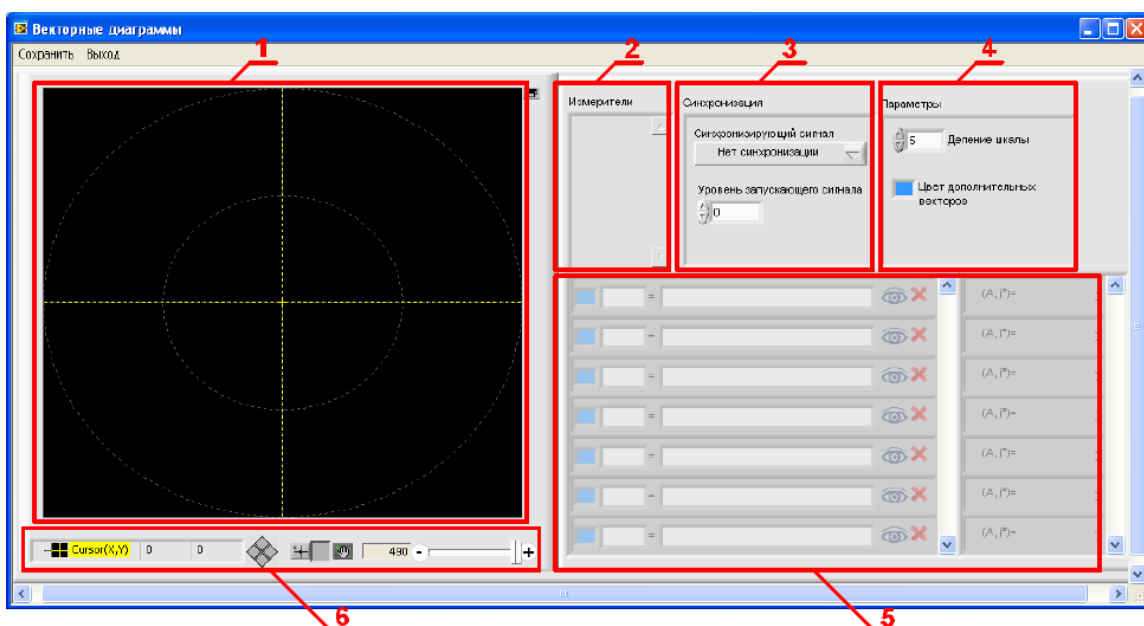


Рисунок 2.26 – Окно Векторные диаграммы

Окно состоит из следующих зон: зона отображения векторов (1); зона выбора измерителей (2); зона синхронизации (3); зона параметров шкалы (4); зона определения векторов (5); зона управления осями и масштабирования (6).

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

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

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

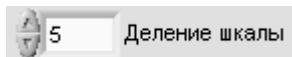


– вводом значения в поле или перемещением ползунка устанавливается максимальный радиус шкалы векторов.

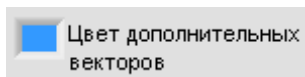
Зона выбора измерителей (2) содержит список **Измерители** всех инициализированных измерителей данной лабораторной работы.

Зона синхронизации (3) содержит элементы настройки синхронизации изображения.

Зона параметров (4) позволяет:



– 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.

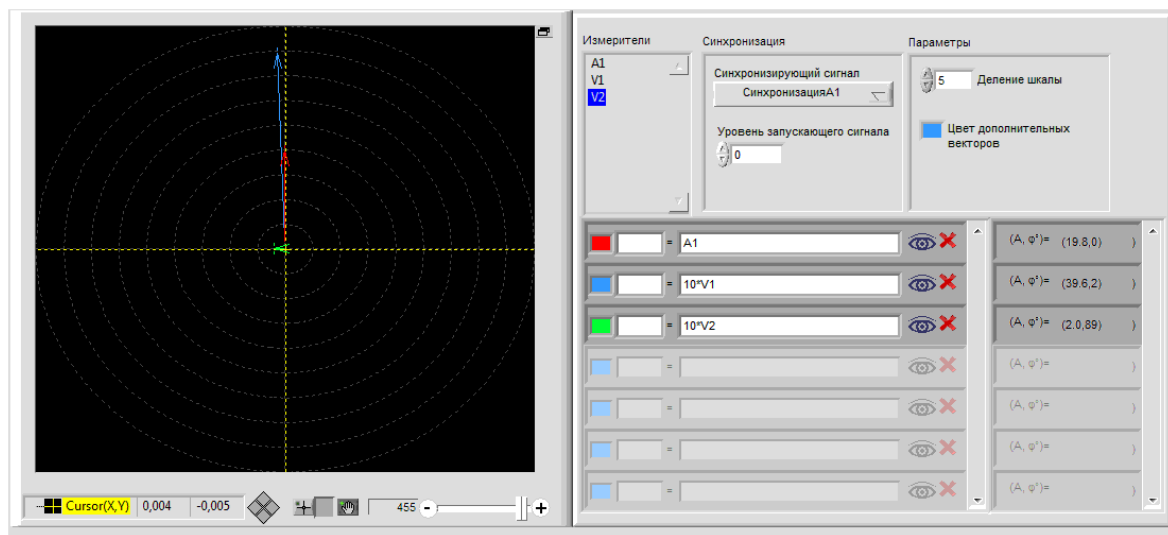


Рисунок 2.28—Пример векторных диаграмм для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1**

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

8. Нажмите **Стоп**.

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

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

Приборы и компоненты:

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

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

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

2. Из главного меню (рисунок 2.17) двойным щелчком выберите эксперимент «Исследование RC цепи синусоидального тока». Нажмите кнопку **Следующий** ($>>$) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 2.29).

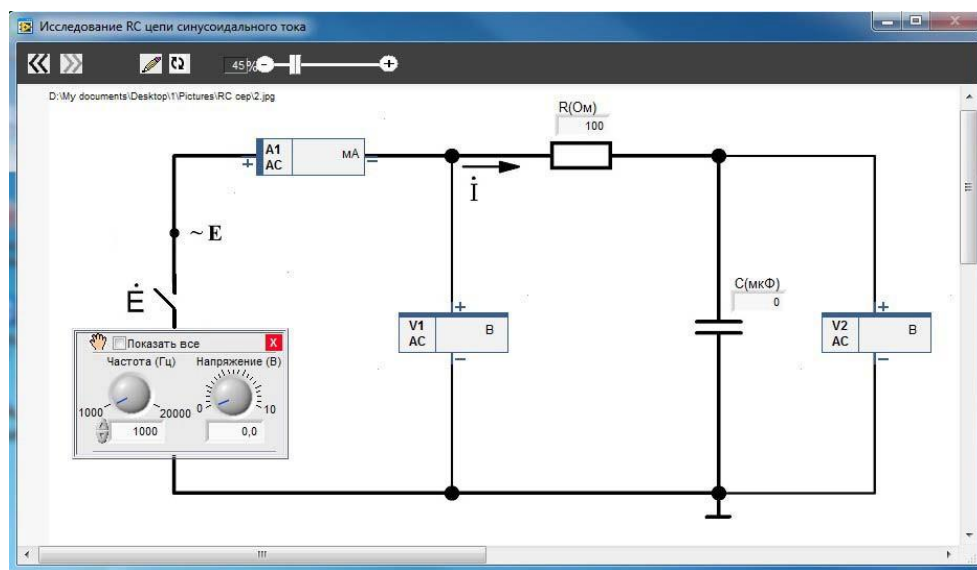


Рисунок 2.29 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на макетной плате электрическую цепь в соответствии со схемой на рисунке 2.29. Установите номиналы сопротивления и емкости в соответствии с заданным преподавателем вариантом (N) из таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

N	1	2	3	4	5	6	7
$f[\text{кГц}]$	14	12	10	8	6	4	2
$\sim E_{pp} [\text{В}]$	$3 \div 10$						
$C[\text{мкФ}]$	0.022		0.1		1		
$R[\text{Ом}]$	100	200	300	400	500	600	700

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

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование RC цепи синусоидального тока».

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

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

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) и частоту (поле **Частота**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту из таблицы 2.2 и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2).

5. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** для наблюдения напряжения **V1**, **V2** и тока **A1** и сохраните изображение (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2). По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи. Амплитуды и фазы векторов (A , 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).

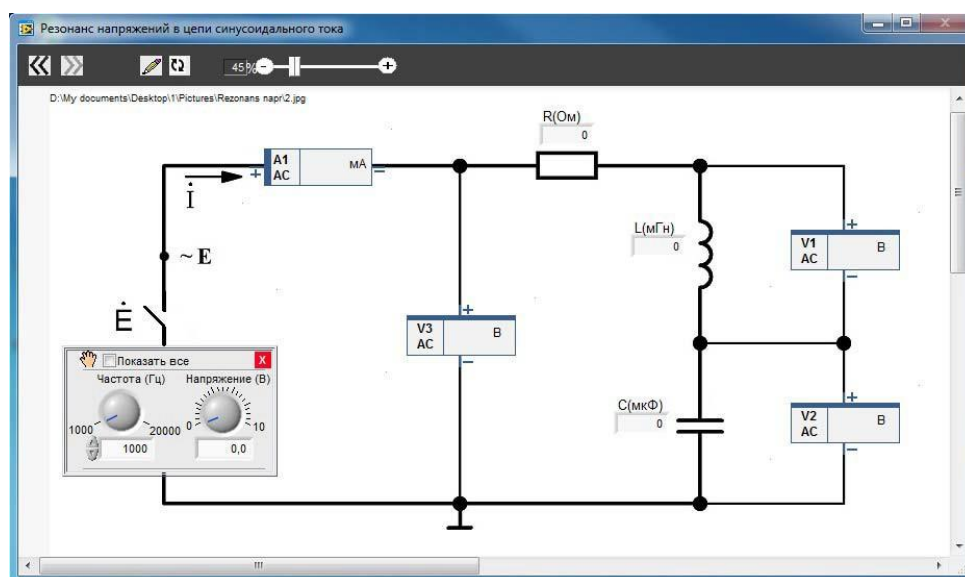


Рисунок 2.30 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунке 2.30. Установите номиналы сопротивления, индуктивности и емкости, в соответствии с заданным преподавателем вариантом (N) из таблицы 2.3.

Таблица 2.3 – Варианты (N) параметров элементов для эксперимента

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sim E_{pp} [В]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R [Ом]$	$100 \div 500$						$100 \div 200$	100	100	
$L [мГн]$	10						1		0.47	
$C [мкФ]$	0.1		0.022		0.01		1	0.1	1	

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

6. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Резонанс напряжений в цепи синусоидального тока».

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

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

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту, начальную частоту (2кГц, поле **Частота**) и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Пошагово (с шагом – 2 кГц) поднимайте частоту от 2 кГц до 18 кГц. Нажимая **Запись**, записывайте показания приборов на каждом шаге. Необходимо убедиться в том, что в файл **MS Excel** записаны данные измерительных приборов на каждом шаге. При подходе к резонансной частоте, уменьшите шаг так, чтобы зафиксировать эту точку. В режиме резонанса напряжений в исследуемой цепи, показания **A1** будут иметь максимальное значение. Таким образом, нужно найти значения частоты при шаге 2 кГц, при которой показания **A1** начнут уменьшаться. Затем вернуться на предыдущую частоту и, постепенно увеличивая частоту на 100 Гц, найти максимальное значение тока **A1** и записать эту точку в файл **MS Excel**.

5. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжений **V1**, **V2**, **V3** и тока **A1** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной.

6. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжений **V1**, **V2**, **V3** и тока **A1** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной. По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи в точке резонанса. Амплитуды и фазы векторов (**A**,) выведены рядом с полями определения векторов в окне **Векторная диаграмма**. Убедитесь в том, что угол между вектором общего напряжения (**V3**) и током (**A1**) в точке резонанса близок к нулю.

7. Повторите сделанные измерения и вычисления (п.п.3-6) для всех вариантов, заданных преподавателем. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовке отчета о лабораторной работе.

8. Нажмите **Стоп**.

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

4 эксперимент: «Резонанс токов в цепи синусоидального тока».

Приборы и компоненты:

1. Сопротивление (зона резисторов на плате);
2. Конденсатор (зона конденсаторов на плате);
3. Индуктивность (зона индуктивностей на плате);
4. Источник синусоидального напряжения (функциональный генератор $\sim E$);
5. Вольтметр (**V1**);
6. Амперметры (**A1**, **A2**, **A3**).

Подготовка к проведению эксперимента «Резонанс токов в цепи синусоидального тока».

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

2. Из главного меню (рисунок 2.17) двойным щелчком выберите эксперимент «Резонанс токов в цепи синусоидального тока». Нажмите кнопку **Следующий** ($>>$) на панели инструментов. Откроется заранее подготовленное изображение электрической схемы лабораторной работы с размещенными на ней полями компонентов и приборов (рисунок 2.30).

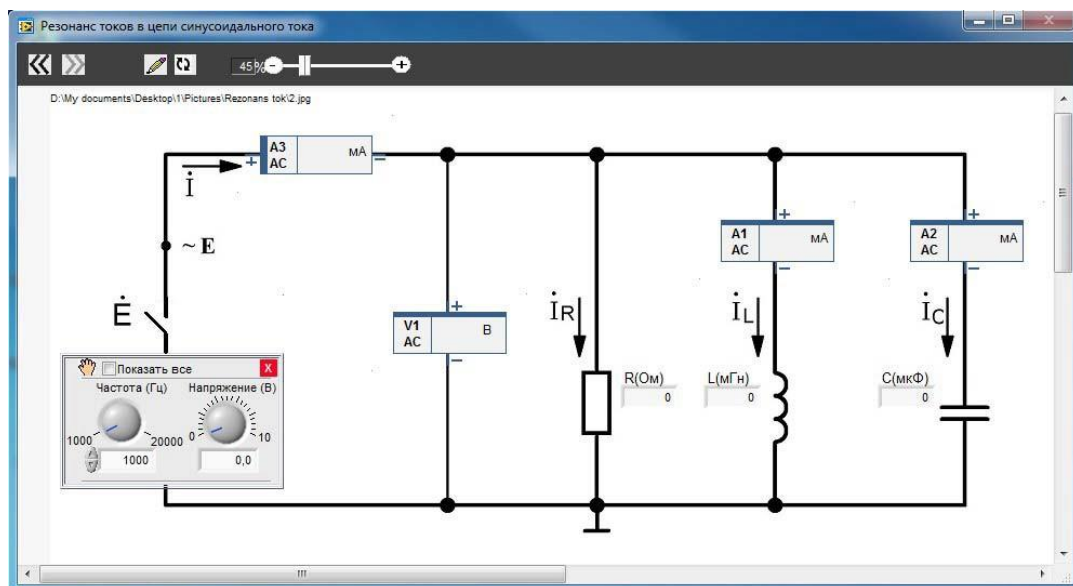


Рисунок 2.31 – Схема электрической цепи эксперимента

4. Соберите на плате цепь в соответствии со схемой на рисунке 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

<i>N</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sim E_{pp}$ [В]	10	9	8	7	6	5	4	3	10	9
<i>R</i> [Ом]	1000 ÷ 2000									
<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 токов в цепи синусоидального тока».

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

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

3. Установите напряжение (поле **Напряжение**) источника, соответствующее заданному преподавателем варианту, начальную частоту (2кГц, поле **Частота**) и нажмите **Запись**. Следует отметить, что амплитуда выходного напряжения источника синусоидального сигнала ($\sim E$) равна половине значения, введенного в поле **Напряжение**. Затем нажмите кнопку (8) панели управления (рисунок 1.23), откроется файл **MS Excel**. Необходимо убедиться в том, что в указанный файл были записаны данные измерительных приборов. При необходимости пункты 1-3 порядка выполнения эксперимента повторить.

4. Пошагово (с шагом – 2 кГц) поднимайте частоту от 2 кГц до 18 кГц. Нажимая **Запись**, записывайте показания приборов на каждом шаге. Необходимо убедиться в том, что в файл **MS Excel** записаны данные

измерительных приборов на каждом шаге. При подходе к резонансной частоте, уменьшите шаг так, чтобы зафиксировать эту точку. В режиме резонанса токов в исследуемой цепи, показания A_3 будут иметь минимальное значение. Таким образом, нужно найти значения частоты при шаге 2 кГц при которой показания A_3 начнут увеличиваться. Затем вернуться на предыдущую частоту и постепенно увеличивая частоту на 100 Гц найти минимальное значение тока A_3 и записать эту точку в файл **MS Excel**.

5. Вызовите и настройте инструмент **Осциллограмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжения **V1** и токов **A1, A2, A3** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной.

6. Вызовите и настройте инструмент **Векторная диаграмма** (вызов и настройка проводится аналогично 1 эксперимента лабораторной работы 2) для наблюдения напряжения **V1** и токов **A1, A2, A3** и сохраните 3 картинки для частот: ниже резонансной, на резонансной, выше резонансной. По данным о фазах напряжения и тока рассчитайте угол между векторами напряжения и тока цепи в точке резонанса. Амплитуды и фазы векторов (A, φ) выведены рядом с полями определения векторов в окне **Векторная диаграмма**. Убедитесь в том, что угол между векторами тока (**A1**) и тока (**A2**) в точке резонанса близок к 180° .

7. Повторите сделанные измерения и вычисления (п.п.3-6) для всех вариантов, заданных преподавателем. При этом проверяйте запись данных измерительных приборов в файл **MS Excel**. Данные этого файла будут необходимы при подготовке отчета о лабораторной работе.

8. Нажмите **Стоп**.

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

Обработка экспериментальных данных

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

Для 1 эксперимента необходимо:

1. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$,

$$\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%, P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \text{ Результаты расчетов занести в таблицу 2.5.}$$

Таблица 2.5

N	Установить				Измерить				Рассчитать					
	f	R	L	~Err	V1	V2	A1	$\varphi_u - \varphi_i$	Z(эксп.)	X _L (уст.)	Z(уст.)	Погрешность	cosφ	P
	[кГц]	[Ом]	[мкФ]	[В]	[В]	[В]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	[Вт]
1														
2														
3														

Для 2 эксперимента необходимо:

2. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$,

$$\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%, P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \text{ Результаты расчетов занести в таблицу 2.6.}$$

Таблица 2.6

N	Установить				Измерить				Рассчитать					
	f	R	C	~Err	V1	V2	A1	$\varphi_u - \varphi_i$	Z(эксп.)	X _C (уст.)	Z(уст.)	Погрешность	cosφ	P
	[кГц]	[Ом]	[мкФ]	[В]	[В]	[В]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	[Вт]
1														
2														
3														

Для 3 эксперимента необходимо:

3. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$, $\cos$, $Z_{\text{эксп}} = \frac{U}{I}$, $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$, $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$,

$$Z_{\text{уст}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%, Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}, \text{ а также резонансный ток } I_p = \frac{U}{R} \text{ и частоту } f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \text{ Результаты расчетов занести в таблицу 2.7.}$$

4. По полученным данным (таблица 2.7) постройте амплитудно-частотную характеристику для тока в цепи. Сравните расчетные значения резонансной частоты с полученной в ходе эксперимента.

Таблица 2.7

N	Установить					Измерить					Рассчитать								
	f	R	L	C	~Err	V1	V2	V3	A1	$\varphi_u - \varphi_i$	Z	X _c	X _L	Z	Погрешность Z	cosφ	f	I	Q
	[кГц]	[Ом]	[мГн]	[мкФ]	[В]	[В]	[В]	[В]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	Гц	[мА]	-
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			

Для 4 эксперимента необходимо:

5. По полученным в эксперименте данным рассчитайте следующие величины: $\varphi = \varphi_{A1} - \varphi_{A2}$, $\cos$, $Z = \frac{U}{I_{\text{эксп}}}$, $X = \frac{U}{I_{\text{уст}}}$, $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, $Z_{\text{уст}} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}\right)^2}}$, $\sigma = \frac{Z_{\text{уст}} - Z_{\text{эксп}}}{Z_{\text{уст}}} \cdot 100\%$, $Q = R \cdot \sqrt{C/L}$, а также резонансный ток $I_p = \frac{U}{R}$ и частоту $f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$. Результаты расчетов

занести в таблицу 2.8.

Таблица 2.8

N	Установить					Измерить					Рассчитать								
	f	R	L	C	~Err	V1	A1	A2	A3	$\varphi_{A1} - \varphi_{A2}$	Z	X _c	X _L	Z	Погрешность Z	cosφ	f	I	Q
	[кГц]	[Ом]	[мГн]	[мкФ]	[В]	[В]	[мА]	[мА]	[мА]	градус	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[%]	-	Гц	[мА]	-
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			

6. По полученным данным (таблица 2.8) постройте амплитудно-частотную характеристику для общего тока в цепи. Сравните расчетные значения резонансной частоты с полученной в ходе эксперимента.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Аналогично лабораторной работы 1.

Вопросы для защиты работы:

1. Почему построение векторной диаграммы для цепей переменного тока с последовательным соединением приемников рекомендуется начинать с вектора тока?
2. Что такое сдвиг фаз между током и напряжением? Чему равна разность фаз между током и напряжением на индуктивном, емкостном и резистивном элементах? Нарисуйте векторные диаграммы.
3. Запишите закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением R , L и C ?
4. Дайте определение цепи синусоидального тока. Какими величинами определяется синусоидально изменяющаяся функция?
5. Что понимается под действующими значениями синусоидального тока?
6. Какой режим работы цепи синусоидального тока носит название «резонанса токов»? Условие возникновения резонанса в параллельной цепи. Нарисуйте векторные диаграммы режима резонанса токов.
7. Какой режим работы синусоидального тока носит название «резонанса напряжения»? Условие возникновения резонанса.
8. Напишите формулы для определения резонансной угловой частоты параллельного и последовательного контуров?
9. Что означают понятия добротности контура?
10. Изменения каких параметров от частоты носят название «частотные характеристики» и «резонансные кривые»?
11. Каковы величины действующего значения тока в условиях возникновения резонанса напряжений и резонанса токов по отношению к режиму до резонанса?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Трёхфазные цепи. Исследование цепи трёхфазного тока при различных схемах соединения нагрузки (4 ч)

Цель работы: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8. В связи с этим выполняются следующие задачи:

1. Измерение напряжений и токов в цепях трёхфазной 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 трёхфазной сети при подключении потребителя по схеме «треугольник». Рассматриваются различные варианты для симметричных и несимметричных подключений при обрыве в цепи одного из линейных токов.

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 трёхфазной. Графики мгновенных значений *трёхфазной 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.

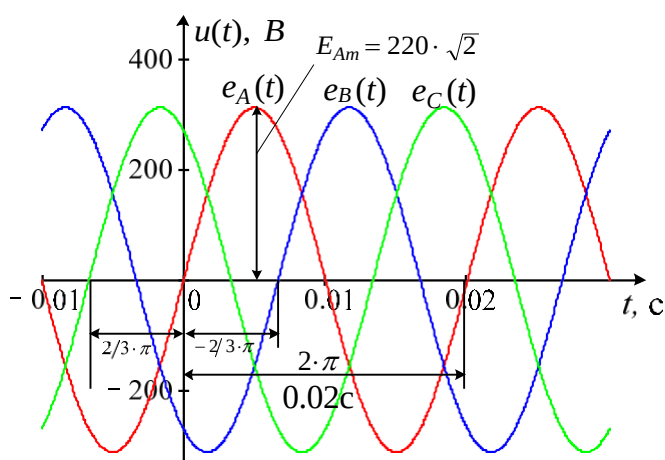


Рисунок 3.1 – Графики мгновенных значений трёхфазной симметричной системы ЭДС

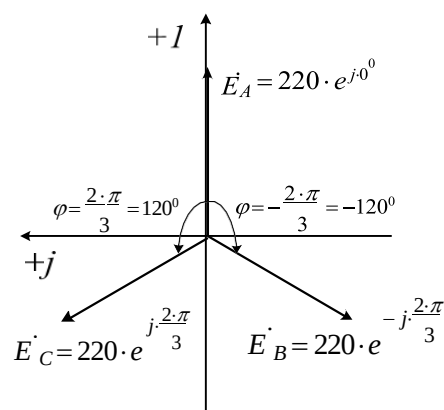


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма трёхфазной симметричной системы ЭДС

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 .

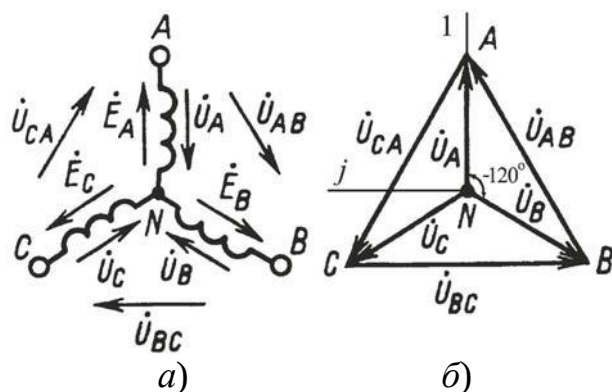


Рисунок 3.3 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора звездой (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

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)

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

Между линейными и фазными напряжениями для симметричного источника существует зависимость:

$$U_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\phi. \quad (3.4)$$

При соединении обмоток генератора треугольником (рисунок 3.4) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. Геометрическая сумма ЭДС в замкнутом треугольнике равна нулю. Поэтому если к зажимам A, B, C не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

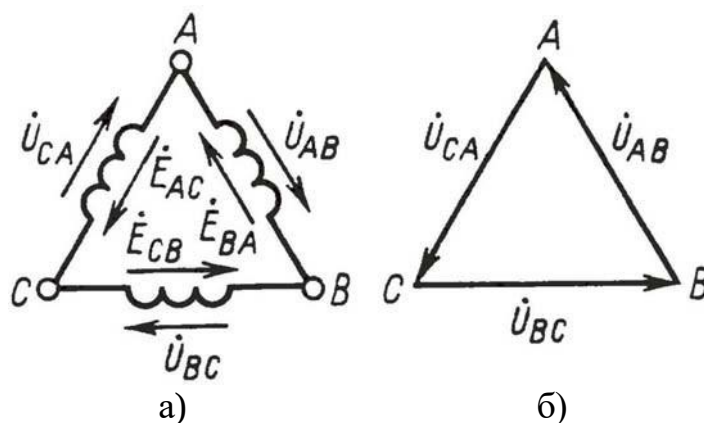


Рисунок 3.4 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора треугольником (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

При соединении обмоток трехфазного источника треугольником (рисунок 3.4 а) линейные напряжения равны фазным (рисунок 3.4 б)

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (3.5)$$

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

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

Расчет трехфазных цепей синусоидального тока с симметричной несимметричной нагрузкой.

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

Симметричный режим. Для симметричного приемника, соединенного звездой (рисунок 3.5 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$, напряжение смещения нейтрали U'_{nN} равно нулю, а токи в фазах

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

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):

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

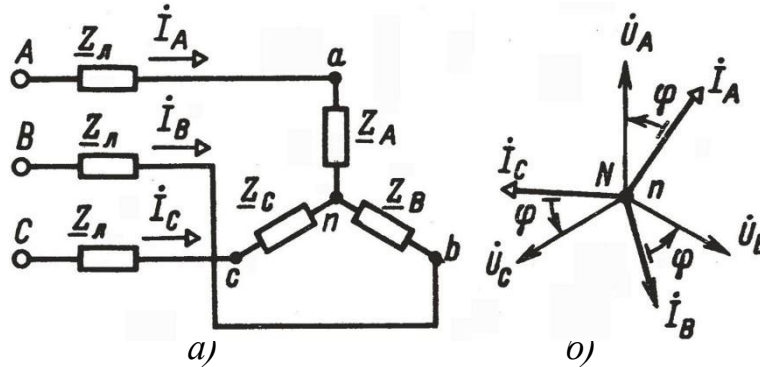


Рисунок 3.5 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

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:

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

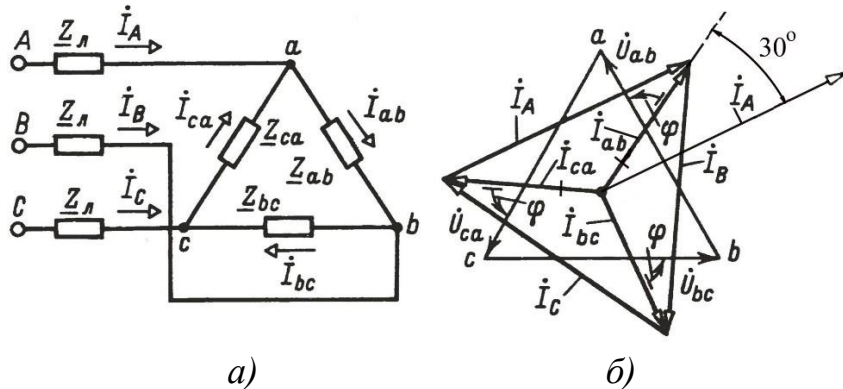


Рисунок 3.6 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

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:

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

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 3.6 б),

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

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

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

Фазные токи определяются через линейные:

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

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

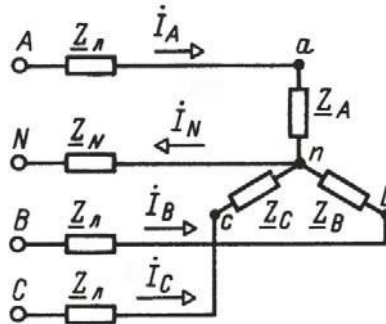


Рисунок 3.7 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов

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

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

Линейные токи и ток в нейтральном проводе

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

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:

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

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

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:

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

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

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

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

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

Измерение мощности. Для измерения активной мощности, передаваемой от источника к приемнику, в трехфазной цепи с нейтральным проводом при несимметричном режиме включают ваттметры в каждую фазу (рисунок 3.8).

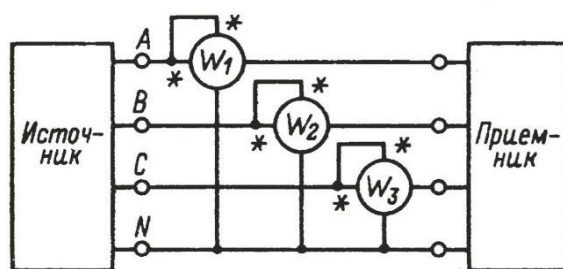


Рисунок 3.8 – Схема для измерения мощности трехфазной цепи с нейтральным проводом

Активная мощность равна сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}. \quad (3.24)$$

В случае симметричного режима достаточно одного ваттметра, при этом мощность

$$P = 3 \cdot P_W. \quad (3.25)$$

При отсутствии нейтрального провода активную мощность измеряют двумя ваттметрами, включенными по схеме, показанной на рисунке 3.9 а (и при симметричном, и при несимметричном режимах). Активная мощность равна алгебраической сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2}. \quad (3.26)$$

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

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_{W1} + P_{W2}). \quad (3.27)$$

При симметричном режиме реактивную мощность можно измерить одним ваттметром, включенным по схеме рисунок 3.9 в. В этом случае

$$Q = \sqrt{3} \cdot P_W. \quad (3.28)$$

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

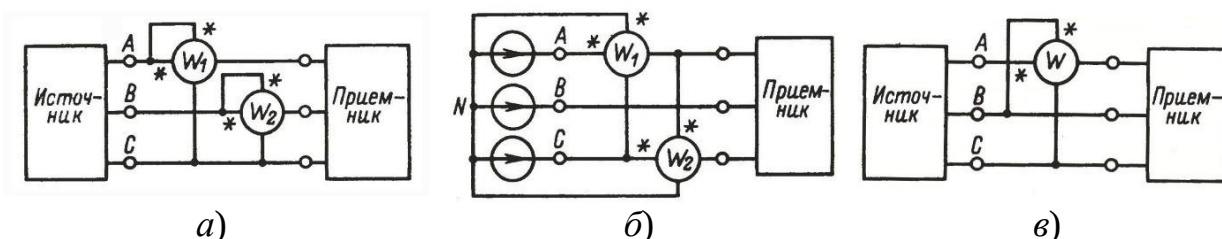


Рисунок 3.9 – Схемы для измерения трехфазной активной мощности в цепи без нейтрального провода (а) и реактивной мощности при несимметричной (б) и симметричной нагрузке (в)

Аппаратура, 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).

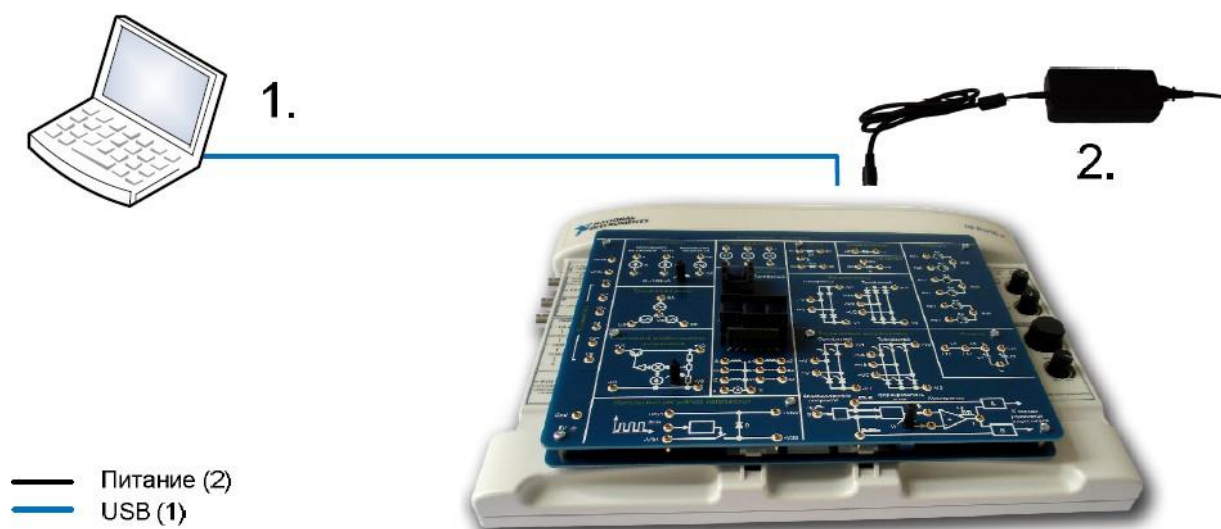


Рисунок 3.10 –Лабораторный стенд с макетной платой «Силовая электроника» подключаемый к ПЭВМ: 1 – персональный компьютер (ПЭВМ); 2 – Блок питания обеспечивающий электропитание NI ELVIS II и макетной платы

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.

Методика и порядок выполнения работы

Описание макетной платы лабораторного стенда.

На плате установлены электронные компоненты и контактные площадки измерительных приборов, но нет заранее собранных электрических схем (рисунок 3.11).

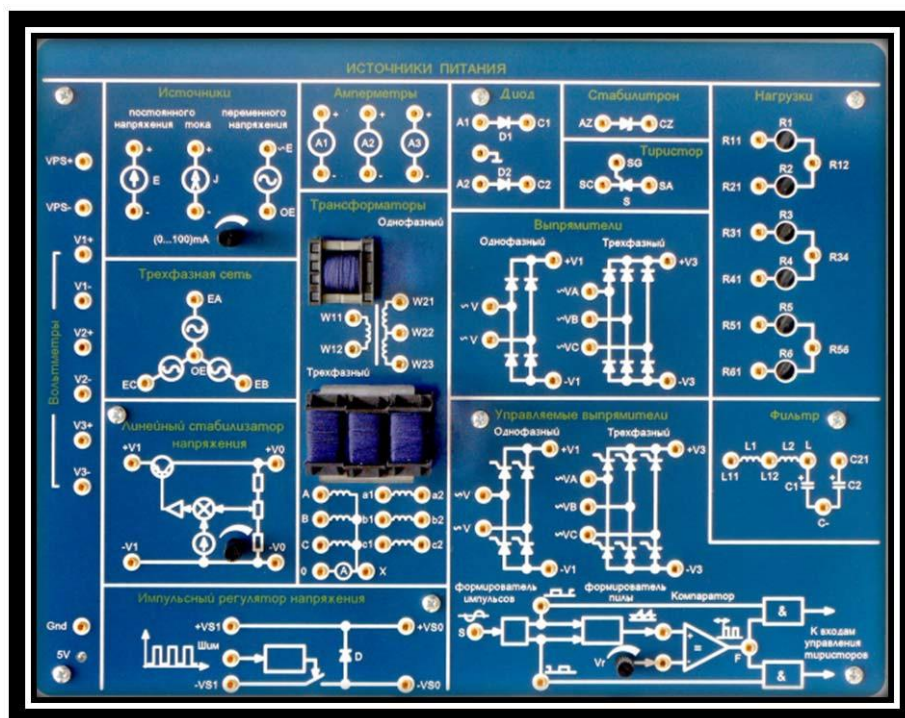


Рисунок 3.11 – Макетная плата «Силовая электроника»

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

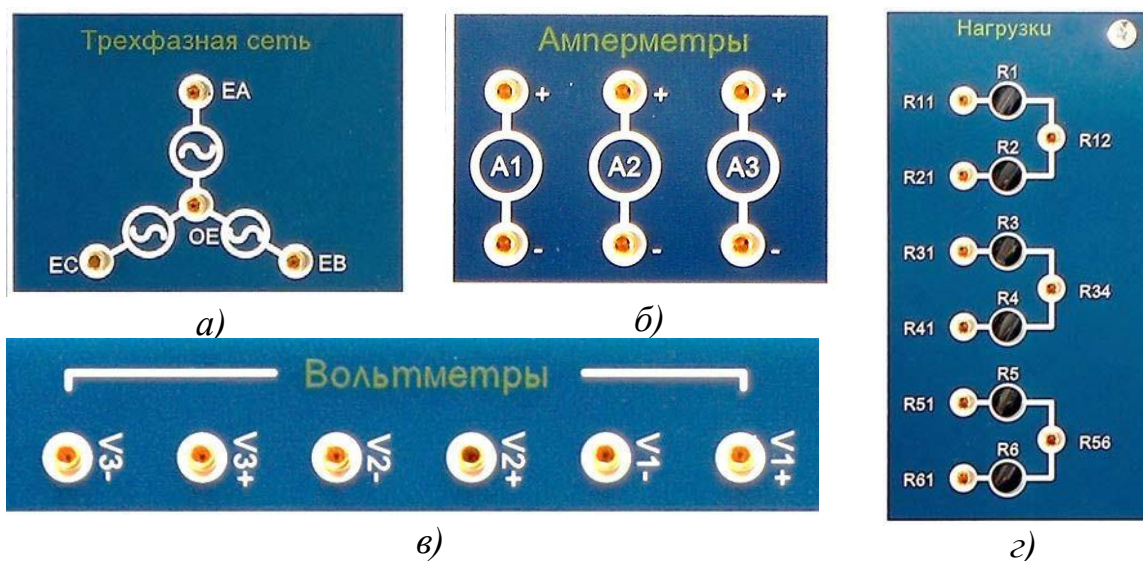


Рисунок 3.12 – Зоны на макетной плате: а) зона трехфазной сети; б) зона амперметров; в) зона вольтметров; г) зона нагрузочных резисторов

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

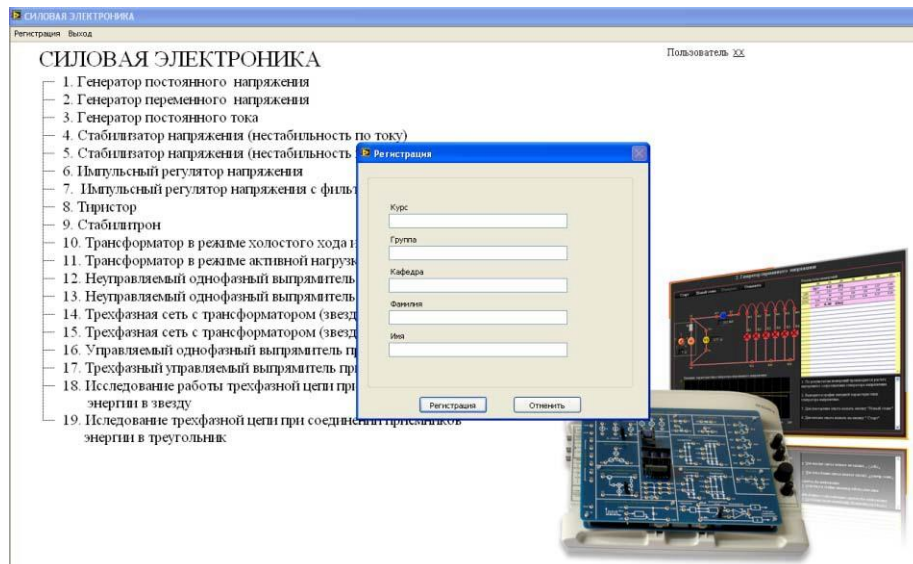


Рисунок 3.14 – Окно регистрации

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**, 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 окна данного эксперимента, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

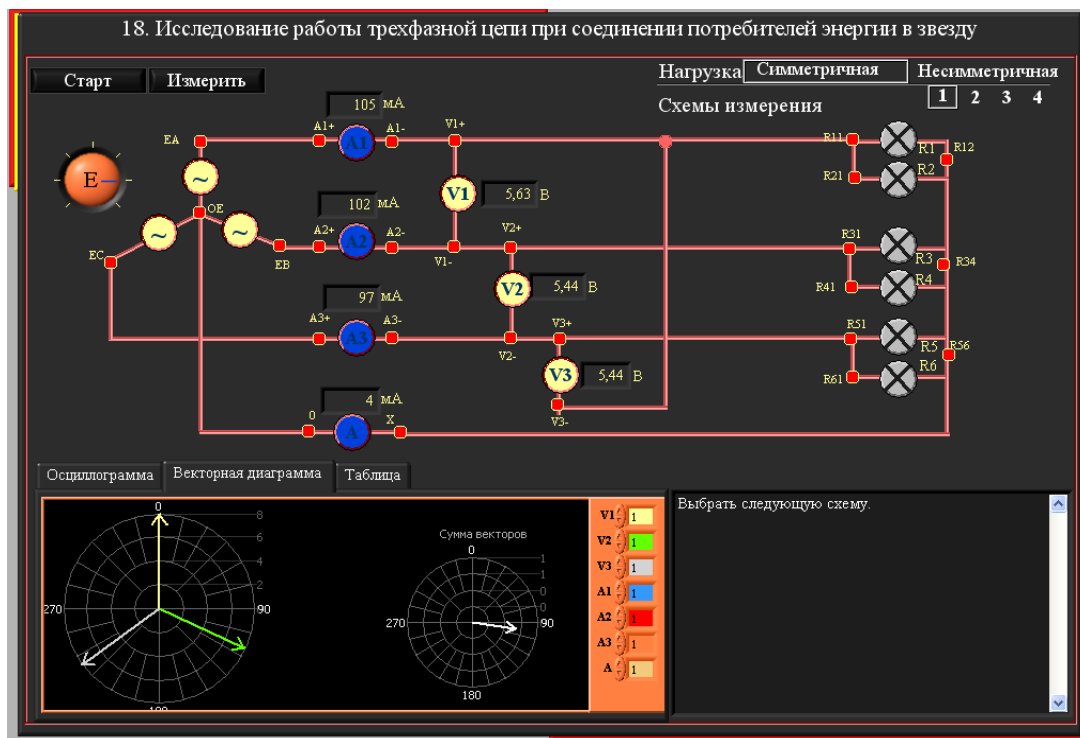


Рисунок 3.15 – Окно эксперимента измерения №1 симметричного режима

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 A) и вольтметры (обозначаются символом V). При наведении курсора мыши на соответствующий индикатор на экране появляется изображение соответствующей стрелочной панели с показаниями прибора. Кроме показаний стрелочных приборов, также существует возможность вывода на экран осциллограмм соответствующих величин. Это возможно на измерительных приборах у которых изначально более темный цвет. При щелчке мышью по измерительному прибору темного цвета в процессе выполнения лабораторной работы (после нажатия кнопки старт), его цвет изменяется на светлый, а на лицевой панели появляется осциллограмма с соответствующими показаниями. При последующем щелчке мышью по измерительному прибору светлого цвета состояние лицевой панели возвращается в исходное положение.

В лабораторной работе имеется круговой регулятор, при помощи которого можно выставить напряжение исследуемой трехфазной сети.

Окна осциллограмм и векторных диаграмм имеют поля для выбора масштаба.

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 3.15, приведенным на экране для схемы измерения №1 симметричного режима.

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении потребителей энергии в звезду».

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

2. Выставьте круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине заданной преподавателем.

3. Нажмите кнопку **Измерить**, при этом формируются необходимые входные сигналы для подачи на входы электрической схемы, после чего проводятся соответствующие измерения в определенных точках схемы.

4. Для отображения значений измерительных приборов необходимо нажать на их изображение на лицевой панели эксперимента. Для схемы измерения №1 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.15.

5. Выбрать из **Меню** на лицевой панели элемент **Сохранить**, предназначенный для сохранения результатов эксперимента (включая образ лицевой панели и регистрационные данные студента, дату и время). В этом случае на основании регистрационных данных и наименования проведенной лабораторной работы формируется название файла, который сохраняется в папке *My Documents\Power Electronics*.

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

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

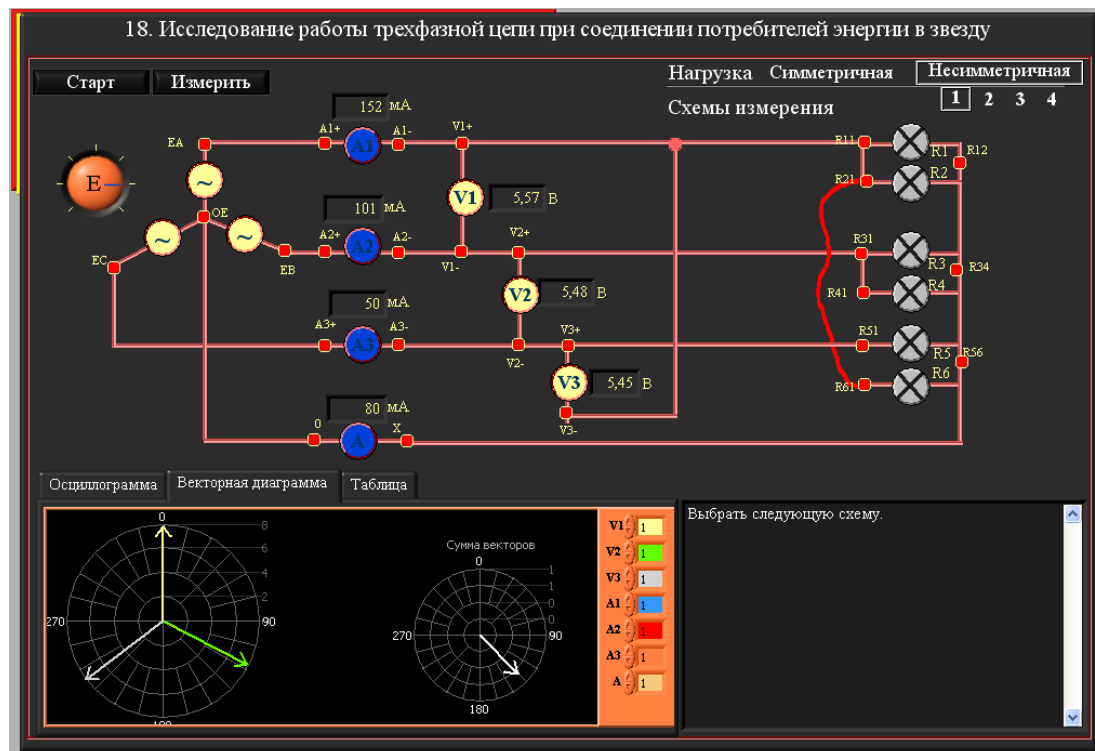


Рисунок 3.16 – Окно эксперимента схемы измерения №1 несимметричного режима

8. Измените схему на плате в соответствии с рисунком 3.16.

Внимание! Любые электрические соединения должны производиться при отключенном питании платы (выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы).

9. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

10. Установите круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине, заданной преподавателем.

11. После завершения монтажа включите питание платы и следуйте инструкциям на экране в правом нижнем углу лицевой панели.

12. Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

13. Выберите схему измерения №2 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.17. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

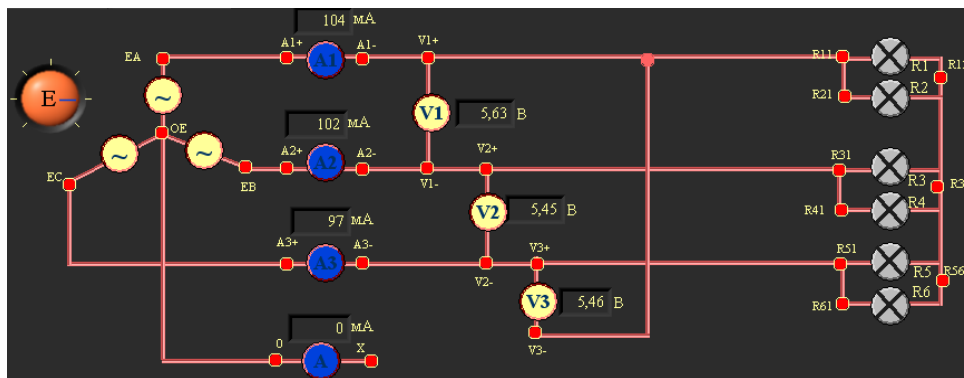


Рисунок 3.17

14. Выберите схему измерения №2 несимметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.18. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

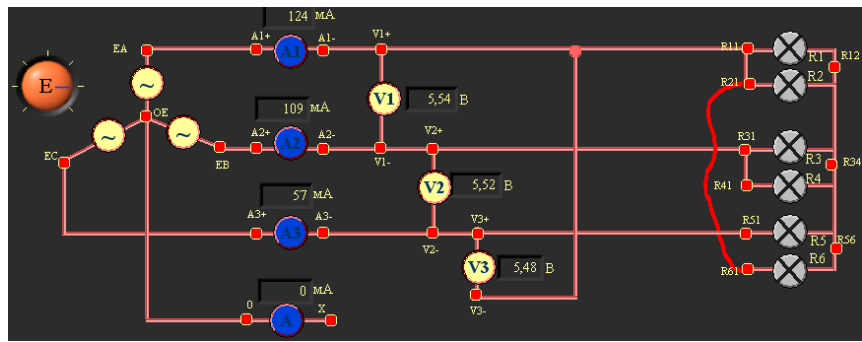


Рисунок 3.18

15. Выберите схему измерения №3 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.19. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

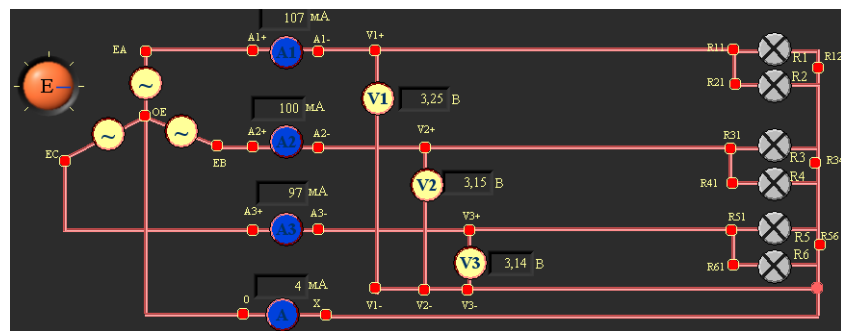


Рисунок 3.19

16. Выберите схему измерения №3 несимметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.20. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

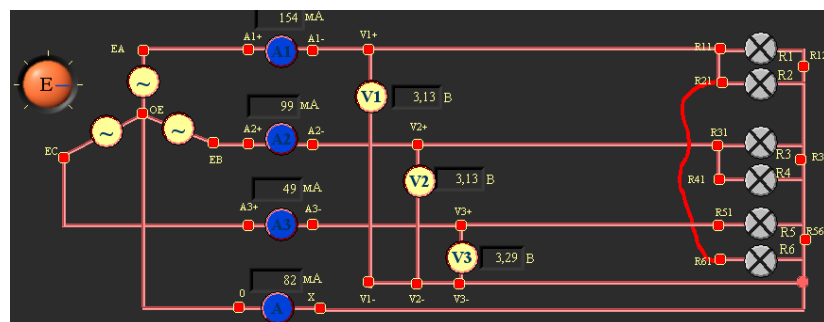


Рисунок 3.20

17. Выберите схему измерения №4 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.21. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

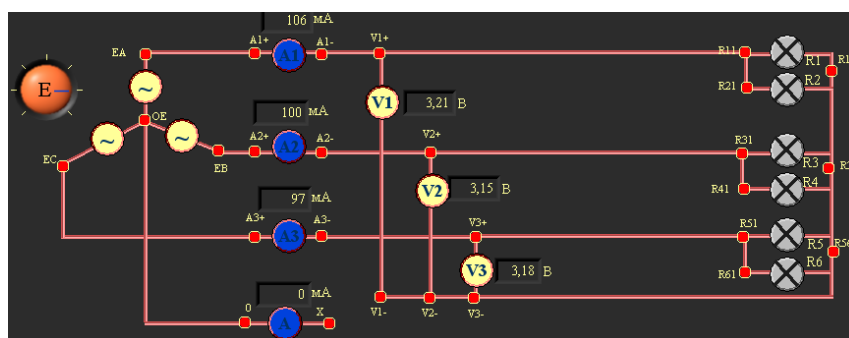


Рисунок 3.21

18. Выберите схему измерения №4 несимметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.22. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-6.

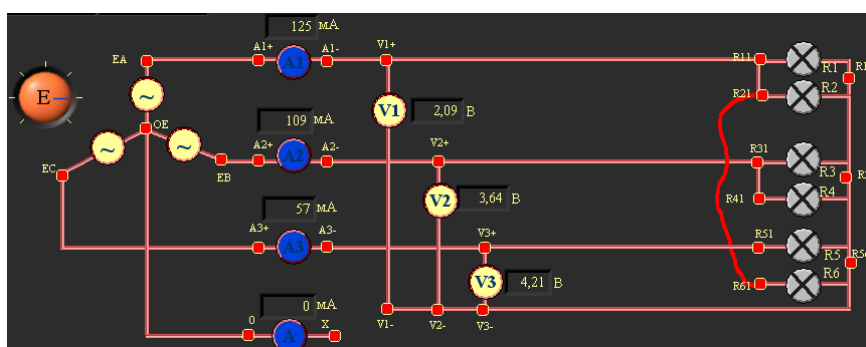


Рисунок 3.22

2 эксперимент: «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник». Приборы и компоненты:

1. Трехфазная сеть;
2. Нагрузки;
- 3 Амперметры (A1, A2, A3);
4. Вольтметр (V1, V2, V3).

Подготовка к проведению эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник».

1. Убедитесь, что рабочая станция **NI ELVIS II** включена (выключатель питания станции находится в положении **I**, см. Рисунок 1.11).
2. Установите переключатель **PROTOTYPING BOARD POWER** (рисунок 1.12) на рабочей станции **NI ELVIS II** в положение **O** (выключен).
3. Из главного меню (рисунок 3.14) двойным щелчком выберите эксперимент «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник». На рисунке 3.23 показан пример окно данного эксперимента.

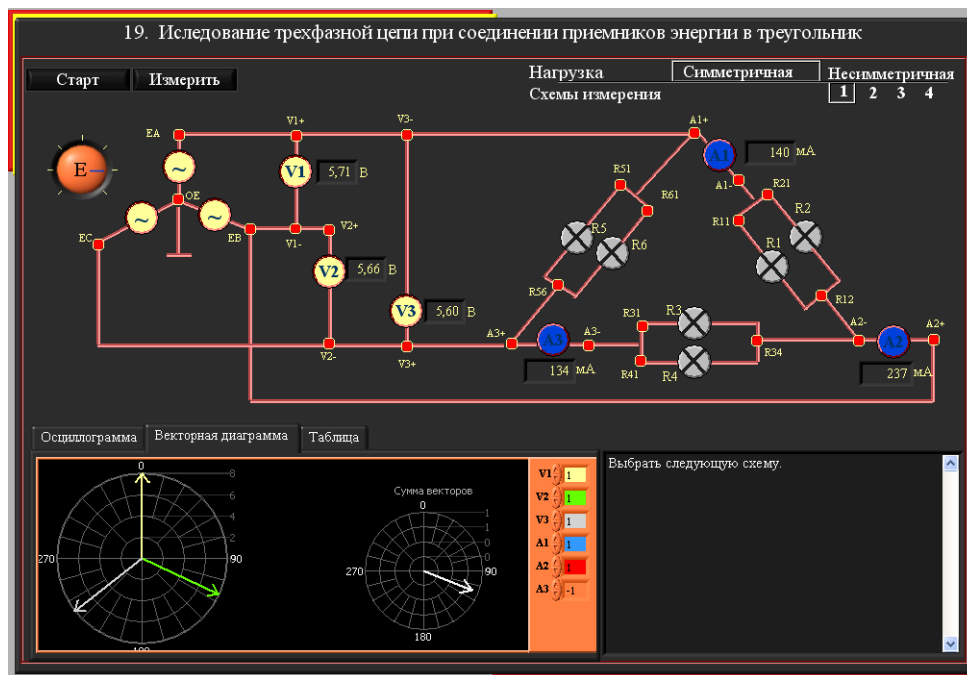


Рисунок 3.23 – Окно эксперимента измерения №1 симметричного режима

4. При помощи соединительных проводов произведите подключения на плате в соответствии с рисунком 3.23, приведенным на экране для схемы измерения №1 симметричного режима.

5. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Исследование работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии в треугольник».

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

2. Выставьте круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине заданной преподавателем.

3. Нажмите кнопку **Измерить**. Для отображения значений измерительных приборов, необходимо нажать на их изображение на лицевой панели эксперимента. Для схемы измерения №1 симметричного режима окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.23.

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

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

6. Выберите схему измерения №1 несимметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.24.

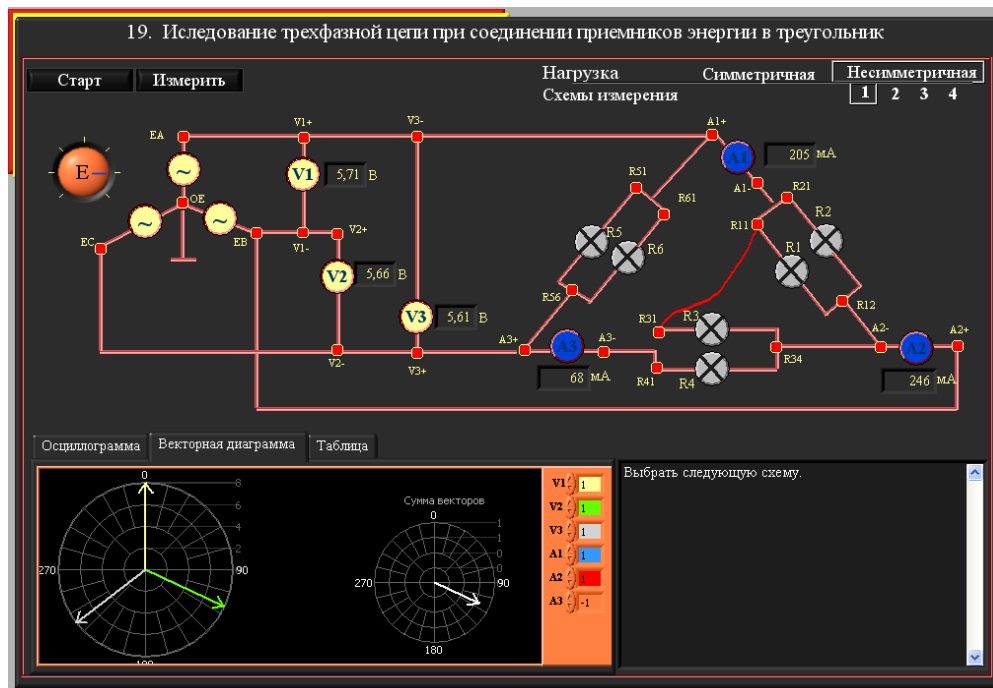


Рисунок 3.24 – Окно эксперимента схемы измерения №1 несимметричного режима

7. Измените схему на плате в соответствии с рисунком 3.24.

Внимание! Любые электрические соединения должны производиться при отключенном питании платы (выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы).

8. Представьте собранную схему для проверки преподавателю.

9. Установите круговой регулятор напряжения трехфазной сети на величине, заданной преподавателем.

10. После завершения монтажа включите питание платы и следуйте инструкциям на экране, в правом нижнем углу лицевой панели.

12. Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

13. Выберите схему измерения №2 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.25. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

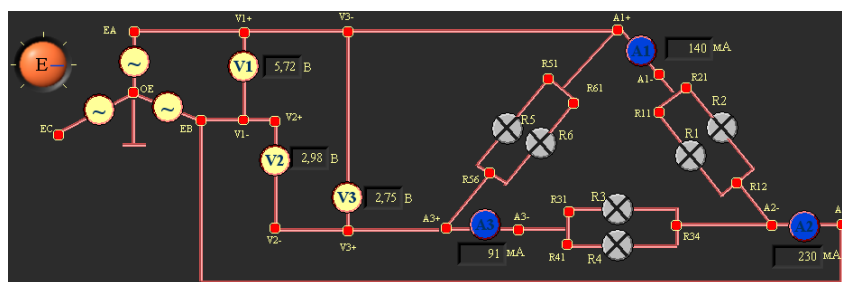


Рисунок 3.25

14. Выберите схему измерения №2 несимметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.26. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

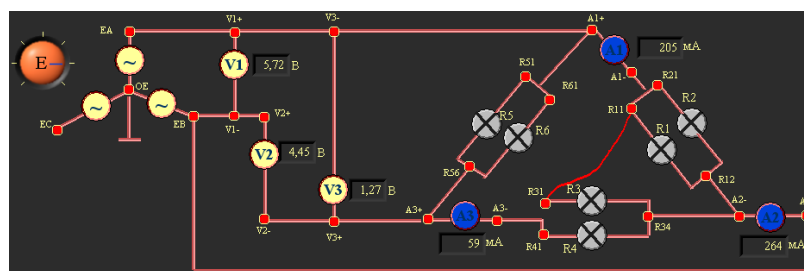


Рисунок 3.26

15. Выберите схему измерения №3 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.27. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

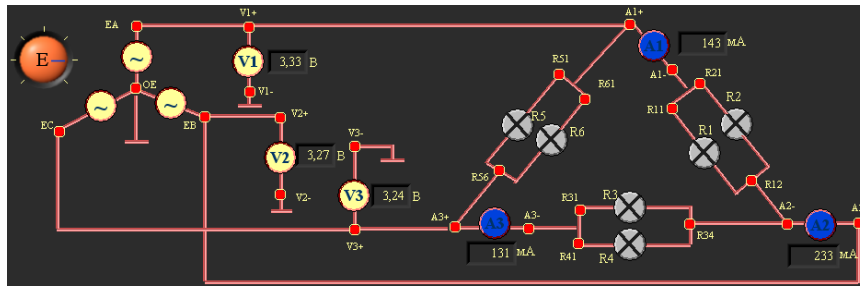


Рисунок 3.27

16. Выберите схему измерения №3 несимметричного режима, окно эксперимента должно принять вид как на рисунке 3.28. Измените на плате схему, проверив, что питание платы отключено (**выключатель питания платы (1) на рисунке 1.12 должен находиться в положении «выключено», не горит красный светодиод в левом нижнем углу платы**). Повторите действия, указанные в пунктах 3-5.

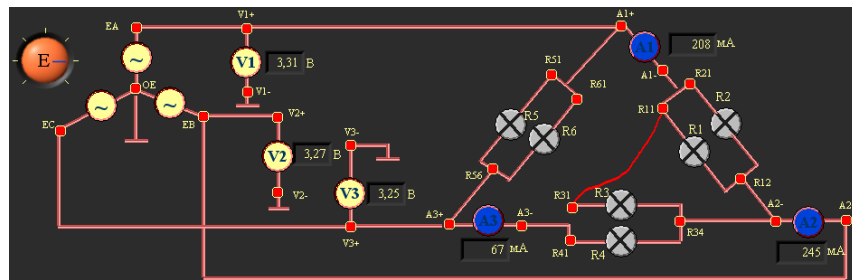


Рисунок 3.28

17. Выберите схему измерения №4 симметричного режима, окно эксперимента должно принять вид 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 действия, указанные в пунктах 3-5.

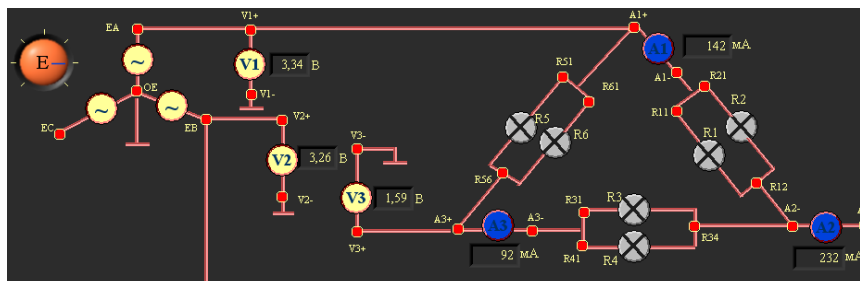


Рисунок 3.29

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 (**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.

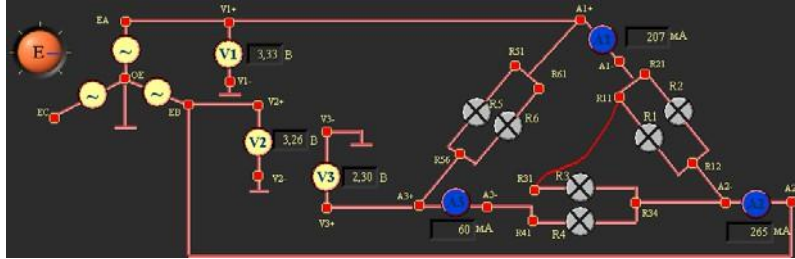


Рисунок 3.30

Обработка экспериментальных данных

Для 1 эксперимента:

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, а также активную мощность каждой фазы. Результаты расчетов 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:

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, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Аналогично лабораторной работы 1.

Вопросы для защиты работы:

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».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (4 ч)

Цель работы: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8. В связи с этим выполняются следующие задачи:

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

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).

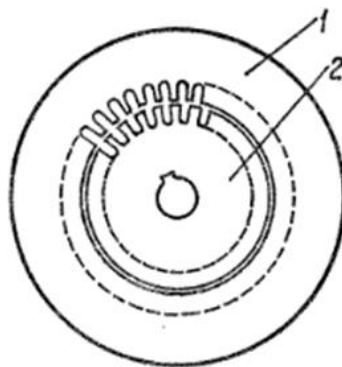


Рисунок 4.1 – Схема асинхронной машины

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 ободу 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).

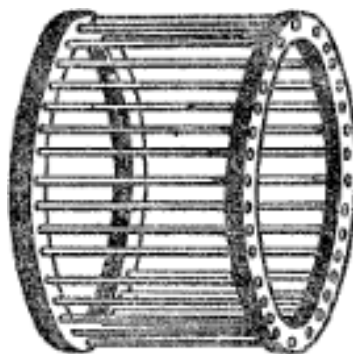


Рисунок 4.2 – Обмотка ротора в виде беличьей клетки

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 стрежень 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).

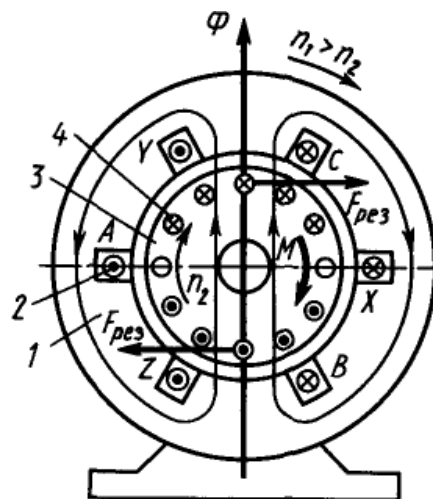


Рисунок 4.3 – Электромагнитная схема асинхронной машины

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 $n = 0$

$$n_2 = \frac{f_2}{2p} = \frac{f_1}{p} = n_1 \quad (4.2)$$

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 $M_{\text{СТ}} = f(n)$ некоторого производственного механизма, приводимого во вращение двигателем.

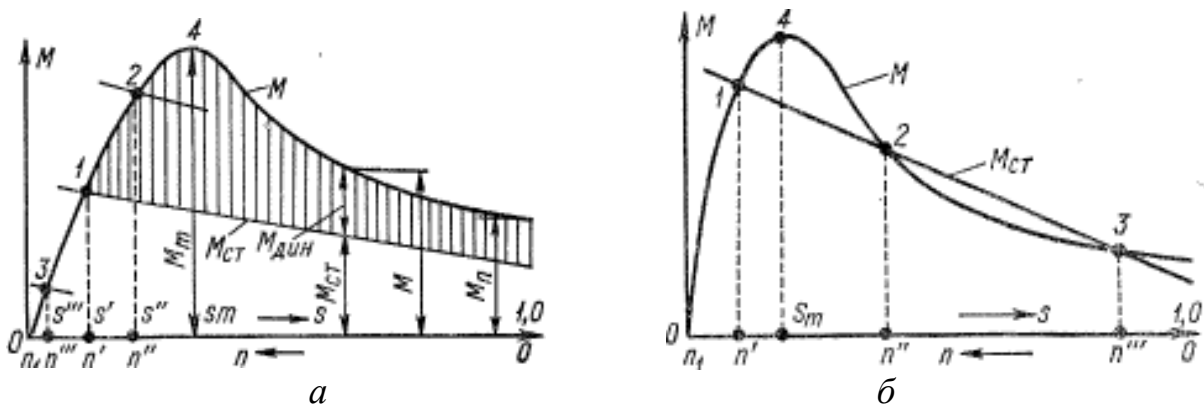


Рисунок 4.4 – Механические характеристики асинхронного двигателя

Уравнение моментов агрегата «двигатель – производственный механизм» имеет вид

$$M = M_{\text{СТ}} + M_{\text{дин}}, \quad (4.7)$$

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

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

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 ($M_{\text{п}} > M_{\text{ст}}$), то $M_{\text{дин}} > 0$, $dn/dt > 0$ и ротор двигателя придет во вращение. Ускорение ротора происходит до тех пор, пока (заштрихованная область на рисунке 4.4 а)

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

В точке 1 достигается равновесие моментов $M = M_{\text{ст}}$, $M_{\text{дин}} = 0$, $dn/dt = 0$. Наступает установившийся режим работы двигателя под нагрузкой со скоростью вращения n' и скольжением s' . Величина s' будет тем больше, чем больше $M_{\text{ст}}$, 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 $M_{\text{ст}}$ возрастет, то будет $M < M_{\text{ст}}$, $M_{\text{дин}} < 0$, $dn/dt < 0$ 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 $M = M_{\text{ст}}$. При уменьшении нагрузки процесс протекает в обратном направлении.

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

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_{\text{MAX}}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}, \quad (4.10)$$

где

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

где $k_m = M_{\text{MAX}} / M$ – 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).

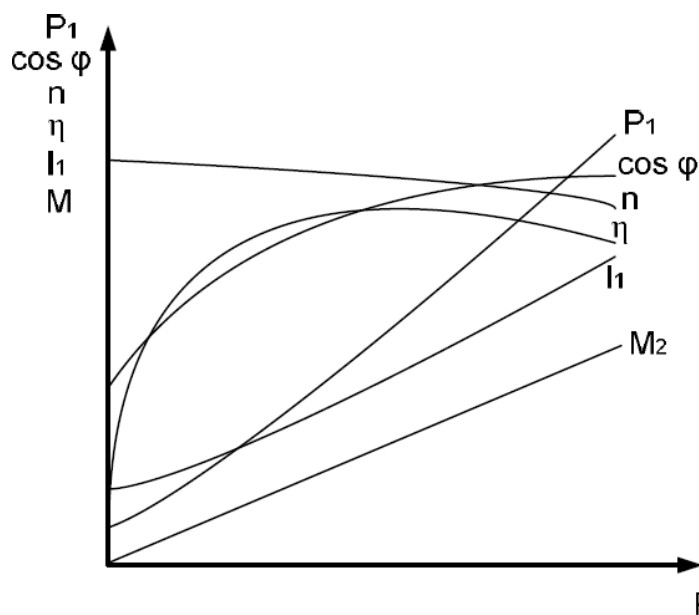


Рисунок 4.9 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

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).

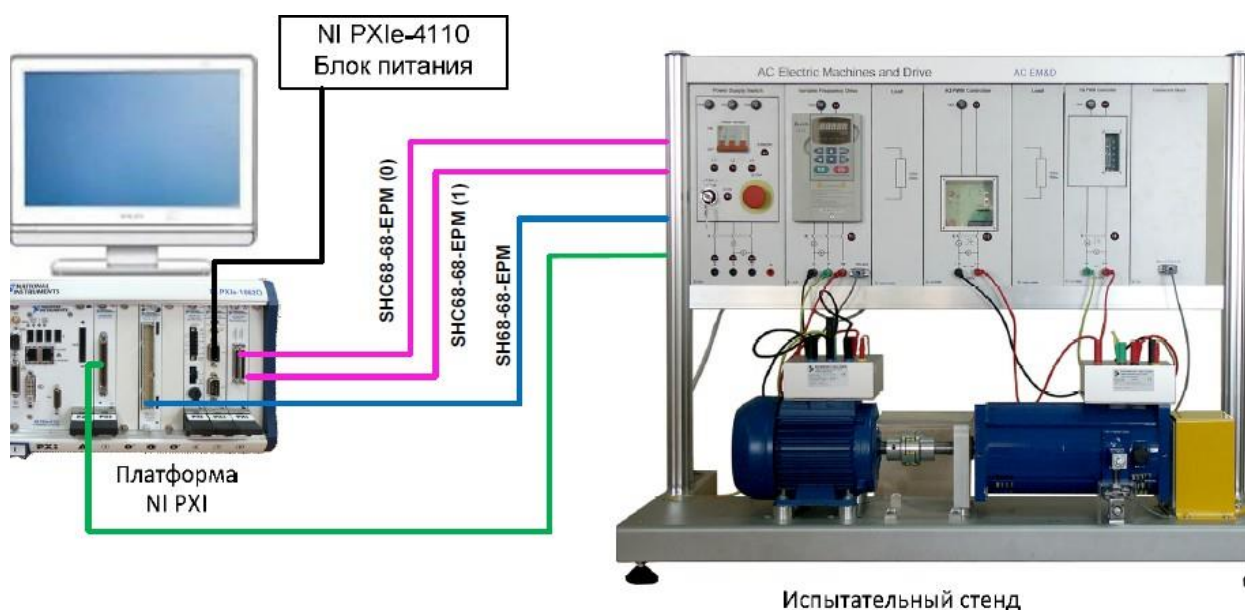


Рисунок 4.10 –Лабораторный стенд Асинхронный двигатель и электропривод, подключаемый к ПЭВМ в сборе

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 отсутствии 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.**

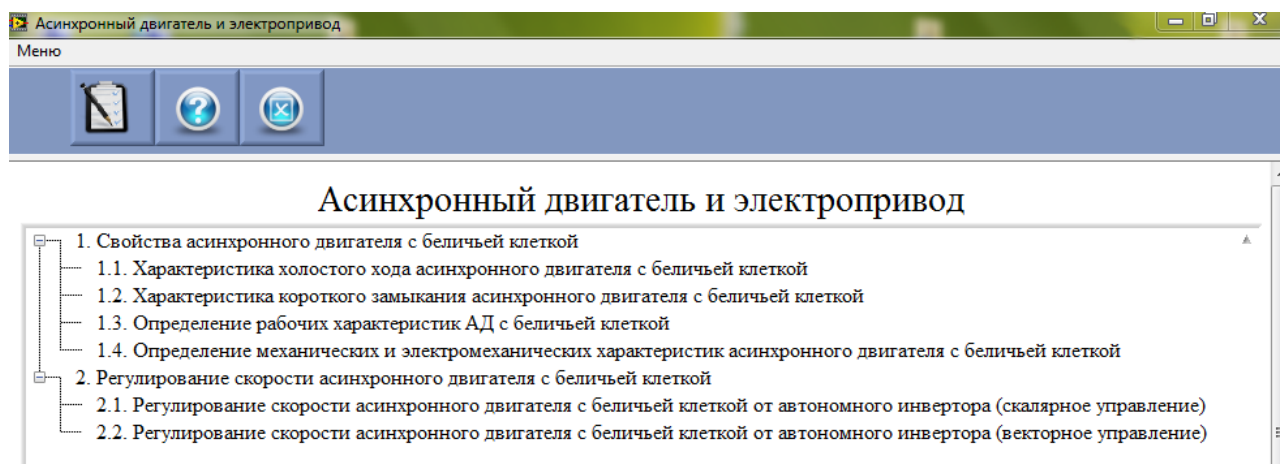


Рисунок 4.11 – Окно главного меню

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

При выборе этого пункта меню откроется окно регистрации:

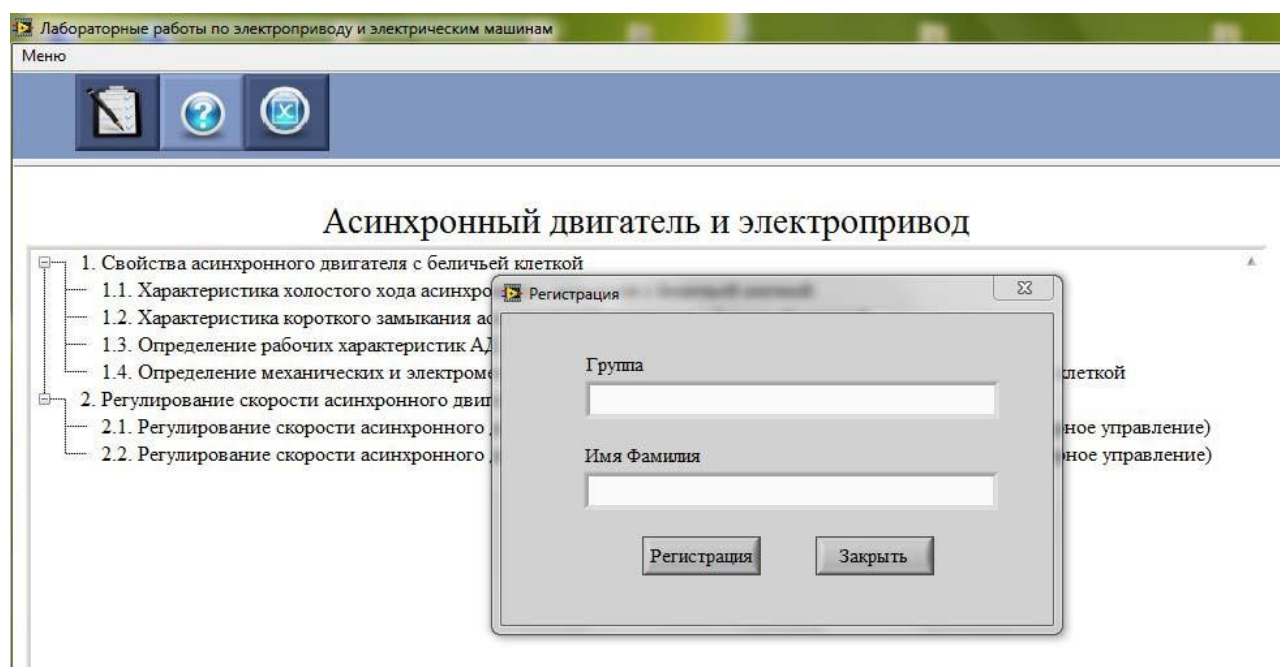


Рисунок 4.12 – Окно регистрации

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 (1К РН); 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.

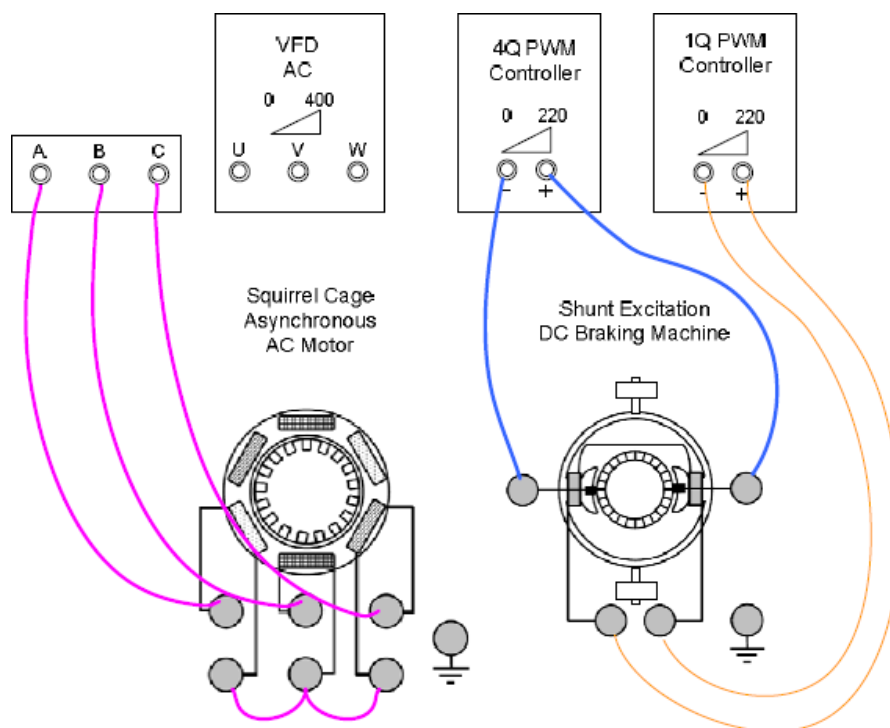


Рисунок 4.13 – Схема электрической цепи эксперимента

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 картинки, полученной по окончании данных замеров, показан на рисунке 4.14.

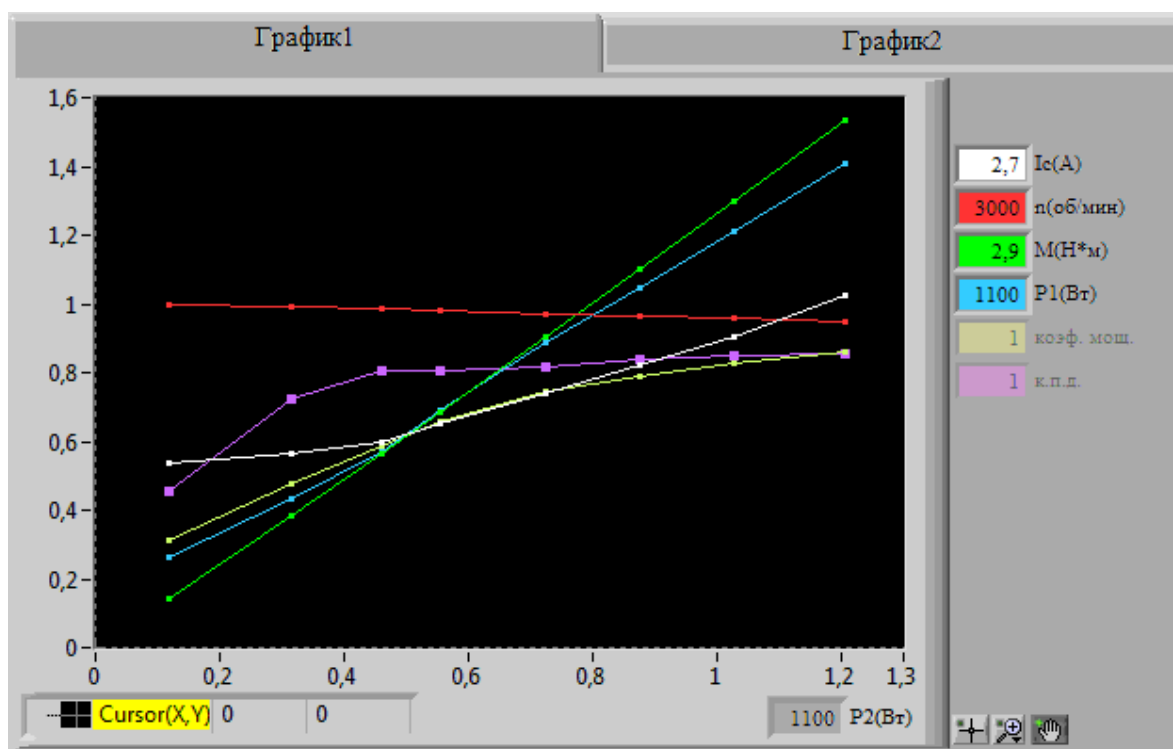


Рисунок 4.14 – Экспериментальный график рабочих характеристик АД

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?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Исследование характеристик диодов, стабилитронов, тиристоров (2 ч)

Цель работы: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8. В связи с этим выполняются следующие задачи:

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.

Теоретическое обоснование

Характеристики диода и их использование для однофазных выпрямителей. Электропитание потребителей электрической энергии, которыми 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.

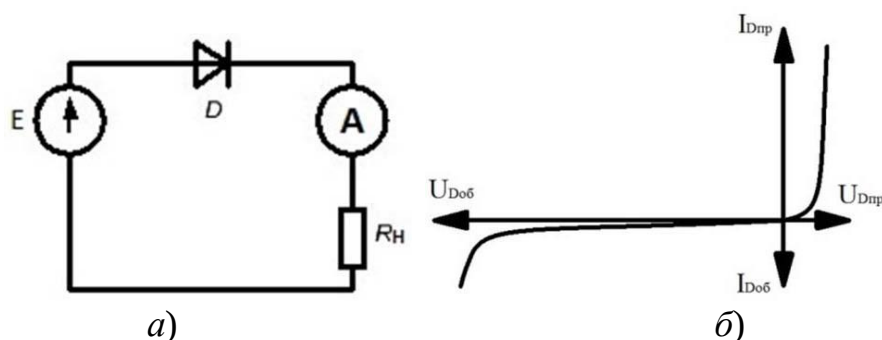


Рисунок 5.1 – Однополупериодный выпрямитель и вольт-амперная характеристика диода

Временная диаграмма выпрямленного напряжения представлена на рисунке 5.2.

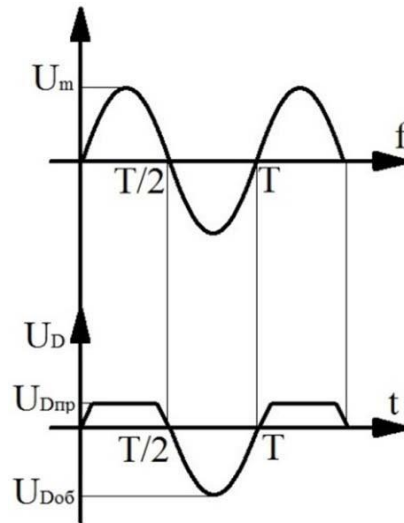


Рисунок 5.2 – Временная диаграмма выпрямленного напряжения

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

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

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

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

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

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

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.

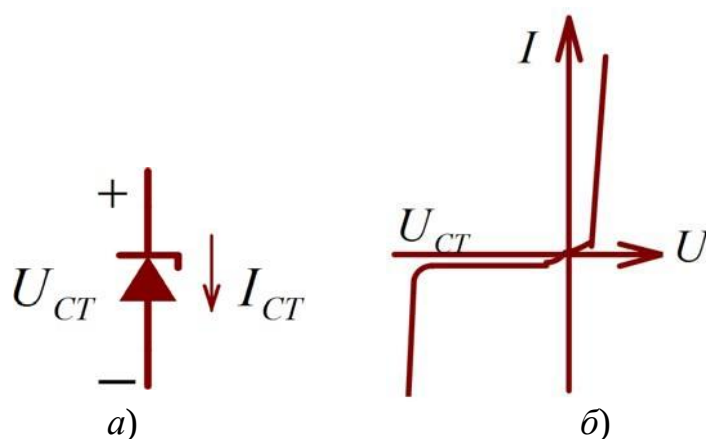


Рисунок 5.3 – Условно графическое обозначение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика

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.

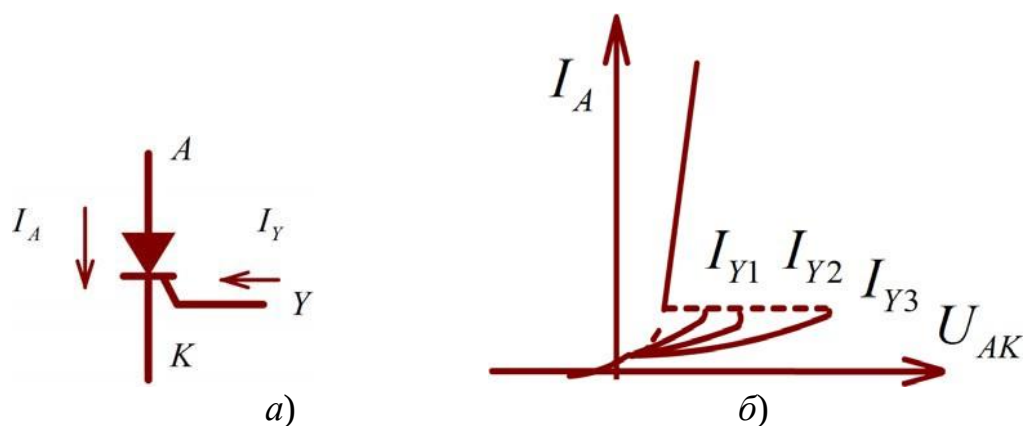


Рисунок 5.4 – Условно графическое обозначение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика

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.

Аппаратура, оборудование и материалы

Аналогично лабораторной работы 3.

Указания по технике безопасности

Аналогично лабораторной работы 1.

Методика и порядок выполнения работы

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**, 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 окна данного эксперимента, в правом нижнем углу открывшейся лицевой панели представлены подробные инструкции по выполнению.

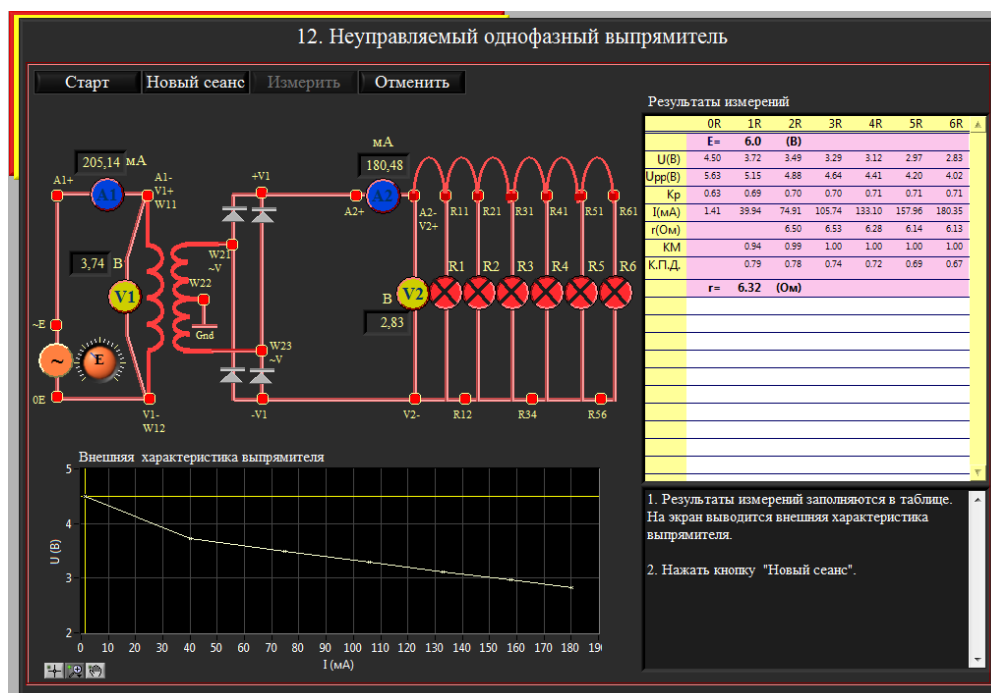


Рисунок 5.6 – Окно эксперимента неуправляемого однофазного выпрямителя

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

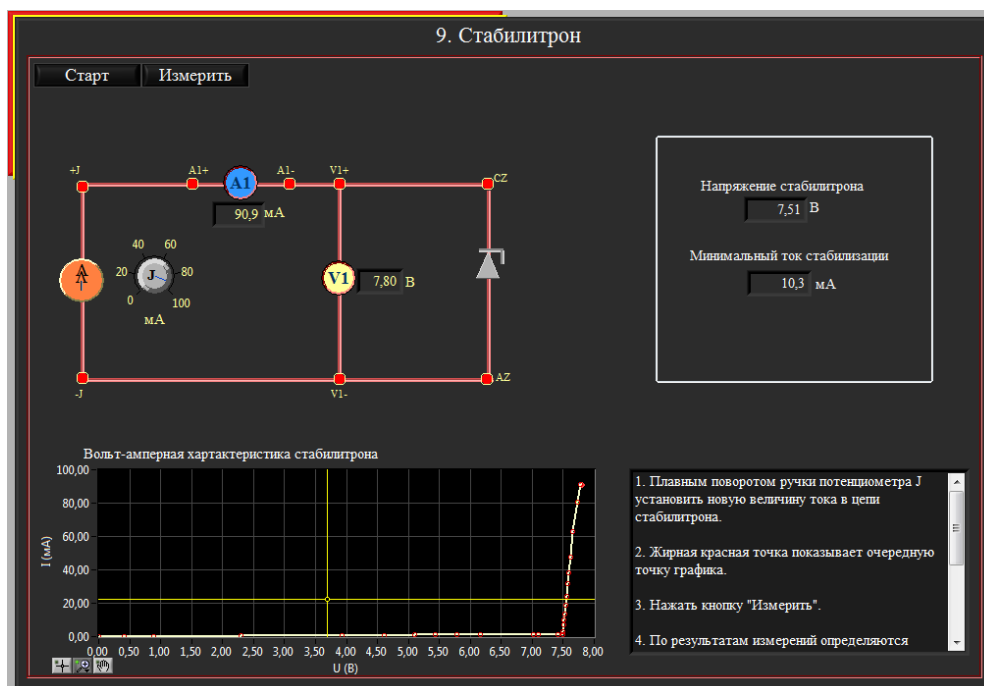


Рисунок 5.7 – Окно эксперимента «Стабилитрон»

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**, 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**, 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.



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).

Пошаговый порядок выполнения эксперимента «Стабилитрон».

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

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, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Аналогично лабораторной работы 1.

Вопросы для защиты работы:

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 РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

3. 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.

4. 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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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»**

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»
для студентов направления подготовки/специальности
15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств
направленность (профиль) «Технология машиностроения»

Ставрополь
2025

Содержание

Практическое занятие 1.....	8
Тема: Анализ режимов цепей постоянного тока с использованием законов Ома и Кирхгофа.....	8
Практическое занятие 2.....	17
Тема: Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока	17
Практическое занятие 3.....	37
Тема: Методы анализа переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях.....	37
Практическое занятие 4.....	45
Тема: Расчет параметров вращающихся электрических машин	45
Практическое занятие 5.....	60
Тема: Расчет параметров системы управления электрическими машинами.....	60
Практическое занятие 6.....	68
Тема: Электромагнитная совместимость электронных приборов	68
Практическое занятие 7.....	75
Тема: Расчет параметров слаботочных усилителей электрических сигналов	75
Практическое занятие 8.....	82
Тема: Основы алгебры логики.....	82
Практическое занятие 9.....	87
Тема: Расчет выпрямителей, стабилизаторов напряжения и тока различного типа	87
Практическое занятие 10.....	100
Тема: Цифровые устройства: дешифраторы, регистры, счетчики	100
Практическое занятие 11.....	104
Тема: Режимы работы триггеров.....	104
Практическое занятие 12.....	110
Тема: АЦП, ЦАП, микропроцессоры и микро ЭВМ	110
Практическое занятие 13.....	118

Тема: Синтез генератора кодов на логических элементах, дешифраторе, мультиплексорах	118
Практическое занятие 14	120
Тема: Синтез генератора кодов на триггерах	120
Практическое занятие 15	123
Тема: Разработка программы на языке на C++.	123
Практическое занятие 16	128
Тема: Компьютерное проектирование и программирование генератора сигналов.	128
Список рекомендуемой литературы	135

Предисловие

Целью дисциплины «Общая электротехника и электроника» является формирование согласно ООП ВО набора компетенций ОПК-6, ОПК-8 будущего бакалавра по направлению 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств. Дисциплина относится к обязательным и предполагает знание студентами следующих дисциплин: «Математика», «Физика», «Информатика». В результате изучения дисциплины у студента формируются указанные выше компетенции, приобретаются знания основных положений теории и практики расчета однофазных и трехфазных электрических цепей, а также знания устройства и принципа работы электрических машин, электрооборудования и систем их управления, основ информационно-измерительной техники и электроники.

Практическое занятие 1

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

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8 8.

1. Теоретическая часть

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

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

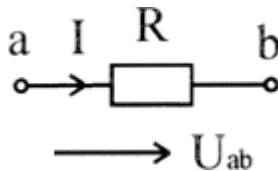


Рисунок 1.1 – Участок цепи

Закон Ома для участка цепи между зажимами b и a (рисунок 1.2) позволяет найти ток I участка по разности потенциалов $U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a$ и сопротивлению R этого участка:

$$I = \frac{U_{ba}}{R} = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{R}. \quad (1.2)$$

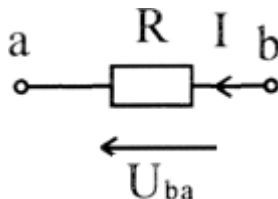


Рисунок 1.2 – Участок цепи

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

Для схем на рисунках 1.3 и 1.4 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 .

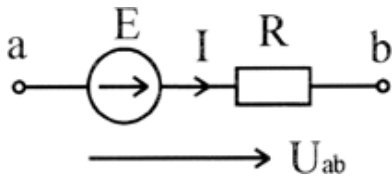


Рисунок 1.3 – Участок цепи, содержащий ЭДС

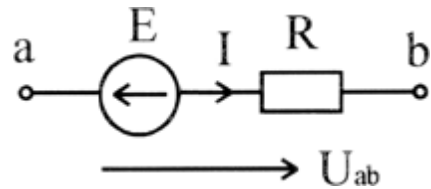


Рисунок 1.4 – Участок цепи содержащий ЭДС

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС (рисунок 1.3):

$$I = \frac{U_{ab} + E}{R}. \quad (1.3)$$

В случае если на участке цепи между зажимами a и b направление ЭДС будет противоположно току I (рисунок 1.4):

$$I = \frac{U_{ab} - E}{R}. \quad (1.4)$$

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 последовательно соединенных элементов, по которым протекает один и тот же ток.

Второй закон формулируется для контуров электрической цепи, не содержащих источников тока. Контуром называется замкнутая последовательность ветвей.

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

$$\sum I_i = 0. \quad (1.5)$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на элементах контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре:

$$\sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n E_i \text{ или } \sum_{i=1}^n I_i \cdot r_i = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (1.6)$$

Алгоритм решения задач с использованием законов Кирхгофа.

1. Определить количество узлов y и ветвей b электрической цепи.

2. Выбрать произвольно положительные направления искомых токов в ветвях 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 уравнений 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, не содержащих источников тока. Независимые контуры образуются замкнутыми последовательностями ветвей 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 1.5.

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 $b = 5$.

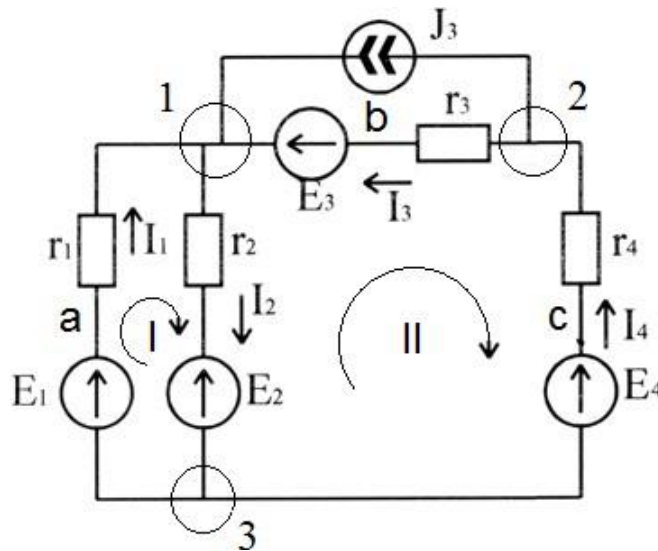


Рисунок 1.5 – Схема электрической цепи

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, 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. Объединим уравнения, составленные по первому и второму законам Кирхгофа, в систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 - I_2 + I_3 + J_3 = 0, \\ I_4 - I_3 - J_3 = 0, \\ I_1 \cdot r_1 + I_2 \cdot r_2 = E_1 - E_2, \\ -I_2 \cdot r_2 - I_3 \cdot r_3 - I_4 \cdot r_4 = E_2 - E_3 - E_4. \end{array} \right. \quad (1.7)$$

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 1.7 для заданной электрической цепи (рисунок 1.5) 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 1.5) определяется следующим образом:

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 - E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 + E_4 \cdot I_4 + U_{12} \cdot J_3. \quad (1.8)$$

Знак «минус» в выражении (1.8) 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 1.5) определяется следующим образом:

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4. \quad (1.9)$$

В результате расчетов общая мощность источников электрической энергии $P_{\text{ист}}$ должна оказаться равной 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 1.5. Внешний контур состоит из элементов E_1 , r_1 , E_3 , r_3 , r_4 , E_4 . Перечень элементов производился по часовой стрелке от наибольшего по названию узла, в данном случае это узел 3. Из рисунка видно, что при выборе контура в его состав не включены ветви с источником тока, т.к. его сопротивление равно бесконечности и определить падение напряжения на нем по закону Ома не удастся. Обозначим на электрической схеме точки при переходе от одного элемента к другому. Так, между элементами E_1 и r_1 получим точку a , между E_3 и r_3 – точку b , между r_4 и E_4 – обозначим точку c . Используя закон Ома, определим потенциалы всех указанных во внешнем контуре точек. Для этого условно заземлим потенциал точки 3, тогда φ_3 станет равен нулю. При этом токораспределение в цепи не изменится, т.к. никаких новых ветвей, по которым могли бы протекать токи, не образуется.

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

$$\varphi_3 = 0;$$

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

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

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

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

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

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

Знак «плюс» в формуле $\varphi_a = \varphi_3 + E_1$ ставится потому, что ЭДС E_1 повышает потенциал при переходе от потенциала φ_3 к φ_a . Знак «минус» в формуле $\varphi_1 = \varphi_a - I_1 \cdot r_1$ ставится потому, что ток течет от большего потенциала φ_a к меньшему φ_1 . Чтобы определить меньший потенциал φ_1 необходимо от большего φ_a вычесть падение напряжения $U_1 = I_1 \cdot r_1$ на резисторе r_1 . Знак

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

На основании полученных значений потенциалов точек строится потенциальная диаграмма 1.6.

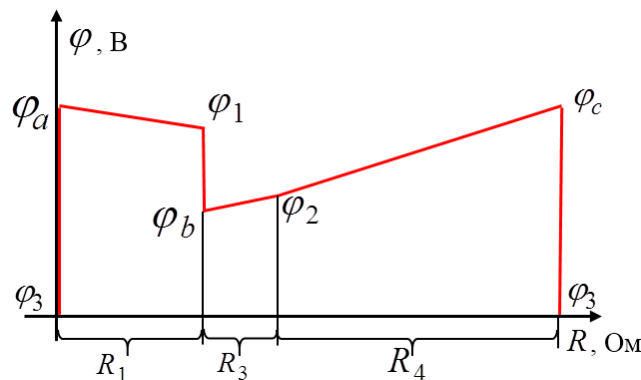


Рисунок 1.6 – Потенциальная диаграмма

2. Задачи

1. Определить показание вольтметра для схемы, изображенной на рисунке 1.7. (15 В).

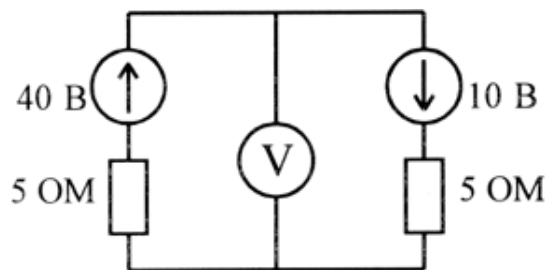


Рисунок 1.7 – Схема электрической цепи

2. Определить токи в ветвях схемы на рисунке 1.8, применяя законы Кирхгофа. Дано: $E_1 = 3 \text{ В}$, $E_2 = 2 \text{ В}$, $E_3 = 2 \text{ В}$, $E_5 = 1 \text{ В}$, $J_3 = 1 \text{ А}$, $J_4 = 0,5 \text{ А}$, $r_1 = 4 \text{ Ом}$, $r_2 = 6 \text{ Ом}$, $r_3 = 2 \text{ Ом}$, $r_4 = 8 \text{ Ом}$, $r_5 = 10 \text{ Ом}$. ($I_1 = 0,2 \text{ А}$, $I_2 = 0,7 \text{ А}$, $I_3 = -0,5 \text{ А}$, $I_4 = 0,1 \text{ А}$, $I_5 = 0,1 \text{ А}$)

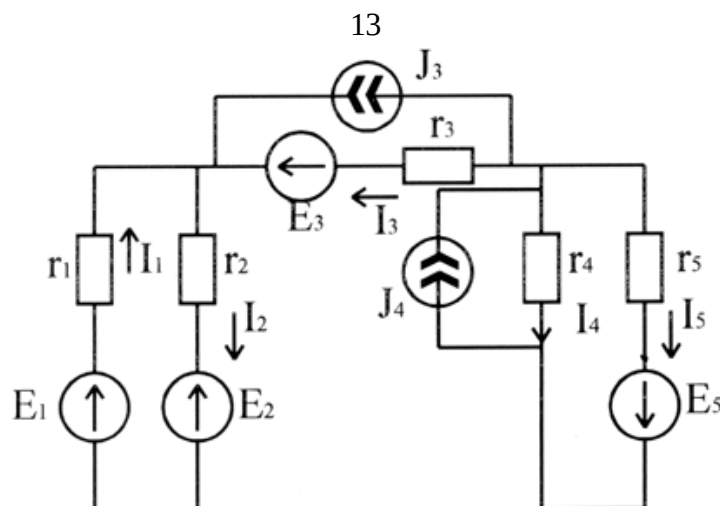


Рисунок 1.8 – Схема электрической цепи

3. Для цепи на рисунке 1.9 построить потенциальные диаграммы при разомкнутом и замкнутом ключе. Дано: $E_1 = 15 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$, $E_3 = 20 \text{ В}$, $E_4 = 35 \text{ В}$, $r_1 = 8 \text{ Ом}$, $r_2 = 24 \text{ Ом}$, $r_3 = 40 \text{ Ом}$, $r_4 = 4 \text{ Ом}$. Внутренние сопротивления источников энергии: $r_{10} = 2 \text{ Ом}$, $r_{20} = 6 \text{ Ом}$, $r_{30} = 2 \text{ Ом}$, $r_{40} = 4 \text{ Ом}$.

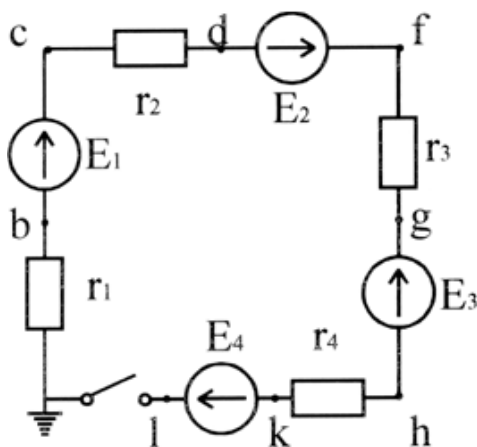


Рисунок 1.9 – Схема электрической цепи

Вопросы к практическому занятию

1. Записать закон Ома для участка электрической 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 для произвольной электрической цепи.

5. Сформулируйте и запишите второй закон Кирхгофа для произвольной электрической цепи.
6. Методика определения показаний вольтметра при известных токах 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.

Практическое занятие 2

Тема: Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть

Основные понятия синусоидального тока.

Мгновенные значения синусоидального тока определяется выражением:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi), \quad (2.1)$$

где I_m – амплитуда тока;

$(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$ – фаза тока;

– угол, называемый начальной фазой, фаза с течением времени непрерывно растет, после ее увеличения на $2 \cdot \pi$ весь цикл изменения тока повторяется;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – угловая частота, показывает скорость изменения фазы.

Для *примера* на рисунке 2.1 построены графики синусоидальных токов одинаковой частоты $f = 50$ Гц, но с различными амплитудами и начальными фазами: $i_1(t) = 5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{\pi}{6}\right)$, $i_2(t) = 10 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$.

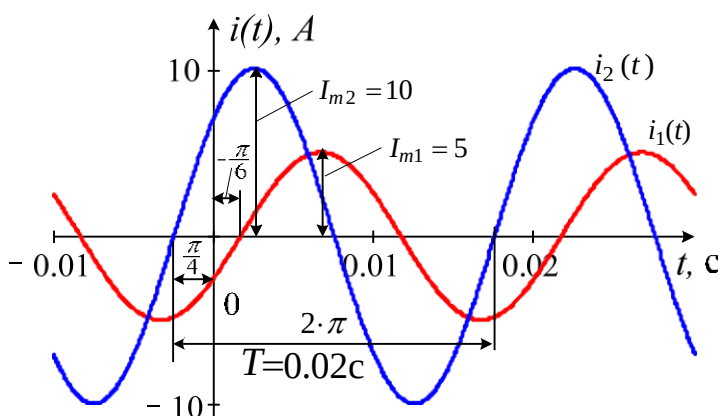


Рисунок 2.1 – Графики синусоидальных токов

Для *численного описания переменного тока* принято использовать параметр, называемый *действующим значением* синусоидального тока. 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. Его можно определить, зная амплитудное значение

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot I_m. \quad (2.2)$$

Большинство измерительных приборов показывают действующее значение измеряемой величины.

Изображение синусоидально изменяющихся величин на комплексной плоскости.

На рисунке 2.2 показан синусоидальный ток $i(t) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$, представляющий собой на комплексной плоскости вектор $\dot{I}_m$.

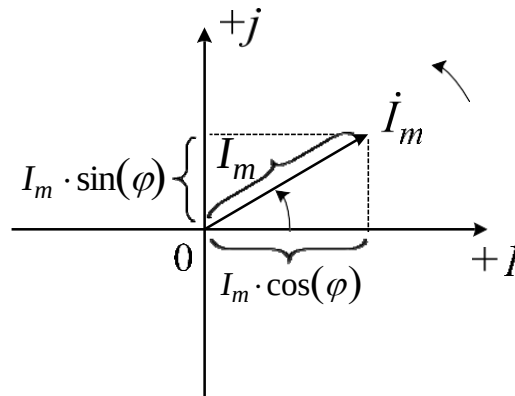


Рисунок 2.2 – Изображение синусоидальных величин на комплексной плоскости

Синусоидальный ток $i(t)$ может быть записан в комплексном виде $\dot{I}_m$:

$$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j \cdot \varphi} = I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi). \quad (2.3)$$

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

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

– угол, под которым вектор $\dot{I}_m$ проведен к вещественной оси $+1$ комплексной плоскости, равный начальной фазе.

Выражение $I_m \cdot e^{j \cdot \varphi}$ называют *показательной* формой записи комплексного числа $\dot{I}_m$; $I_m \cdot \cos(\varphi) + j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – алгебраической формой; $I_m \cdot \cos(\varphi)$ – *вещественная* часть комплекса $\dot{I}_m$ (*активная составляющая* $\dot{I}_m$); $j \cdot I_m \cdot \sin(\varphi)$ – *мнимая* часть комплекса $\dot{I}_m$ (*реактивная составляющая* $\dot{I}_m$).

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° .

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 $u(t) = u_C(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$, 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° . Величина $\frac{1}{\omega \cdot C}$ обозначается X_C и называется *емкостным сопротивлением* $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$.

Символический или комплексный метод расчета цепей синусоидального тока.

Рассмотрим электрическую цепь синусоидального тока, схема которой приведена на рисунке 2.3.

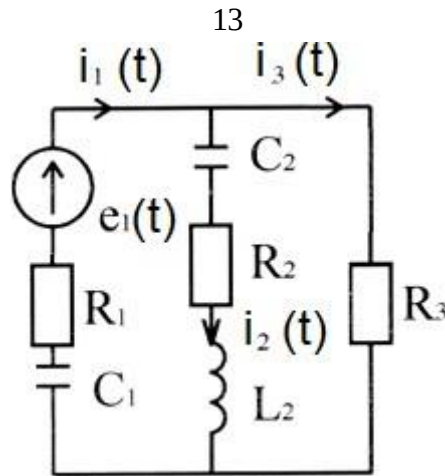


Рисунок 2.3 – Схема электрической цепи синусоидального тока

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:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0; \\ i_1 \cdot R_1 + \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1 dt + \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt + i_2 \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} = e_1; \\ -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - i_2 \cdot R_2 - \frac{1}{C_2} \cdot \int i_2 dt + i_3 \cdot R_3 = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Система уравнений (2.4) представляет собой законы Кирхгофа в дифференциальной форме для схемы электрической цепи (рисунок 2.5).

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:

$$\begin{aligned}
 i &\rightarrow \dot{I}_m, \\
 e &\rightarrow \dot{E}_m, \\
 u_R &= i \cdot R \rightarrow \dot{I}_m \cdot R, \\
 u_L &= L \cdot \frac{di}{dt} \rightarrow \dot{I}_m \cdot j \cdot \omega \cdot L, \\
 u_C &= \frac{1}{C} \int i dt \rightarrow \dot{I}_m \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \right).
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Вектор $j = 1 \cdot e^{j90^\circ}$ представляет собой мнимую единицу. Умножение любого вектора на j сдвигает его на угол, равный $+90^\circ$, а умножение на $(-j)$ сдвигает его на угол, равный (-90°) . Таким образом, напряжение на катушке опережает ток на 90° , напряжение на конденсаторе отстает от тока на 90° .

Анализ электрических цепей также можно производить в комплексах действующих значений токов $\dot{I}$ и напряжений $\dot{U}$, учитывая соотношение (2.2). В задачах, как правило, расчет ведется для действующих значений токов и напряжений, если не оговорено другое.

После замен мгновенных величин на комплексы действующих значений схема электрической цепи примет вид, показанный на рисунке 2.4.

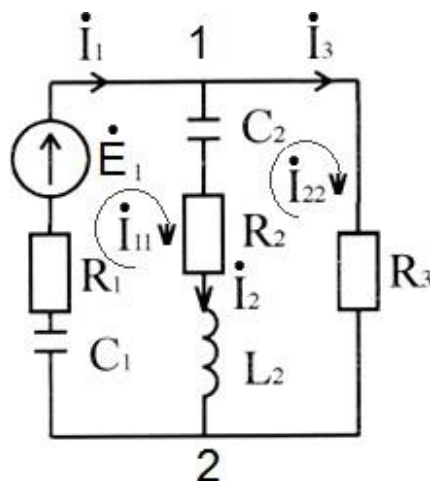


Рисунок 2.4 – Схема электрической цепи синусоидального тока

Символическая форма записи уравнений для действующих значений токов $\dot{I}$ и напряжений $\dot{U}$ по законам Кирхгофа для схемы электрической цепи на рисунке 2.6 имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0; \\ \left\{ \dot{I}_1 \cdot R_1 + \dot{I}_1 \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_1} \right) + \dot{I}_2 \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) + \dot{I}_2 \cdot R_2 + \dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 = E_1; \right. \\ \left. -\dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 - \dot{I}_2 \cdot R_2 - \dot{I}_2 \cdot \left(-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) + \dot{I}_3 \cdot R_3 = 0. \right. \end{cases} \quad (2.6)$$

Решив систему уравнений (2.6), 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 в символической форме справедливы все методы, применяемые для расчета цепей постоянного тока. При этом напряжения, потенциалы, токи, сопротивления и проводимости должны быть записаны в комплексной форме.

Использование закона Ома для расчета цепи переменного тока рассмотрим на примере схемы, представленной на рисунке 2.4.

В схеме (рисунок 2.4) содержится один источник, поэтому для нахождения тока $\dot{I}_1$ используем закон Ома:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{E_1}{R_1 - j \cdot X_{C_1} + \frac{R_3 \cdot (R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2})}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}}; \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}; \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}{R_3 + R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}}. \end{aligned}$$

Комплексное сопротивление относительно источника 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 2.5). Дано: $e_1(t) = 20 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$, $C_1 = C_2 = 318,5$ мкФ, $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $L_2 = 16$ мГн, $R_3 = 20$ Ом.

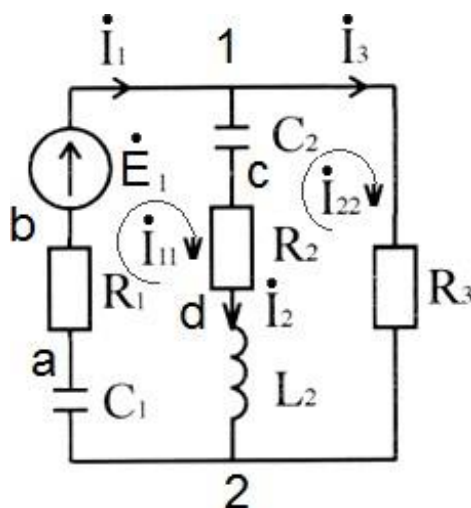


Рисунок 2.5 – Схема электрической цепи синусоидального тока

Решение.

Воспользуемся методом двух узлов

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

Определим индуктивное и емкостные сопротивления:

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

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

Определим комплекс действующего значения источника $\dot{E}_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot \varphi_1}$,

т.к. $E_m = 200 \cdot \sqrt{2}$, а $\varphi_1 = 0$. Тогда $\dot{I}_1 = 200 \cdot e^{j \cdot 0} = 200$ 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:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \frac{200 \cdot \frac{1}{10 - j \cdot 10}}{\frac{450 - j \cdot 450}{(10 - j \cdot 10) \cdot (10 - j \cdot 5) \cdot 20}} = \frac{200 \cdot 20 \cdot (10 - j \cdot 5)}{450 - j \cdot 450} = \frac{40000 - j \cdot 20000}{450 - j \cdot 450} = \\ &= \frac{(40000 - j \cdot 20000) \cdot (450 + j \cdot 450)}{(450 - j \cdot 450) \cdot (450 + j \cdot 450)} = \\ &= \frac{40000 \cdot 450 - j \cdot 20000 \cdot 450 + j \cdot 450 \cdot 40000 + 450 \cdot 20000}{450^2 - j \cdot 450 \cdot 450 + j \cdot 450 \cdot 450 + 450^2} = \\ &= \frac{18000000 + 9000000 - j \cdot 9000000 + j \cdot 18000000}{202500 + 202500} = \frac{27000000 + j \cdot 9000000}{405000} = \\ &= \frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9} \approx 66,667 + j \cdot 22,222. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}_1 - (\varphi_1 - \varphi_2)}{R_1 - j \cdot X_{C1}} = \frac{200 - \left(\frac{600 + j \cdot 200}{9} \right)}{10 - j \cdot 10} = \frac{1800 - 600 - j \cdot 200}{10 - j \cdot 10} = \\ &= \frac{(1200 - j \cdot 200)}{(90 - j \cdot 90)} = \frac{(1200 - j \cdot 200) \cdot (90 + j \cdot 90)}{(90 - j \cdot 90) \cdot (90 + j \cdot 90)} = \\ &= \frac{1200 \cdot 90 + j \cdot 90 \cdot 1200 - j \cdot 200 \cdot 90 + 200 \cdot 90}{90^2 + 90^2} = \frac{126000 + j \cdot 90000}{16200} = \\ &= \frac{70}{9} + j \cdot \frac{50}{9} \approx 7,778 + j \cdot 5,556. \end{aligned}$$

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:

$$\dot{I}_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2 + j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}} = \frac{\frac{200}{3} + j \cdot \frac{200}{9}}{10 + j \cdot 5 - j \cdot 10} = \frac{40}{9} + j \cdot \frac{40}{9} \approx 4.444 + j \cdot 4.444.$$

Ток $\dot{I}_2$ 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:

$$\dot{I}_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_3} = \frac{\frac{200}{3} - \frac{200}{9}}{20} = \frac{10}{3} + j \cdot \frac{10}{9} \approx 3.333 + j \cdot 1.111.$$

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:

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

Векторная диаграмма токов.

На рисунке 2.6 представлена векторная диаграмма токов для электрической цепи, изображенной на рисунке 2.7.

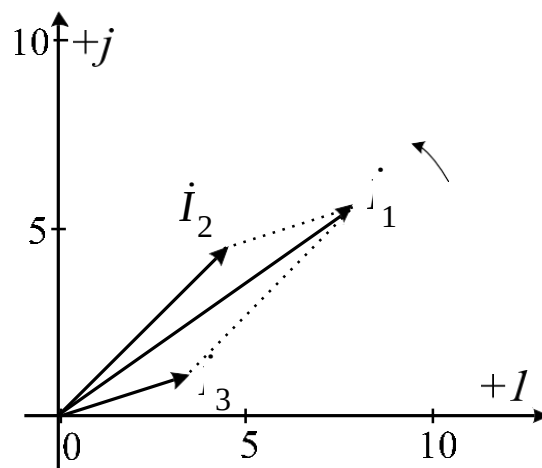


Рисунок 2.6 – Векторная диаграмма токов

Определим потенциалы точек электрической схемы рисунок 2.5.

$$\varphi_2 = 0;$$

$$\dot{\varphi}_a = \dot{\varphi}_2 - \dot{I}_1 \cdot (-j \cdot X_{C_1}) \approx -(7,778 + j \cdot 5,556) \cdot (-j \cdot 10) \approx -55,556 + j \cdot 77,778;$$

$$\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_a - \dot{I} \cdot R_1 = -55,556 + j \cdot 77,778 - (7,778 + j \cdot 5,556) \cdot 10 \approx -133,333 + j \cdot 22,222;$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_b + \dot{E} \approx -133,333 + j \cdot 22,222 + 200 \approx 66,667 + j \cdot 22,222;$$

$$\dot{\varphi}_c = \dot{\varphi}_1 - \dot{I}_2 \cdot (-j \cdot X_{C_2}) = 66,667 + j \cdot 22,222 - (4,444 + j \cdot 4,444) \cdot (-j \cdot 10) \approx 22,222 + j \cdot 66,667;$$

$$\dot{\varphi}_d = \dot{\varphi}_c - \dot{I} \cdot R_2 = 22,222 + j \cdot 66,667 - (4,444 + j \cdot 4,444) \cdot 10 \approx -22,222 + j \cdot 22,222;$$

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_d - \dot{I}_2 \cdot j \cdot X_{L_2} = -22,222 + j \cdot 22,222 - (4,444 + j \cdot 4,444) \cdot j \cdot 5 \approx 0.$$

Потенциалы точек на комплексной плоскости образуют *топологическую диаграмму*. Для схемы (рисунок 2.5) топологическая диаграмма, совмещенная с векторной диаграммой токов, представлена на рисунке 2.7. Масштаб векторов тока при этом увеличен в десять раз.

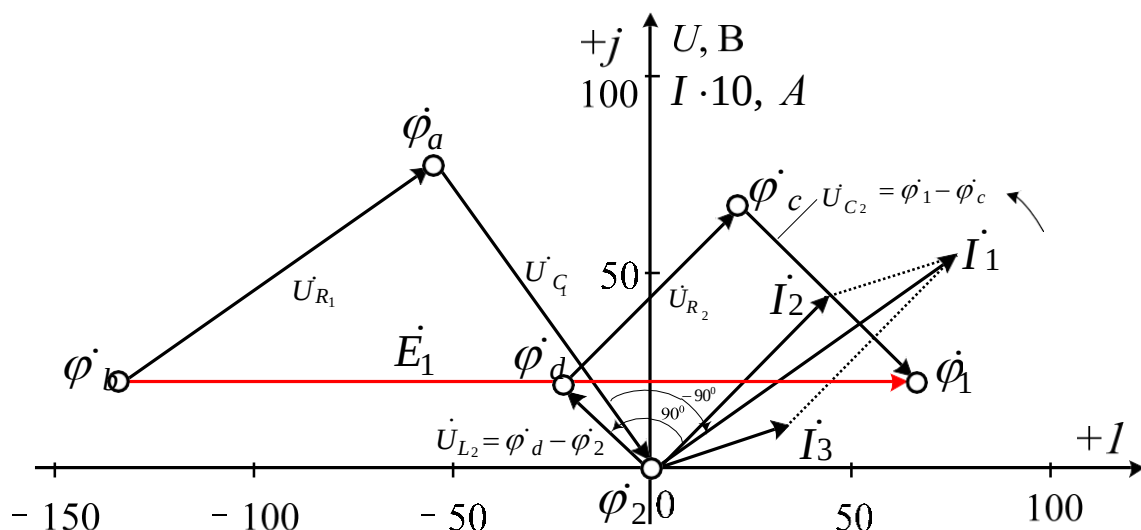


Рисунок 2.7 – Совмещенные векторная диаграмма токов и топологическая диаграмма напряжений

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 в расчете есть ошибка.

Активная, реактивная и полная мощность.

Рассчитаем активную, реактивную и полную мощность для рассмотренной выше задачи.

Активная мощность в цепи переменного тока:

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

где U_{R_1} , U_{R_2} , U_{R_3} – действующие значения напряжения на резисторах, $|I_1|$ – модуль (длина вектора) комплекса тока $\dot{I}_1$

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

Реактивная мощность в цепи переменного тока:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пол}} &= (\dot{I}_1)^2 \cdot (-j \cdot X_{C_1}) + (\dot{I}_2)^2 \cdot (j \cdot X_{L_2} - j \cdot X_{C_2}) = \\ &= \sqrt{(7,778)^2 + (5,556)^2} \cdot (-j \cdot 10) + \sqrt{(4,444)^2 + (1,111)^2} \cdot (j \cdot 5 - j \cdot 10) = -j \cdot 1111. \end{aligned}$$

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

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

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:

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

где $\dot{I}_1^*$ – сопряженный комплекс тока $\dot{I}_1$. Сопряженный комплекс отличается от простого противоположным знаком у мнимой части. Для тока $\dot{I}_1 = 7,778 + j \cdot 5,556$ сопряженный комплекс равен $\dot{I}_1^* = 7,778 - j \cdot 5,556$ (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 показал, что баланс активных и реактивных мощностей в рассматриваемой цепи выполняется.

Трехфазные цепи синусоидального тока.

Электрическая цепь, состоящая из трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки и соединительных проводов, называется трехфазной. Система трех синусоидальных ЭДС одинаковой амплитуды, имеющих одну и ту же частоту и сдвинутых по фазе одна относительно другой на угол $2\pi/3$ (120°), называется *трехфазной симметричной системой ЭДС*. На рисунке 2.8 и 2.9 представлены, соответственно, графики мгновенных значений такой системы ЭДС и векторная диаграмма с действующим значением каждой фазы $E_A = E_B = E_C = 220$ В.

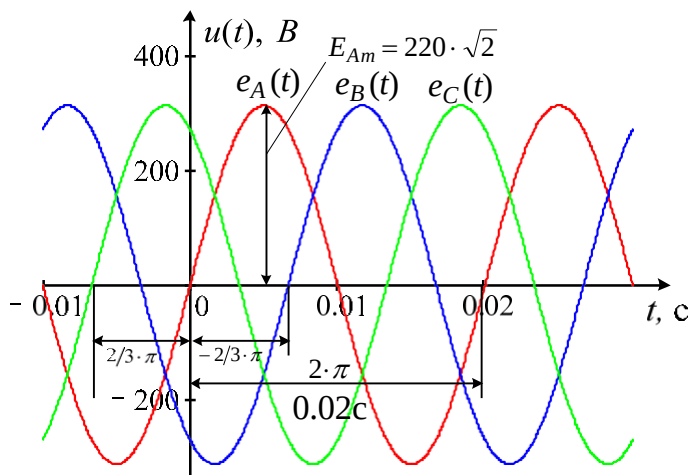


Рисунок 2.8 – Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС

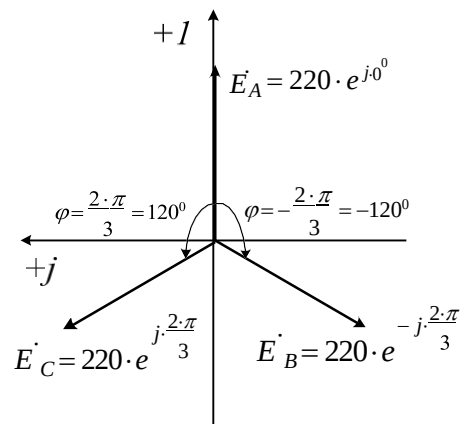


Рисунок 2.9 – Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС

На электрической схеме трехфазный генератор, индуцирующий трехфазную систему ЭДС, принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° . При соединении звездой одноименные зажимы трех обмоток объединяют в одну точку (рисунок 2.10), которую называют *нулевой точкой* генератора N .

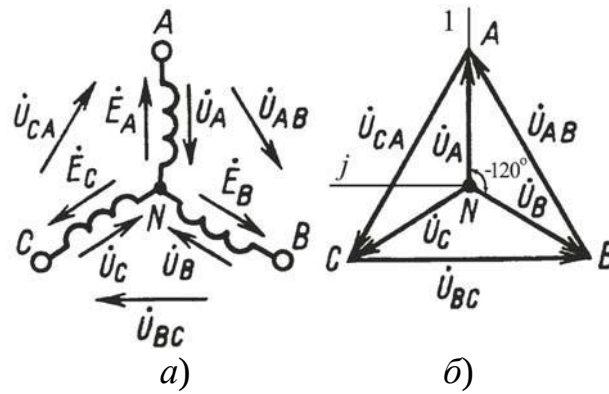


Рисунок 2.10 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора звездой (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

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 2.10 а) линейные напряжения определяются через разности фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (2.7)$$

Для симметричного генератора (источника) фазные напряжения:

$$\dot{U}_A = U_\phi; \dot{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}; \dot{U}_C = U_\phi \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}}, \quad (2.8)$$

линейные напряжения (рисунок 2.10 б):

$$\dot{U}_{AB} = U_\phi \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{6}}; \dot{U}_{BC} = U_\phi \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{2}}; \dot{U}_{CA} = U_\phi \cdot e^{j \cdot \frac{5\pi}{6}}. \quad (2.9)$$

Между линейными и фазными напряжениями для симметричного источника существует зависимость:

$$U_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\phi. \quad (2.10)$$

При соединении обмоток генератора треугольником (рисунок 2.11) 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.

При соединении обмоток трехфазного источника треугольником (рисунок 2.11 а) линейные напряжения равны фазным (рисунок 2.11 б)

$$U_\phi = U_\phi. \quad (2.11)$$

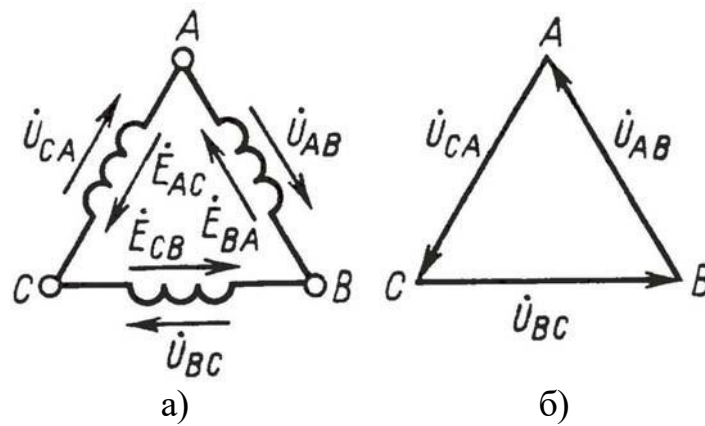


Рисунок 2.11 – Схема соединения трехфазных обмоток генератора треугольником (а) и соответствующая векторная диаграмма напряжений (б)

Расчет трехфазных цепей синусоидального тока.

Так как трехфазные цепи являются разновидностью цепей синусоидального тока, то для них применимы те же методы и приемы: символический метод расчета, построение векторных и топографических диаграмм.

Симметричный режим. Для симметричного приемника, соединенного звездой (рисунок 2.12 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$, напряжение смещения нейтрали U'_{nN} равно нулю, а токи в фазах

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z} + \underline{Z}_n}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z} + \underline{Z}_n}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z} + \underline{Z}_n}, \quad (2.12)$$

где $\underline{Z}_n$ – сопротивление симметричной линии на фазу. По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 2.12 б):

$$I_A = I_B = I_C = \frac{U_\phi}{|\underline{Z} + \underline{Z}_n|}. \quad (2.13)$$

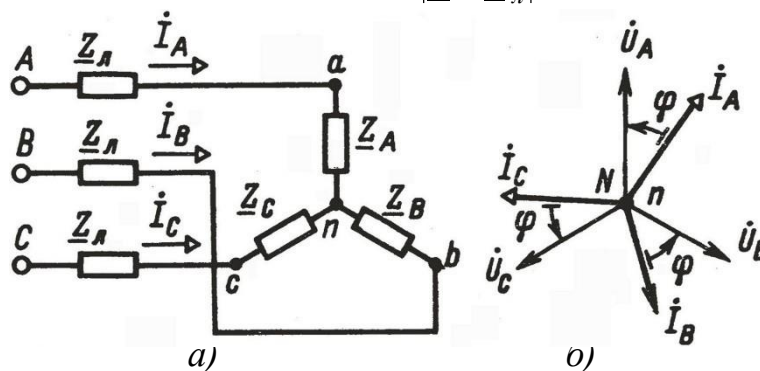


Рисунок 2.12 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

Для симметричного приемника, соединенного треугольником (рисунок 2.13 а), справедливо соотношение $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}$. Если $\underline{Z}_л = 0$, то фазные токи приемника равны:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB} / (\underline{Z}); \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC} / (\underline{Z}); \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA} / (\underline{Z}). \quad (2.14)$$

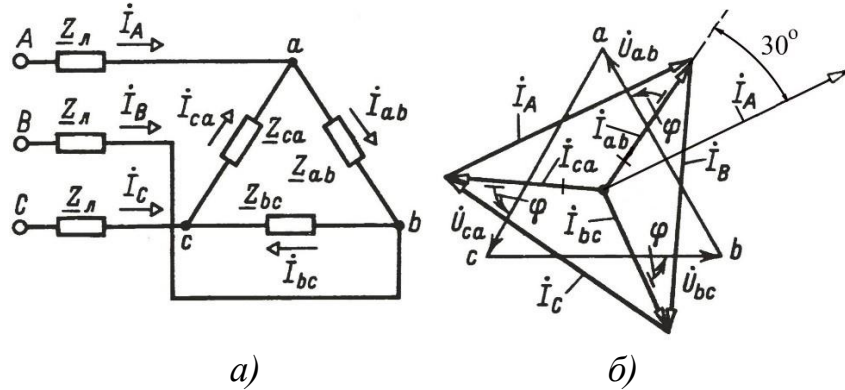


Рисунок 2.13 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 2.13 б):

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi = U_\phi / |\underline{Z}|. \quad (2.15)$$

Линейные токи приемника определяются разностью фазных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (2.16)$$

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 2.13 б),

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j \frac{\pi}{6}}; \dot{I}_B = \dot{I}_A \cdot e^{-j \frac{2\pi}{3}}; \dot{I}_C = \dot{I}_A \cdot e^{j \frac{2\pi}{3}}. \quad (2.17)$$

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_л}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_л}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_л}. \quad (2.18)$$

Фазные токи определяются через линейные:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{I}_A}{\sqrt{3}} e^{j \frac{\pi}{6}}; \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{3}}; \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{j \frac{2\pi}{3}}. \quad (2.19)$$

Несимметричный режим.

Рассмотрим случай соединения приемника звездой с нейтральным проводом (рисунок 2.14).

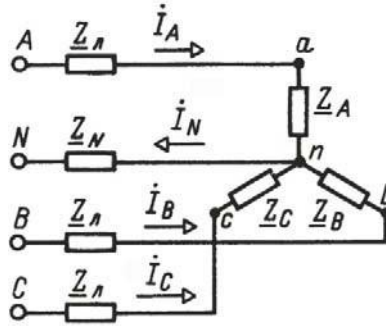


Рисунок 2.14 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (2.20)$$

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

Линейные токи и ток в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_л}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_л}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_л}; \quad \dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_N}. \quad (2.22)$$

По первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (2.23)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \frac{\dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_B - \dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; & \dot{U}_{Bn} &= \frac{\dot{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_C - \dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \\ \dot{U}_{Cn} &= \frac{\dot{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_A - \dot{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{An} / (\underline{Z}_A + \underline{Z}_л); \quad \dot{I}_B = \dot{U}_{Bn} / (\underline{Z}_B + \underline{Z}_л); \quad \dot{I}_C = \dot{U}_{Cn} / (\underline{Z}_C + \underline{Z}_л). \quad (2.25)$$

При соединении приемника треугольником (рисунок 6.6 а) и $\underline{Z}_л = 0$ фазные токи определяются согласно (2.14), линейные – (2.16).

Если $\underline{Z}_л \neq 0$, 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:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A - \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B; \dot{U}_{bc} = \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B - \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C; \\ \dot{U}_{ca} &= \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C - \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A; \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / (\underline{Z}_{ab}); \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / (\underline{Z}_{bc}); \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / (\underline{Z}_{ca}), \quad (2.27)$$

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

Мощность трехфазной цепи.

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

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot U_\text{л} \cdot I_\text{л} \cdot \cos \phi, \quad (2.28)$$

$$Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \phi = \sqrt{3} \cdot U_\text{л} \cdot I_\text{л} \cdot \sin \phi, \quad (2.29)$$

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\text{л} \cdot I_\text{л}, \quad (2.30)$$

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:

$$P = P_A + P_B + P_C, \quad (2.31)$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (2.32)$$

$$S = S_A + S_B + S_C. \quad (2.33)$$

2. Задачи

1. Катушка с активным сопротивлением $R = 10$ Ом, индуктивностью $L = 0,05$ Гн подключена к источнику синусоидального напряжения (рисунок 2.15), 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, $\phi = 57^\circ 30'$, $I = 6,45$ А, $U_{X_L} = 103$ В, $U_R = 64,5$ В)

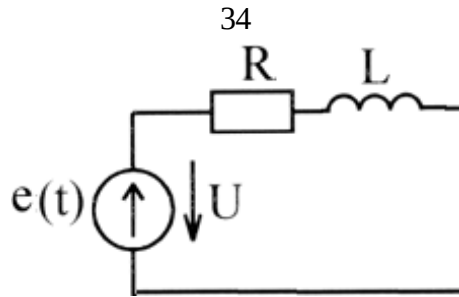


Рисунок 2.15 – Схема электрической цепи

2. Для электрической цепи однофазного переменного тока, схема которой представлена на рисунке 2.16, 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)

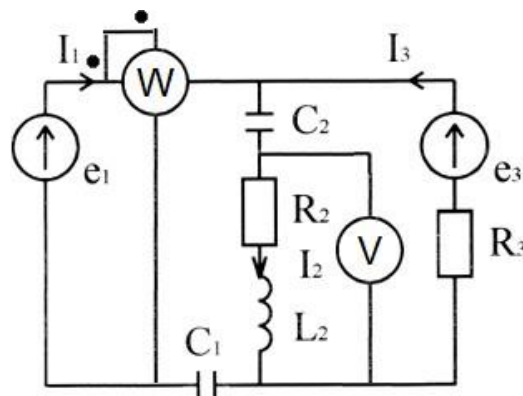


Рисунок 2.16 – Схема электрической цепи

3. На рисунке 2.17 представлена симметричная трёхфазная система с параметрами $X_C = 90$ Ом, $r = 40$ Ом. Определить показания приборов и ток i при $U_A = 120 \angle 0^\circ$ В. (207,5 В; 4 А; 2,3 А; 625 Вт; 950 Вт; $i = 3\sqrt{2} \sin \omega t$ А).

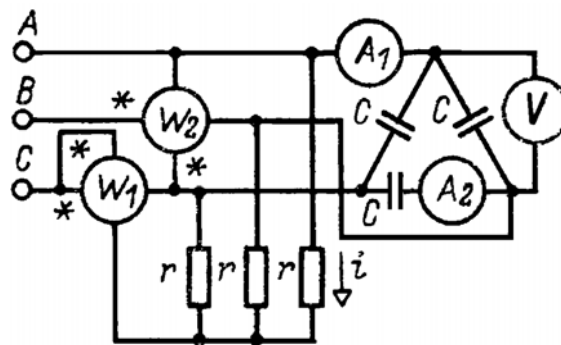


Рисунок 2.17 – Схема трехфазной электрической цепи

4. К симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС $E = 230$ В и с внутренним сопротивлением $\underline{Z}_0 = (0,3+j0,9)$ Ом подключена несимметричная нагрузка, соединенная в звезду с нулевым проводом (рисунок 2.18). Сопротивления фаз нагрузки: $\underline{Z}_a = (2+j4)$ Ом, $\underline{Z}_b = (4-j8)$ Ом, $\underline{Z}_c = 5$ Ом. Сопротивление каждого провода линии $\underline{Z}_{np} = (0,4+j0,3)$ Ом, а сопротивление нулевого провода $\underline{Z}_N = 0,5$ 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. ($\dot{I}_A = 37,9e^{-j60^\circ 10'}$ А,

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

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

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

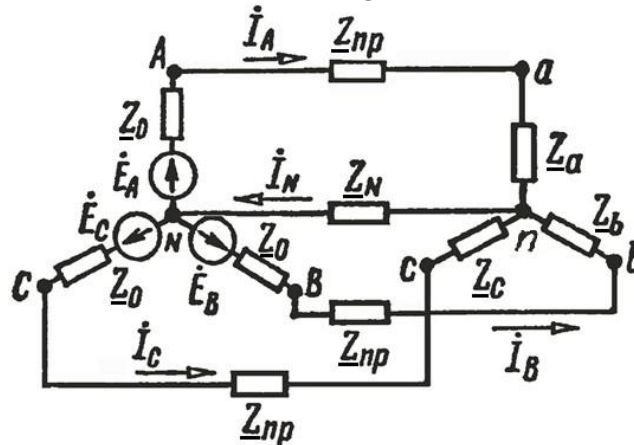


Рисунок 2.18 – Схема трехфазной электрической цепи

3. В цепи (рисунок 2.19) 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; $\underline{Z}_A = 10$ Ом; $\underline{Z}_B = j10$ Ом; $\underline{Z}_C = -j10$ Ом. (0; 95 А; 95 А; 0; 33 А; 33 А).

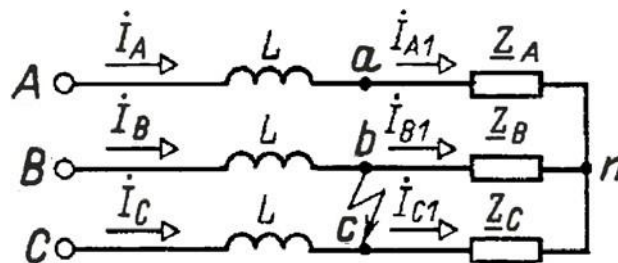


Рисунок 2.19 – Схема трехфазной электрической цепи

Вопросы к практическому занятию

1. Изложите основы символического метода расчета. На каком основании все методы расчета цепей постоянного тока применимы к цепям синусоидального тока?
2. Дайте определение векторной и топографической диаграммам.
3. Какому моменту времени соответствует положение векторов токов и напряжений на векторной диаграмме?
5. Физически интерпретируйте P , Q , S .
6. Выразите комплексную мощность S через комплексы напряжения и тока.
7. Запишите баланс активных и реактивных мощностей.
8. Что означает симметричный трехфазный источник электрической энергии?
9. Что означает несимметричный трехфазный источник?
10. Перечислите способы соединения обмоток трехфазного источника.
11. Что такое нейтральный провод?
12. Какое напряжение называется фазным, линейным?
13. Что означает симметричная и несимметричная нагрузка?
14. Что такое напряжение смещения нейтрали?
15. Как определить ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке?
16. Чему равна мощность трехфазной системы в симметричном режиме?
17. Чему равна мощность трехфазной системы в несимметричном режиме?

Практическое занятие 3

Тема: Методы анализа переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть

Для анализа переходных процессов в линейных электрических цепях используют следующие метод: *классический, операторный и интеграл Дюамеля.*

Классический метод. При классическом методе анализа переходных процессов решение неоднородного линейного дифференциального уравнения представляет собой сумму его частного (принужденная составляющая) и общего решения, получаемого при равенстве нулю правой части (свободная составляющая). Принужденная составляющая определяется путем расчета установившегося режима в послекоммутационной схеме и представляет собой установившееся значение искомого переходного тока (напряжения). Свободная составляющая искомого тока (напряжения) обусловлена только внутренними источниками энергии электрического и магнитного поля.

При анализе переходного процесса в электрической цепи *классическим методом* можно рекомендовать следующий порядок расчета искомой величины:

1. Подготовить схему электрической цепи к расчету: выбрать направления токов в ветвях схемы при переходном процессе.

2. Определить независимые начальные условия – ток в индуктивности $i_L(0-)$ и напряжение на емкости $u_C(0-)$ из расчета цепи до коммутации. На основании законов коммутации ток на индуктивности и напряжение на емкости не могут измениться скачком:

$$i_L(0-)=i_L(0+)=i_L(0), u_C(0-)=u_C(0+)=u_C(0). \quad (3.1)$$

3. Представить искомую величину, например ток, в виде суммы двух составляющих: свободной и установившийся (принужденной) $i = i_{св} + i_y$.

4. Определить установившуюся составляющую искомой величины после коммутации, когда переходной процесс закончился.

5. Определить общий вид закона изменения свободной составляющей:

5.1 Составить характеристическое уравнение для заданной схемы. Для этого в цепи после коммутации необходимо разорвать ветвь с искомой величиной (или какую-либо другую ветвь, которая не содержит источника тока). Найти комплексное входное сопротивление цепи $\underline{Z}(j\omega)$ относительно точек разрыва. Заменить $j\omega$ на p , приравнять входное сопротивление к нулю, получив, таким образом, характеристическое уравнение $Z(p) = 0$.

5.2 Определить корни характеристического уравнения.

5.3 Определить общий вид свободной составляющей в зависимости от вида корней характеристического уравнения, например, для тока:

– если корень характеристического уравнения один, вещественный, то

$$i_{св} = A \cdot e^{pt};$$

– если корней два, различных, вещественных, то $i_{св} = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}$;

– если корней два, одинаковых, вещественных, то $i_{св} = A_1 \cdot e^{pt} + A_2 t \cdot e^{pt}$;

– если корней два, комплексных, сопряженных ($p_{1,2} = \alpha \pm j\omega_{св}$), то

$$i_{св} = B \cdot e^{\alpha t} \sin(\omega_{св} t + \beta).$$

6. Согласно п.3 записать общий вид искомого полного тока (напряжения).

7. Определить постоянные интегрирования, используя законы коммутации и систему дифференциальных уравнений, составленных по законам Кирхгофа для момента времени $t=0+$. При этом учитывать п.2 и соотношения $i_C(0+) = C \frac{du_C(0+)}{dt}$, $u_L(0+) = L \frac{di_L(0+)}{dt}$.

Операторный метод. При операторном методе анализа переходных процессов действительные функции времени, описывающие процессы в

электрических цепях и называемые оригиналами, заменяют их операторными изображениями с помощью преобразования Лапласа

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt. \quad (3.2)$$

Преобразование Лапласа приводит к замене операций дифференцирования и интегрирования оригиналов при решении дифференциальных уравнений на алгебраические операции умножения и деления изображений. Решив полученные алгебраические уравнения в операторной форме относительно изображений искомых величин, переходят к оригиналам, получают решения исходных дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в электрической цепи.

При анализе переходного процесса в электрической цепи **операторным методом** рекомендуется следующий порядок расчета:

1. Из расчета цепи до коммутации найти токи в индуктивностях $i_L(0-)$ и напряжения на емкостях $u_C(0-)$.

2. По виду исследуемой электрической цепи после коммутации составить операторную схему (рисунок 3.1). По операторной схеме известными методами расчета цепей найти изображение искомой величины.

3. По изображению искомой величины найти оригинал, т. е. искомую функцию времени.

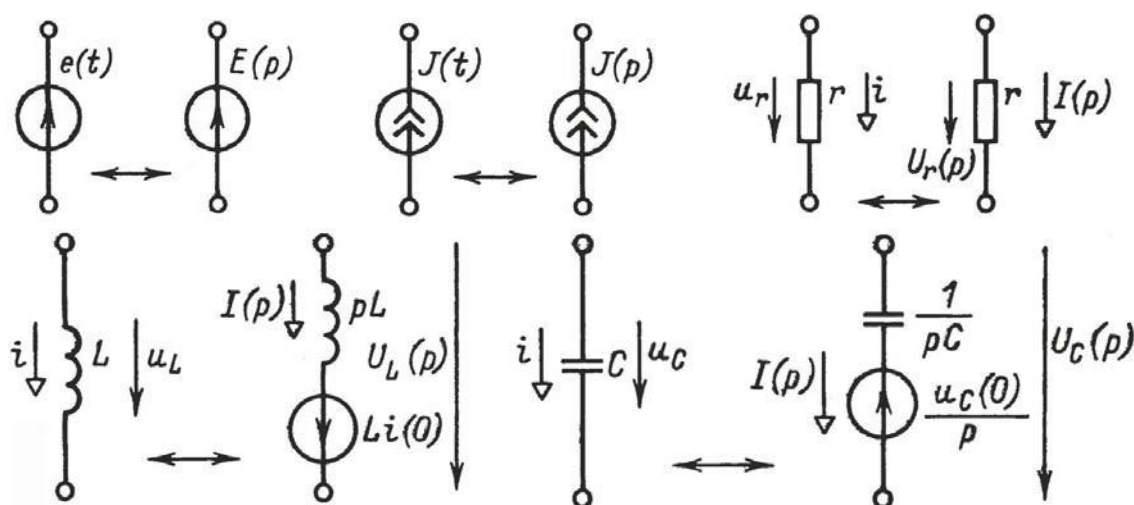


Рисунок – 3.1 – Операторные схемы замещения элементов электрических цепей

Способы перехода от изображения к оригиналу

1. Применение теоремы разложения. Если изображение искомой величины имеет вид рациональной дроби:

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_k p^k + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_k p^k + \dots + b_1 p + b_0}, \quad (3.3)$$

где a_k и b_k – действительные числа; $p_1, p_2, \dots$ – действительные и различные корни характеристического уравнения $F_2(p) = 0$, то

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (3.4)$$

Если многочлен $F_2(p)$ имеет один нулевой корень, т.е. $F_2(p) = p F_3(p)$, то

$$\frac{F_1(p)}{p F_3(p)} = f(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (3.5)$$

Если многочлен $F_2(p)$ имеет n пар комплексных сопряженных корней, то

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = f(t) = \sum_{k=1}^n 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} \right\}, \quad (3.6)$$

и при одном нулевом корне

$$\frac{F_1(p)}{p F_3(p)} = f(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=1}^n 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3(p_k)} e^{p_k t} \right\}. \quad (3.7)$$

Если в цепи действует синусоидальная ЭДС, то задачу рекомендуется решать для свободных составляющих искомых величин. Далее, для полученной схемы рассчитать изображения искомых величин одним из известных ранее методов (контурных токов, узловых потенциалов и т.д.)

По найденному изображению определить оригинал искомой величины. Для этого воспользоваться либо таблицами соответствия (см. приложение), либо теоремой разложения, представленной выше.

Интеграл Дюамеля. Для расчета переходного процесса при воздействии на электрическую цепь источников напряжения или тока произвольной формы можно применить интеграл Дюамеля. Существует несколько форм записи интеграла Дюамеля, одна из которых представлена ниже.

Первая форма записи интеграла Дюамеля при непрерывном воздействии $x(t)$:

$$y(t) = x(0)h(t) + \int_0^t x'(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (3.8)$$

где $h(t)$ – переходная функция, т.е. реакция цепи на единичный скачок входного воздействия, $x(t)$ – входная величина (воздействие), $y(t)$ – искомая величина (реакция цепи на воздействие), $x'(\tau) = dx/dt|_{t=\tau}$; при различных законах воздействия $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в интервалах времени $0 \leq t \leq t_1$ и $t \geq t_1$

$$y(t) = x_1(0)h(t) + \int_0^t x'(\tau)h(t-\tau)d\tau; \quad (3.9)$$

$$y(t) = x_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} x'(\tau)h(t-\tau)d\tau + [x_2(t_1) - x_1(t_1)]h(t-t_1) + \int_{t_1}^t x_2'(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (12.3)$$

и аналогично при большем числе интервалов.

Общая характеристика методов анализа и расчета переходных процессов в нелинейных цепях. Методы анализа и расчета переходных процессов в нелинейных цепях могут быть классифицированы: а) по виду основных операций, которые необходимо выполнять для интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, – на графические (графоаналитические) и аналитические; б) по характеру величины, для которой производится расчет (по мгновенным значениям токов и напряжений), по мгновенным значениям огибающих токов и напряжений (их первых гармоник) либо по мгновенным значениям медленно меняющихся средних за период внешнего воздействия значений.

Под *графическими (графоаналитическими)* понимают такие методы, в которых основными операциями при определении зависимости от времени искомых токов и напряжений являются графические построения, нередко сопровождаемые и некоторыми вспомогательными числовыми подсчетами.

В графических методах характеристики нелинейных элементов обычно не требуется выражать аналитически.

Аналитическими называют такие методы, в которых основной операцией при определении зависимости искомых токов и напряжений от времени является точное (приближенное) аналитическое интегрирование дифференциальных уравнений цепи путем использования аналитических выражений характеристик нелинейных элементов.

Аналитические методы расчета переходных процессов в нелинейных цепях: 1) метод интегрируемой нелинейной аппроксимации; 2) метод кусочно-линейной аппроксимации; 3) метод медленно меняющихся амплитуд; 4) метод малого параметра; 5) метод интегральных уравнений.

Графические методы имеют следующие преимущества перед аналитическими: а) нет необходимости выражать характеристики нелинейных элементов аналитически, что позволяет избавиться от погрешностей, связанных с аналитическим представлением характеристик; б) простота учета гистерезиса и других сложных нелинейных зависимостей.

В свою очередь, аналитические методы также имеют перед графическими преимущества. Из них основным является то, что они дают возможность получить решение в общем виде, а не для какого-то одного конкретного сочетания параметров. Получить решение в общем виде желательно потому, что анализ его позволяет выяснить все особенности процесса при изменении всех параметров.

На практике наибольшее распространение получили численные методы расчета переходных процессов в нелинейных цепях. Среди которых необходимо выделить *метод переменных состояний*. Более подробно познакомится с методами *расчета переходных процессов в нелинейных цепях* можно в учебнике [Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. ISBN 5-8297-0026-3]

2. Задачи

1. Для схемы (рисунок 3.1) дано: $e = 50\sqrt{2} \sin(100t + 30^\circ)$ В; $r_1 = 20$ Ом; $r = 30$ Ом; $L = 0,5$ Гн. Найти ток i после замыкания ключа. ($0,5e^{-60t}$ А)

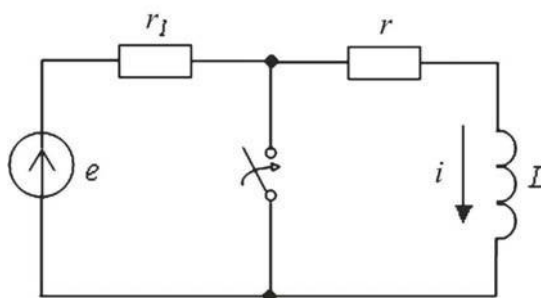


Рисунок 3.2

2. В результате увеличения сопротивления в одной из ветвей цепи (рисунок 3.3) возникает переходный процесс. Определить напряжение u_C и токи i_1 , i_2 при заданных параметрах: $E=180$ В; $r_1=60$ Ом; $r_2=20$ Ом; $r_3=100$ Ом; $C=25$ мкФ. $(120 - 75e^{-1000t}$ В; $1,0 + 1,25e^{-1000t}$ А; $1,000 - 0,625e^{-1000t}$ А).

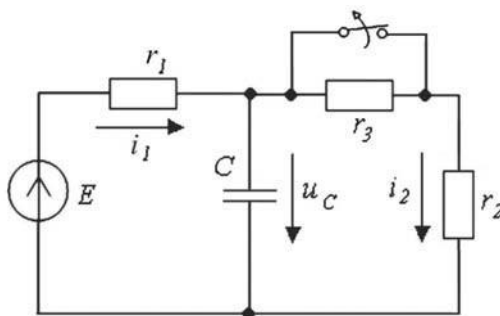


Рисунок 3.3

3. Дана электрическая схема (рисунок 3.4 а), на входе которой действует напряжение, изменяющееся во времени по заданному закону $u_1(t)$ (рисунок 3.4 б). При этом $A=5$, $k=2$, $t_1=1,25$. Требуется определить закон изменения во времени тока i . Параметры цепи $r=10$ Ом, $L=1$ мГн. (при $0 \leq t < t_1$ $0,5 - 0,5 \cdot e^{-1000t} - 0,2 \cdot t$; при $t_1 \leq t \leq \infty$ $-0,5 \cdot e^{-1000t} + 0,25 \cdot e^{(-1000t+1250)}$).

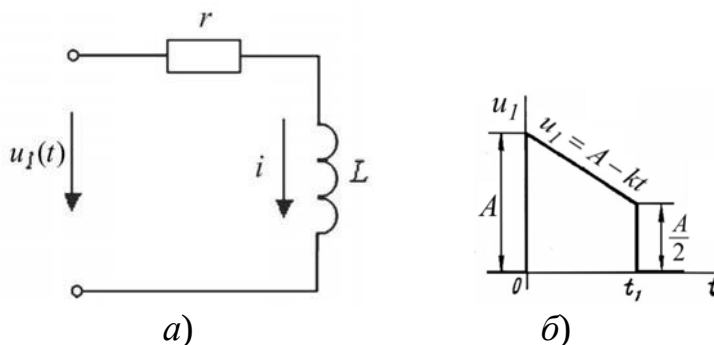


Рисунок 3.4

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение переходному процессу.
2. Что означает понятие переходной процесс в цепи первого порядка.
2. Что понимают под установившимися (принужденными) и свободными токами и напряжениями.
3. Сформулируйте законы (правила) коммутации.
4. Дайте определение зависимым и независимым начальным условиям.
5. Что такое характеристическое уравнение и как оно составляется?
6. Чем определяется число корней характеристического уравнения?
7. Что означают и показывают корни характеристического уравнения?
8. Изложите сущность классического метода расчета и принцип составления уравнений для определения постоянных интегрирования.
9. Изложите сущность и этапы расчета операторным методом.
10. Как учитываются начальные условия в операторном методе?
11. Изобразите операторную схему замещения катушки индуктивности.
12. Изобразите операторную схему замещения конденсатора.
13. Как осуществляется переход от изображения к оригиналу?
14. О чём свидетельствует нулевой корень характеристического уравнения?
15. Запишите законы Кирхгофа и Ома в операторной форме.
16. Изложите сущность и охарактеризуйте идею расчета с помощью интеграла Дюамеля.
17. В каких случаях необходимо рассчитывать переходной процесс с помощью интеграла Дюамеля?
18. Дайте сравнительную характеристику известных вам методов расчета переходных процессов.
19. Охарактеризуйте известные вам группы методов расчета переходных процессов в нелинейных цепях.
20. Укажите, в чем положительные и в чем отрицательные стороны расчетов по мгновенным значениям и по огибающим первых гармоник, графоаналитических и аналитических методов.

Тема: Расчет параметров вращающихся электрических машин

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. 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 4.1) 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.

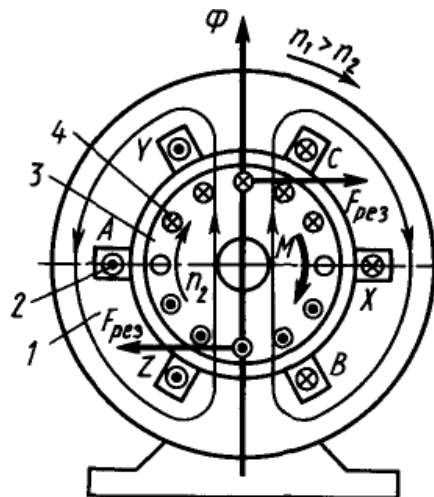


Рисунок 4.1 – Электромагнитная схема асинхронной машины

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

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

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 4.1), 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 $n = 0$

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

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 :

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

Скорость ротора, выраженная через скольжение s , равна:

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

При пуске двигателя ($n = 0$) согласно (4.3) $s = 1$, 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 равна:

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

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

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

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 4.2). На рисунке 4.2 обозначено критическое скольжение $s_{\text{кр}}$, критический (максимальный) момент $M_{\text{кр}}$ и пусковой момент $M_{\text{п}}$.

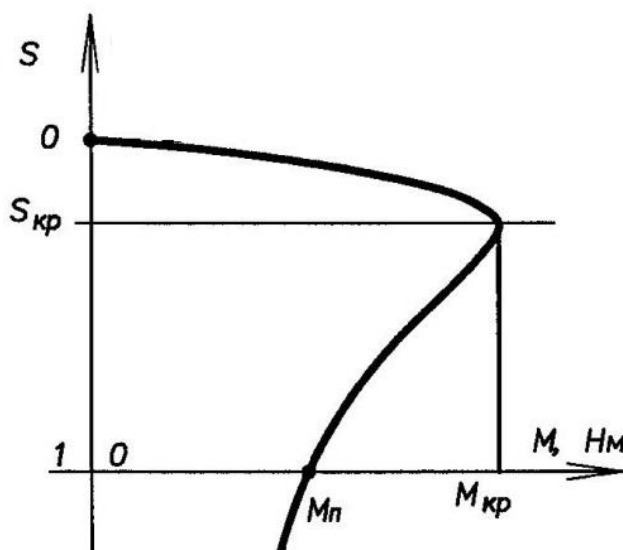


Рисунок 4.2 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

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

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}, \quad (4.7)$$

где

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \cdot \left(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1} \right), \quad (4.8)$$

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

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:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9550 \cdot \frac{10}{1420} = 67.3 \text{ Н·м,}$$

$$M_{\text{мах}} = k_m \cdot M_{\text{ном}} = 1.8 \cdot 67.3 = 121 \text{ Н·м.}$$

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.

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\left| k_m + \sqrt{k_m^2 - 1} \right| \right) = 0,053 \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Машина постоянного тока (МПТ) состоит из неподвижной части – индуктора, и подвижной части (рисунок 4.3). 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.

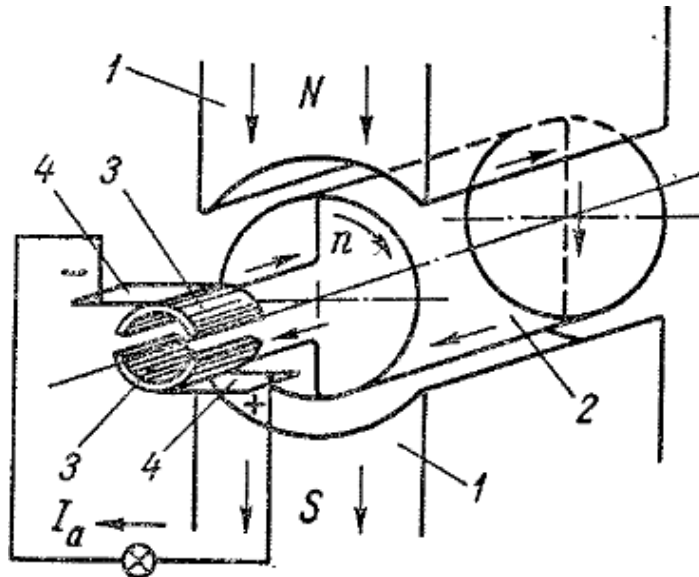


Рисунок 4.3 – Устройство простейшей машины постоянного тока

В генераторе постоянного тока (ГПТ) 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 :

$$U_a = E_a - I_a \cdot r_a. \quad (4.9)$$

В генераторе при установившемся режиме работы электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{В}} - M_{\text{ТР}} - M_{\text{С}}, \quad (4.10)$$

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 $P_{\text{ЭМ}}$:

$$P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ}} \cdot \Omega, \quad (4.11)$$

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 4.4).

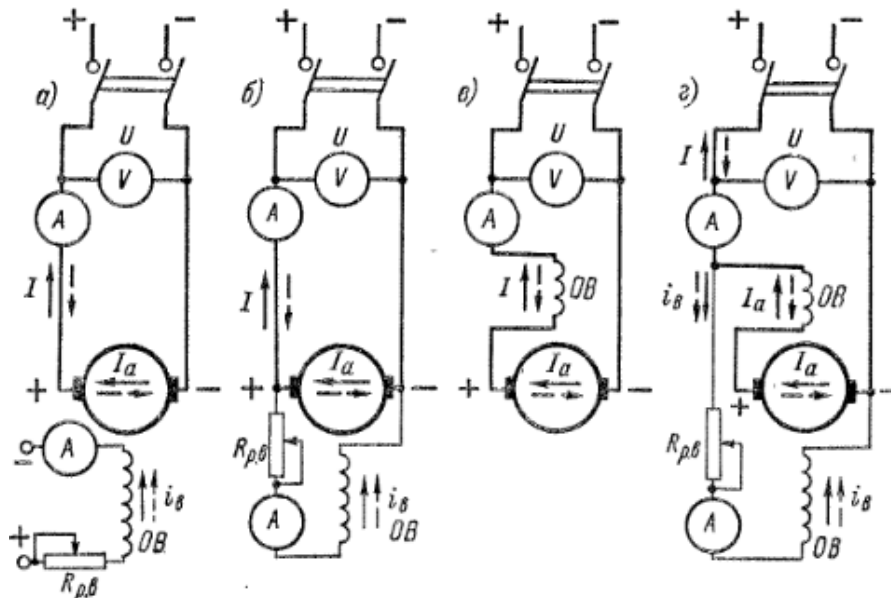


Рисунок 4.4 – Способы возбуждения ГПТ: а – независимое, б – параллельное, в – последовательное, г – смешанное

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 якору машины в режиме двигателя, равно:

$$U_a = E_a + I_a \cdot r_a. \quad (4.12)$$

В двигателе при установившемся режиме работы электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{В}} + M_{\text{ТР}} + M_{\text{С}}, \quad (4.13)$$

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

ЭДС якоря можно определить как

$$E_a = c_e \cdot \Phi_{\delta} \cdot n, \quad (4.14)$$

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

Φ_{δ} – основной намагничивающий поток.

Электромагнитный момент также может быть найден через намагничивающий поток:

$$M_{\text{ЭМ}} = c_m \Phi_{\delta} I_a, \quad (4.15)$$

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

$$I_a = \frac{U - E_a}{r_a}. \quad (4.16)$$

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:

$$I_a = \frac{U - E_a}{r_a + r_p}, \quad (4.17)$$

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.

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:

$$M_1 = 9,55 \cdot P_1 / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 6189 / 2860 = 20,7 \text{ Н·м.}$$

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 4.5) имеет такое же устройство, как и статор асинхронной машины.

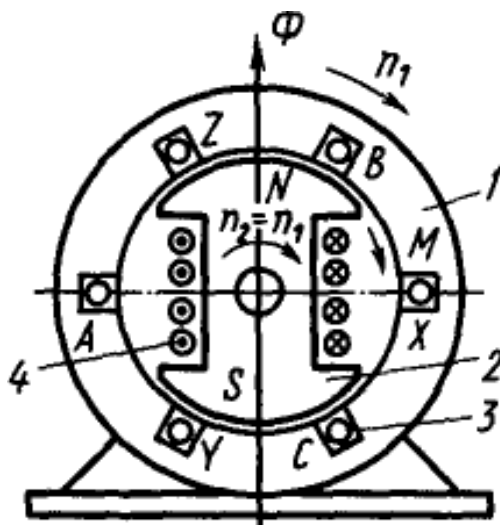


Рисунок 4.5 – Электромагнитная схема синхронной машины

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

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60}. \quad (4.18)$$

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:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (4.19)$$

Из (4.18) и (4.19) следует

$$n_1 = n_2. \quad (4.20)$$

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_G должно быть равно напряжению сети U_C 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, остановок и регулирования скорости вращения.

Для синхронного двигателя справедливы многие электромеханические соотношения, применяемые при расчете асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока: (4.6), (4.11), (4.13).

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 3.

Определить номинальный момент, линейный ток статора, активную и реактивную мощность, потребляемую из сети синхронным двигателем. Номинальные параметры двигателя: $P_{\text{ном}} = 990$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$, $n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин, $\eta_{\text{ном}} = 85$ %.

Решение:

Номинальная угловая скорость ротора:

$$\Omega_{\text{ном}} = 2\pi \cdot n_{\text{ном}} = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1000}{60} = 105 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\Omega_{\text{ном}}} = \frac{990 \cdot 10^3}{105} = 9,43 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

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:

$$P = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{990}{0,85} = 1164,7 \text{ кВт,}$$

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{\text{ном}}) = 1164,7 \cdot 0,75 = 873,5 \text{ кВАр.}$$

2. Задачи

1. Трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие параметры:

$P_{\text{ном}} = 75$ кВт, номинальная частота вращения ротора $n_{\text{ном}} = 735$ 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. ($S_{1\text{ном}} = 95,9$ кВА, $M_{\text{max}} = 1851,6$ Н·м).

2. Четырехполюсный трехфазный асинхронный двигатель включен в трехфазную сеть частотой 60 Гц и вращается с частотой 1746 об/мин. Каково скольжения двигателя в этом режиме? (3%).

3. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, присоединенный к сети напряжением 220 В, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_{\text{ном}} = 20,5$ А. Сопротивление обмотки якоря $R_a = 0,75$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_b = 258$ Ом, механические и магнитные потери составляют 329,3 Вт, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1025$ 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 $I_{\text{пуск}} = 2,5 \cdot I_{\text{ном}}$. ($P_{\text{ном}} = 3,71$ кВт, $\eta_{\text{ном}} = 82,2$ %, $M_{\text{ном}} = 34,6$ Н·м, $I_{\text{пуск}} = 293$ А, $R_p = 3,73$ Ом).

4. Определить номинальный момент, номинальный КПД, активную и реактивную мощность, потребляемую из сети синхронным двигателем. Номинальные параметры двигателя: $P_{\text{ном}} = 4000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.) $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин, $I_{\text{ном}} = 443$ А.

Вопросы к практическому занятию

1. Назовите основные элементы асинхронной машины.
3. Как определить частоту вращения статора асинхронного двигателя?
4. Что такое скольжение?
5. Как определить частоту вращения ротора асинхронной машины?
6. Покажите на механической характеристике асинхронного двигателя критический момент и критическое скольжение.
7. Назовите основные элементы машины постоянного тока.

8. Как определить напряжение на якоре машины постоянного тока в режиме двигателя и в режиме генератора?
9. Как зависит электромагнитный момент от тока якоря в двигателе постоянного тока?
10. Как определить ЭДС якоря через частоту вращения?
11. Зачем включают в цепь якоря добавочные сопротивления при пуске?
12. Назовите основные элементы синхронной машины.
13. Что такое синхронный компенсатор, для чего его применяют?
14. В чем заключаются достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?

Тема: Расчет параметров системы управления электрическими машинами

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть

Вентильный преобразователь переменного тока в постоянный – управляемый выпрямитель – широко используется в современных системах автоматического управления (САУ), в частности в системах вентильного электропривода постоянного тока. Одним из наиболее сложных элементов САУ с точки зрения моделирования является сам управляемый выпрямитель, основным элементом которого является силовой полупроводниковый прибор (СПП) – тиристор.

Работа управляемого выпрямителя (УВ) определяется тремя функциональными элементами: системой импульсно-фазового управления (СИФУ), силовой цепью преобразователя (СЦП), цепью нагрузки преобразователя (ЦНП) – двигателя (рисунок 5.1).

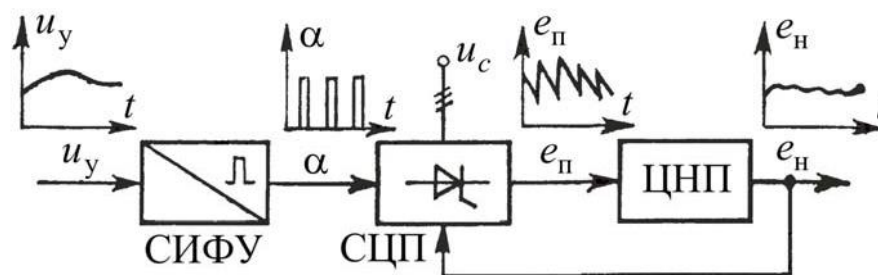


Рисунок 5.1 – Функциональная схема УВ

СИФУ преобразует управляющий сигнал u_y УВ в последовательность импульсов управления, имеющих соответствующий фазовый сдвиг относительно момента естественного открывания тиристора θ_0 , определяемый углом управления α .

Современные СИФУ характеризуются высоким быстродействием, что позволяет их считать безынерционными элементами, имеющими линейные или нелинейные регулировочные характеристики.

Выходное напряжение e_n СЦП формируется синусоидальным напряжением питающей сети u_c . Процессы, протекающие в СЦП, описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений с переменной структурой (числом уравнений) и параметрами, изменение которых происходит периодически в зависимости от фазы работы УВ.

В реальных условиях двигатель постоянного тока (ДПТ) эксплуатируется в основном совместно с полупроводниковыми преобразователями в машинно-вентильных системах, имеющих сложную многоконтурную систему управления. Современные системы управления электропривода предназначены для обеспечения автоматического режима пуска, торможения, реверсирования, регулирования скорости, момента и т.д. Эти системы позволяют сформировать указанные режимы управления желаемым образом и связать их более точно с требованиями технологического процесса, обусловленного работой производственных механизмов.

Различают разомкнутые и замкнутые системы управления. В разомкнутых системах изменение возмущающего воздействия (например, нагрузки на валу двигателя) приводит к изменению ранее заданного режима работы двигателя. В замкнутых системах независимо от состояния возмущающих воздействий можно поддерживать заданный режим работы ЭП. Они являются более сложными, но в то же время более совершенными, чем разомкнутые.

В связи с этим будут рассмотрены только замкнутые системы.

Наибольшее применение получили два типа построения замкнутых систем регулирования:

- с одним общим суммирующим усилителем;
- с n последовательными суммирующими усилителями (система подчиненного регулирования с последовательной коррекцией).

Недостатком системы первого типа является то, что выходной сигнал усилителя зависит сразу от нескольких переменных, что делает практически невозможным регулирование одной переменной независимо от других.

Система подчиненного регулирования состоит из ряда контуров, число которых равно числу регулируемых переменных, причем каждый внутренний контур подчинен следующему по порядку внешнему, таким образом, что заданное значение регулируемой величины внутреннего контура определяется выходным сигналом регулятора следующего по порядку контура. Такая система позволяет осуществлять регулирование одной переменной независимо от других.

В связи с этим далее рассмотрена система подчиненного регулирования с последовательной коррекцией (рисунок 5.2).

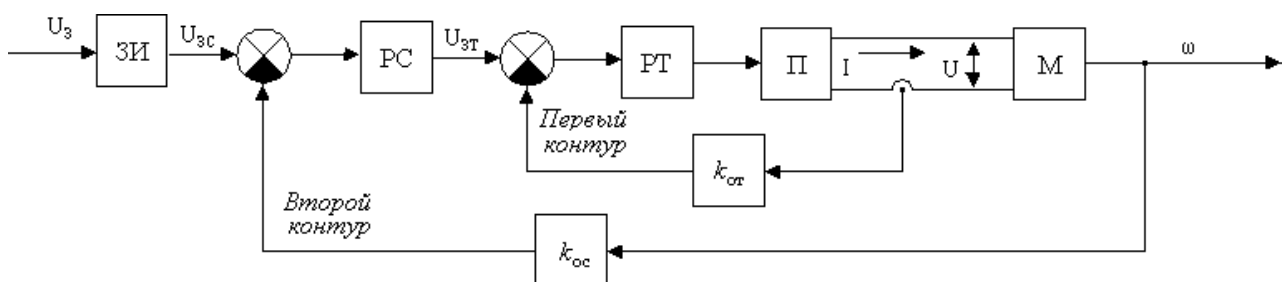


Рисунок 5.2 – Структурная схема системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией

Схема, представленная на рисунке 5.2, имеет два контура регулирования: первый контур – контур регулирования тока якоря двигателя, содержащий регулятор тока РТ, преобразователь П, якорную цепь двигателя и жесткую отрицательную обратную связь по току якоря с коэффициентом передачи $k_{от}$; второй контур – контур регулирования угловой скорости двигателя, содержащий регулятор скорости РС, первый контур, двигатель М и жесткую отрицательную обратную связь по скорости с коэффициентом передачи $k_{ос}$. Задающим сигналом для второго контура является сигнал задания угловой скорости $U_{зс}$, а для первого – сигнал с выхода регулятора скорости $U_{зт}$.

Наиболее часто используется два типа регуляторов: пропорциональный (П-регулятор) и пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Сигнал на выходе П-регулятора пропорционален входному:

$$u_{\text{вых}} = k \cdot u_{\text{вх}}, \quad (5.1)$$

где k определяется параметрами усилителя.

Сигнал на выходе ПИ-регулятора пропорционален входному сигналу и интегралу от входного сигнала по времени:

$$u_{\text{вых}} = k \cdot u_{\text{вх}} + \frac{1}{T_0} \int u_{\text{вх}} \cdot dt, \quad (5.2)$$

где T_0 – постоянная времени регулятора.

Выходной сигнал регулятора тока является управляющим сигналом u_y для УВ.

Наиболее распространенным является синхронный принцип импульсно-фазового управления УВ. Его характеризует такая функциональная связь узлов системы управления (СУ), предназначенных для получения управляющих импульсов, при которой синхронизация управляющих импульсов осуществляется напряжением сети переменного тока.

В схему канала управления тиристором входят генератор опорного напряжения ГОН, нуль-орган НО (компаратор), усилитель-формирователь УФ отпирающих импульсов.

ГОН формирует изменяющееся во времени напряжение синусоидальной, треугольной, пилообразной и других форм. С помощью НО опорное напряжение ГОН сравнивается с управляющим напряжением u_y преобразователя. Когда опорное напряжение достигает напряжения u_y , на выходе НО возникает импульс, который после предварительного усиления и формирования подается в управляющую цепь тиристора преобразователя.

Далее представлены схемы составных частей, используемых в системах регулирования: *повторителя, сумматора, П-регулятора, ПИ-регулятора, компаратора.*

На рисунке 5.3 показана схема *повторителя* сигнала – функциональный узел, в котором входной и выходной сигналы одинаковы по знаку и величине. Коэффициент усиления повторителя $K = 1$. Повторитель используется для согласования высокоомного источника сигнала и низкоомной нагрузки. В случае необходимости повышения входного тока цепи.

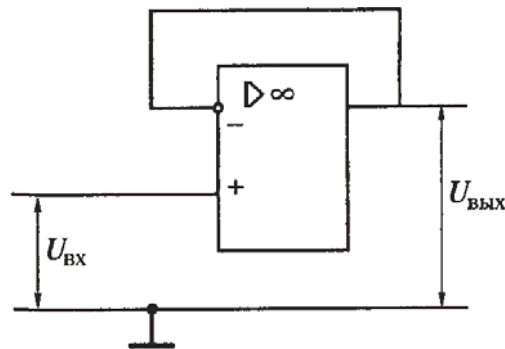


Рисунок 5.3 – Схема повторителя на ОУ

На рисунке 5.4 показана схема двухвходового *инвертирующего сумматора*. Схема сумматора на ОУ позволяет помимо суммирования сигналов, проводить их усиление. Здесь резисторы $R1.1$, $R1.2$ служат совместно с $R2$ для образования отрицательной обратной связи. Кроме того, резисторы $R1.1$ и $R1.2$ служат для взаимной развязки друг от друга источников сигналов. Для каждого источника входное сопротивление сумматора $R_{\text{вх сум}} \approx R1$, выходное сопротивление $R_{\text{вых сумм}} \approx R_{\text{вых}} / 2$.

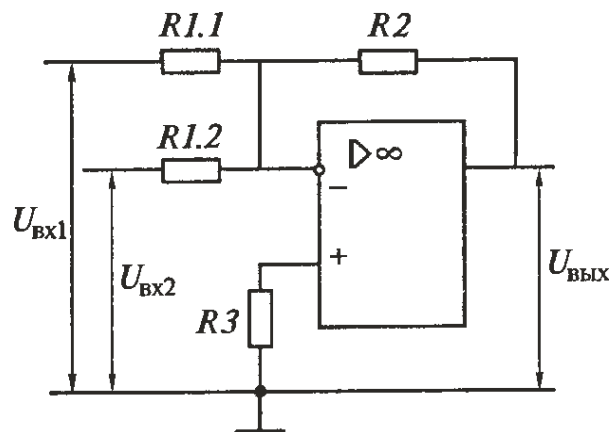


Рисунок 5.4 – Схема сумматора на ОУ

На рисунке 5.5 представлена схема инвертирующего усилителя (П-регулятор). В исходном состоянии напряжение на входе и выходе усилителя равны нулю. Внешние резисторы $R1$, $R2$ образуют цепь ООС, резистор $R3$ используют для компенсации влияния входных токов ОУ, являющихся одной из причин дрейфа выходного напряжения.

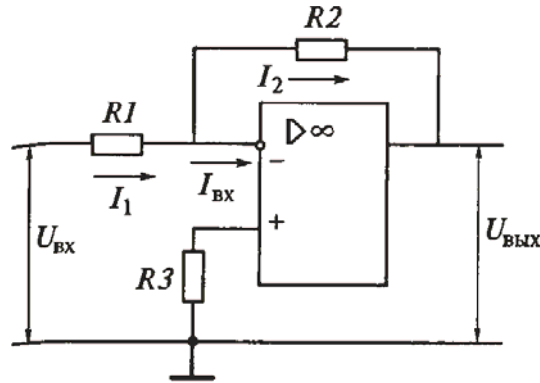


Рисунок 5.5 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ (П-регулятор)

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K = -\frac{R2}{R1}.$$

На рисунке 5.6 показана схема *интегратора* (ПИ-регулятор). В цепь ООС вместо $R2$ включен конденсатор C . Так как для «идеального ОУ» $i_1 = i_2$, $i_1 = U_{вх} / R_1$, $i_2 = -C \cdot \frac{dU_{вых}}{dt}$, то $U_{вых} = -\frac{1}{RC} \int U_{вх} dt$. Входное сопротивление при этом $R_{вх} = R_1$, а выходное сопротивление – $R_{вых.инт} \approx R_{вых ОУ}$.

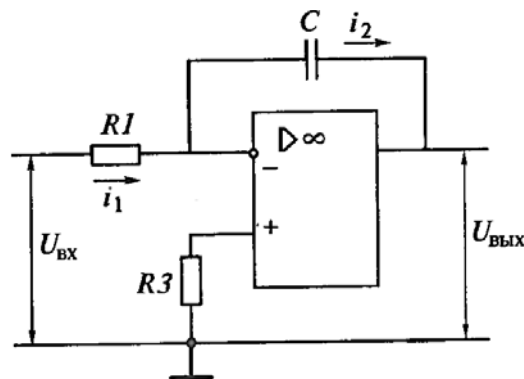


Рисунок 5.6 – Схема интегратора (ПИ-регулятор)

В частном случае, когда на вход интегратора подается импульс постоянного напряжения $U_{вх} = U$ длительностью $t_{и}$, на выходе образуется линейно изменяющееся напряжение $U_{вых} = -Ut_{и} / \tau$, где τ – постоянная

времени цепи обратной связи, $\tau = R_1 C$. Интегратор, работающий в указанном режиме, часто используется в генераторах линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), а также в схемах формирования пилообразного напряжения развертки.

На рисунке 5.7 показана схема компаратора, которая служит для определения момента равенства двух напряжений. Здесь входное синусоидальное напряжение сравнивается с нулевым потенциалом. ОУ использован без обратной связи, что является особенностью данной схемы.

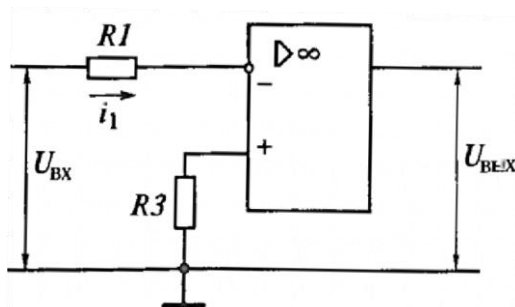


Рисунок 5.7 – Схема компаратора

Напряжение на выходе принимает два крайних значения $U_{\text{вых}} \pm U_{\text{нас}}$, где $U_{\text{нас}}$ – напряжение насыщения ОУ (максимально возможное напряжение на выходе, обычно ниже напряжения питания на 1...2 В). При положительном входном сигнале напряжение на выходе отрицательное. При переходе входного напряжения через нуль выходное напряжение меняет знак.

2. Задачи

1. Определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ сумматора, если параметры $R1.1 = 1 \text{ кОм}$, $R1.2 = 2 \text{ кОм}$, $R2 = 4 \text{ кОм}$ и входное напряжение изменяется по закону $u_1(t) = (1 \cdot \sin(\omega \cdot t)) \text{ В}$, $u_2(t) = (1 + 1 \cdot \sin(\omega \cdot t)) \text{ В}$.

2. Определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ неинвертирующего усилителя. Если параметры $R1 = 1 \text{ кОм}$, $R2 = 4 \text{ кОм}$ и входное напряжение изменяется по закону $u(t) = (1 + 3 \cdot \sin(\omega \cdot t)) \text{ В}$.

3. Определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ интегратора, если параметры $R1 = 1 \text{ кОм}$, $C = 1 \text{ мкОм}$, и входное напряжение изменяется по закону $u_1(t) = (2 \cdot \sin(\omega \cdot t)) \text{ В}$.

Вопросы к практическому занятию

1. Какими функциональными элементами определяется работа управляемого выпрямителя?
2. Для чего используется системой импульсно-фазового управления в управляемом выпрямителе?
3. Какие системы управления электрическими машинами вам известны?
4. Назовите два типа построения замкнутых систем регулирования.
5. Типы регуляторов, используемых в систем регулирования.
6. Какие элементы входят в схему канала управления тиристором управляемого выпрямителя, входящего в систему автоматизированного электропривода?
7. Для чего используется повторитель на базе операционного усилителя?
8. Приведите схему трехвходового инвертирующего сумматора.
9. Приведите схему ПИ- регулятора.

Практическое занятие 6

Тема: Электромагнитная совместимость электронных приборов

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это свойство электронного устройства штатно функционировать в электромагнитном окружении, не воздействуя при этом своим собственным электромагнитным излучением на другие устройства.

Источники помех разделяются на:

- внутренние источники помех;
- внешние источники помех;

Технически обусловленные источники помех разделяются на воздействия созданных и используемых производственных электромагнитных помех (например радиопередающие установки, радары и т. д.) и электромагнитные помехи, возникающие в производственном процессе или в результате сбоя, которые не были созданы для использования (например электрическая дуга на коммутационных контактах, магнитные поля сильного тока и пр.).

Помехами могут быть напряжения, токи, электрические, магнитные и электромагнитные поля, возникающие непрерывно периодически или временно случайными импульсами.

Временные процессы, создающие сильные помехи, возникают в низковольтных сетях, вследствие коммутации индуктивных нагрузок, например электроинструмента, электрических бытовых приборов, люминесцентных ламп.

Воздействие магнитных полей можно уменьшить при помощи:

- экранирования проводников;

– экранирования корпусов (решающую роль играет магнитная проницаемость – у листовой стали слишком низкая, значительно эффективней, например, пермаллой);

– расстояния до источника помех.

Воздействие излучения предотвращается при помощи экранирования проводников и корпусов (клетка Фарадея).

Если приемник помехи находится в непосредственной близости от источника помехи, в так называемой ближней зоне, то он воспринимает квазистатическое поле. В частности, штыревая антенна создает в ближней зоне квазистатическое электрическое поле, а рамочная – квазистатическое магнитное поле. Расстояние R от источника до рассматриваемой точки, когда возможно считать поля квазистатическими, определяется выражением:

$$R \ll \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (6.1)$$

где λ – длина электромагнитной волны.

Волновое сопротивление среды в ближней зоне зависит от расстояния R до источника излучения:

– для высокоомных полей (квазистатическое электрическое поле – излучение штыревых антенн) волновое сопротивление находится по соотношению

$$Z_{ВШ} = Z_0 \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot R} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{R \cdot f}, \quad (6.2)$$

в низкоомных полях (квазистатическое магнитное поле – излучение рамочных антенн) – по соотношению

$$Z_{ВШ} = Z_0 \cdot \frac{2\pi \cdot f}{\lambda} = 7.9 \cdot 10^{-6} \cdot R \cdot f, \quad (6.3)$$

где $Z_0 = 377$ Ом – волновое сопротивление вакуума, f – частота помехи.

На большом расстоянии от антенны приемник находится в так называемой дальней зоне, где на него воздействует переменное электромагнитное поле. В этом случае волновое сопротивление среды во всем пространстве дальней зоны составляет 377 Ом.

Понятие *помехоподавления* характеризует степень защитного воздействия электромагнитного экрана, оно чаще всего указывается в функции частоты в децибелах или неперах это, так называемый, коэффициент экранирования:

$$\mathfrak{E}=20\cdot\lg\left|\frac{E_1}{E_2}\right|, \mathfrak{E}=20\cdot\lg\left|\frac{H_1}{H_2}\right|. \quad (6.4)$$

В переменных электромагнитных полях величины напряженности электрического E и магнитного H полей связаны между собой посредством волнового сопротивления среды $\underline{Z}$:

$$E/H = \underline{Z} = \sqrt{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \mu \cdot \mu_0}. \quad (6.5)$$

Аналитический расчет экранирующего действия электромагнитных экранов для отыскания коэффициента экранирования требует решения уравнений Максвелла для областей внутри и вне экрана, а также в самой его стенке. Однако, этот метод математически трудоемок, поэтому и не получил широкого распространения.

Для быстрых практических оценок Щелкунов разработал простой способ определения коэффициента затухания, который основан на аналогии с распространением электромагнитных волн в электрически длинных двухпроводных линиях. Эти волны являются распространяющимися вдоль проводящих линий ТЕМ-волнами (электромагнитные волны с векторами напряженностей электрического и магнитного полей E и H , ориентированными перпендикулярно к направлению распространения), так что разработанные для них формальные методы нетрудно перенести на плоские волны в свободном пространстве.

Необходимо просто заменить в уравнениях комплексные амплитуды входного и выходного напряжения, входного и выходного тока комплексными напряженностями электрического и магнитного полей.

Общий коэффициент затухания электромагнитного экрана состоит из коэффициента затухания вследствие отражения на граничных плоскостях R , коэффициента затухания из-за поглощения в стенке экрана Π (переход энергии

электромагнитного поля в тепло), корректирующего коэффициента B , учитывающего многократные волны отражения внутри экрана:

$$\dot{Y} = P + \Pi + B. \quad (6.6)$$

Рассмотрим расчет каждого из компонентов в отдельности. Корректирующий коэффициент B , учитывающий многократные отражения внутри экрана может не учитываться, если $\Pi > 10 - 15$ дБ.

Коэффициент затухания вследствие отражения. Этот коэффициент состоит из двух составляющих, они обусловлены двумя граничными плоскостями - снаружи и внутри экрана. При условии, что волновое сопротивление внешней области $Z_{ВШ}$ значительно больше волнового сопротивления материала стенки экрана $Z_{Э}$ большая часть энергии, приходящейся на граничную плоскость снаружи экрана отражается обратно к источнику. Отношение напряженностей электромагнитного поля падающей и прошедшей волн определяется формулой:

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ЭВШ}} = \frac{(Z_{ВШ} + Z_{Э})}{2 \cdot Z_{Э}}. \quad (6.7)$$

Аналогичным образом это отношение определится и на внутренней стенке экрана – на внутреннем пограничном слое. Суммарное влияние отражения можно получить из соотношения:

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ВН}} = \frac{(Z_{ВШ} + Z_{Э})^2}{4 \cdot (Z_{Э} Z_{ВШ})} \quad (6.8)$$

При введении обозначения

$$K = Z_{ВШ} / Z_{Э} \quad (6.9)$$

эта формула принимает вид

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ВН}} = \frac{(1+K)^2}{4 \cdot K}. \quad (6.10)$$

Переходя к логарифмическим характеристикам, получаем выражение для коэффициента затухания вследствие отражения:

$$P_{\partial B} = 20 \cdot \lg \frac{|(1+K)|^2}{4 \cdot |K|}, \quad (6.11)$$

для его определения необходимо знать волновые сопротивления в поле источника помех в поле поглотителя помех и экрана.

Волновое сопротивление в пространстве источника помехи для дальней зоны составляет

$$Z_{ВДЗ} = Z_0 = 377 \text{ Ом}, \quad (6.12)$$

для ближней зоны в высокоомных полях

$$Z_{ВБЗ} = Z_0 \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{r \cdot f}, \quad (6.13)$$

в низкоомных полях

$$Z_{ВНЗ} = Z_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot f \quad (6.14)$$

как видно, зависят от расстояния r от источника помехи до экрана.

Волновое сопротивление стенки экрана в общем случае рассчитывается по известному соотношению

$$Z_{\partial} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu_a}{(\sigma + i \cdot \omega \cdot \varepsilon_a)}}, \quad (6.15)$$

а при условии, что толщина стенки намного больше глубины проникновения, что на практике выполняется всегда, волновое сопротивление рассчитывается как

$$Z_{\partial} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \mu_0}{\sigma}}. \quad (6.16)$$

Выразим теперь коэффициенты затухания вследствие отражения через параметры материала экрана – его проводимость, относительную магнитную проницаемость и частоту излучения помехи. Получаем:

- для дальней зоны

$$P_{\partial B} = 108 - 10 \cdot \lg \frac{\mu \cdot f}{\sigma_r}, \quad (6.17)$$

- электрическое (высокоомное) поле в ближней зоне источника помех

$$P_{\partial B} = 142 - 10 \cdot \lg \frac{\mu \cdot f^3 \cdot r^2}{\sigma_r}, \quad (6.18)$$

- магнитное (низкоомное) поле в ближней зоне источника помех

$$P_{\partial B} = 75 - 10 \cdot \lg \frac{\mu}{f \cdot \sigma_r \cdot r^2}. \quad (6.19)$$

В этих соотношениях r – расстояние от источника помехи, выраженное в метрах; f – частота, выраженная в МГц; σ_r – относительная удельная электропроводность материала стенки экрана, где за базовую принята электропроводность меди:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{5.8 \cdot 10^7}. \quad (6.20)$$

Коэффициенты затухания вследствие поглощения Π описывают экспоненциальное ослабление амплитуды падающей волны при прохождении стенки экрана толщиной d :

$$\frac{E_{\text{ЭВШ}}}{E_{\text{ЭВН}}} = e^{\alpha \cdot d}. \quad (6.21)$$

В логарифмических величинах получаем выражение для коэффициента Π :

$$\Pi_{\partial B} = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{ЭВШ}}}{E_{\text{ЭВН}}}. \quad (6.22)$$

Учитывая, что коэффициент поглощения находится по соотношению $\alpha = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \sigma}$, получаем выражение для коэффициента затухания вследствие поглощения, выраженному в ∂B

$$\Pi_{\partial B} = 131,4 \cdot d \cdot \sqrt{f \cdot \mu \cdot \sigma_r},$$

где μ и σ_r – относительная магнитная проницаемость и относительная удельная электропроводность соответственно, частота f выражена в Гц.

Коррекция коэффициента затухания при многократном отражении волны в стенке экрана определяется коэффициентом B

$$B_{\partial B} = 20 \cdot \lg \left| 1 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} \right|, \quad (6.23)$$

где комплексный коэффициент распространения, для материала стенки экрана определяется как

$$\gamma = (1+i) \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_a \cdot \sigma} . \quad (6.24)$$

2. Задачи

1. Даны параметры плоского экрана: относительная электрическая $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ и магнитная $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \mu$ проницаемости, проводимость $\sigma = 0,105 \cdot 10^6$ См/м, толщина $d = 0,003$ м. Известна частота излучения $f = 0,006$ МГц, напряженность электрического поля $E = 100$ мВ/м вне экрана. Рассчитать по методу полных сопротивлений коэффициенты затухания электромагнитного экрана в ближней зоне на расстоянии равном половине её максимального диаметра, в дальней зоне.

2. Для данных задачи 1 определить величины напряженностей электрического и магнитного полей внутри экрана для ближней и дальней зон.

Вопросы к практическому занятию

1. Что называют электромагнитной совместимостью?
2. Какие источники помех бывают?
3. Как классифицируют технически обусловленные источники помех?
4. Как можно уменьшить воздействие магнитных полей?
5. Как можно уменьшить воздействие излучения?
6. Что понимается под помехоподавлением?
7. Что такое волновое сопротивление?
8. Что такое коэффициент затухания?
9. Как определить общий коэффициент затухания электромагнитного экрана?

Практическое занятие 7

Тема: Расчет параметров слаботочных усилителей электрических сигналов

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть.

Усилитель – устройство, в котором осуществляется увеличение мощности управляющего (входного) сигнала за счет энергии вспомогательного источника питания, причем функциональная связь между выходным и входным сигналами непрерывная и однозначная.

В усилителях, широко применяемых в промышленной электронике, в качестве активных компонентов используют *транзисторы* (биполярные и полевые) и *усилительные интегральные микросхемы (операционные усилители)*. Отметим, что усилители на микросхемах отличаются высокой надежностью, экономичностью, большим быстродействием, имеют малые размеры и массу, высокую чувствительность. Они позволяют усиливать очень слабые электрические сигналы (напряжение порядка 10^{-13} В, токи до 10^{-17} А, мощность порядка 10^{-24} Вт).

По диапазону частот электрических колебаний усилители можно разделить на:

- низкочастотные (УНЧ), работающие в пределах от 20 Гц до 20 кГц;
- высокочастотные (УВЧ), работающие в диапазоне сотен килогерц и выше;
- широкополосные, работающие в очень широкой полосе частот, используемые в устройствах импульсной связи, телевидения и радиолокации;
- избирательные (селективные), или полосовые, работающие в узкой полосе частот;
- усилители постоянного тока (УПТ), используемые в автоматике и телемеханике, измерительной технике и в счетно-решающих устройствах.

В зависимости от характера нагрузки усилители делятся на усилители *напряжения, тока и мощности*. Эти усилители в основном одинаковы по схемотехническим решениям, но отличаются типами применяемых приборов и режимом работы. Отметим, что такое разделение *условно*, так как, в конечном счете, имеет место всегда *усиление мощности*.

На основе нескольких последовательно соединенных усилителей создаются многокаскадные усилители.

Основные параметры усилителей электрических сигналов.

Коэффициент усиления по напряжению (k_u) – это отношение напряжения выходного полезного сигнала ко входному полезному сигналу

$$k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Коэффициент усиления по току

$$k_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$k_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}.$$

Коэффициенты усиления по напряжению и току как правило являются комплексными величинами.

Коэффициент полезного действия представляет собой отношение выходной мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку, к общей мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0}.$$

Входное и выходное сопротивления. Усилитель можно представить в виде активного четырехполюсника. В общем случае входное и выходное сопротивления усилителя являются комплексными величинами. Однако в области средних частот полосы пропускания их можно практически считать активными.

Входное сопротивление можно определить по выражению $R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}.$

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ можно определить на основе двух измерений, а именно, из опыта холостого хода $R_{\text{н}} = 0$, когда можно определить $U_{\text{вых хх}}$, и после включения на выход усилителя известного сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$:

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых хх}} - U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} \cdot R_{\text{н}}.$$

О расчетах слаботочных усилителей электрических сигналов. К слаботочные усилители электрических сигналов относят: однокаскадные усилители на транзисторе, и простейшие усилители на операционных усилителях (инвертирующие и неинвертирующие). Расчет усилителя на транзисторе, во-первых, предназначен для определения режимов работы активных элементов усилителя (в основном транзистора) по постоянному току, что позволяет определить такую рабочую точку, которая располагалась бы в активно (линейной) области его выходных характеристик и позволяла бы усиливать полезный сигнал без искажений во всем диапазоне изменения его амплитуды. Второй расчет связан непосредственно с преобразованием (усилением) полезного входного сигнала и получением качественных показателей усилителя. Для обоих расчетов используются свои схемы замещения, так, в частности, во втором случае может использоваться схема замещения транзистора для малосигнальных параметров, когда транзистор рассматривается как линейный управляемый элемент схемы. Расчеты могут выполняться как путем графических построений, что, естественно, не дает высокой точности расчетов, но отличается наглядностью и трудоемкостью, и аналитически, что, в конечном итоге, позволяет использовать машинные методы расчетов. Отметим, что имеются современные программы схемотехнического моделирования электронных схем, когда на экране дисплея создается схема с указанием параметров ее элементов и после запуска программы на вычисление, она выдает результаты в виде числовых значений, графиков и т. д.

Операционные усилители (ОУ) – это усилители, название которых связано с использованием этих усилителей для моделирования операций.

При анализе схем с ОУ используется понятие «идеальный ОУ», у которого $K = \infty$, $R_{вх} = \infty$, $R_{вых} = \infty$. Эти приближения позволяют сформулировать два правила для *идеального ОУ*:

- $U_{вх.дф} = U_{вых} / \infty = 0$ (так называемый эквипотенциальный нуль, когда потенциалы инвертирующего и неинвертирующего входов одинаковы, но сопротивление между ними очень велико);
- $I_{вх} = U_{вх.дф} / R_{вх} = U_{вх.дф} / \infty = 0$ (ОУ по входам тока не потребляет). Эти правила существенно облегчают расчеты при приемлемом уровне погрешности, которая тем меньше, чем ближе параметры реального ОУ к идеальным, что имеет место у современных интегральных ОУ.

На рисунке 7.1 представлена схема инвертирующего усилителя. В исходном состоянии напряжение на входе и выходе усилителя равны нулю. Внешние резисторы $R1$, $R2$ образуют цепь ООС, резистор $R3$ используют для компенсации влияния входных токов ОУ, являющихся одной из причин дрейфа выходного напряжения.

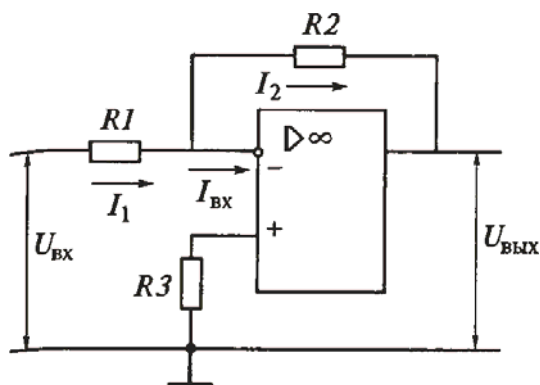


Рисунок 7.1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K = -\frac{R2}{R1}.$$

На рисунке 7.2 представлена схема неинвертирующего усилителя. Здесь входной сигнал подают на неинвертирующий вход ОУ, сигнал на выходе имеет тот же знак.

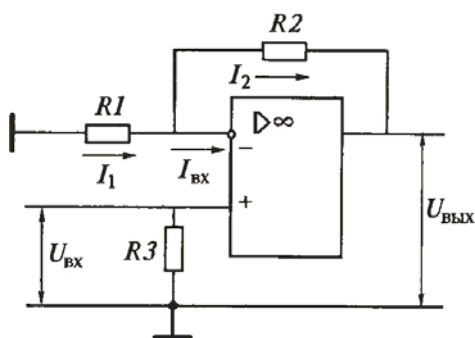


Рисунок 7.2 – Схема неинвертирующего усилителя на ОУ

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K = 1 + \frac{R2}{R1}.$$

Усилители на ОУ могут использоваться как самостоятельно, так и в составе многокаскадных усилителей. Существует ряд усилительных схем на ОУ, используемых в системах управления.

2. Задачи

1. Для усилительного каскада, схема которого приведена на рисунке 7.3, определить рабочую точку транзистора, т.е. определить соответствующие значения I_K и $U_{КЭ}$. Известны параметры $R_1 = 39 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_H = 10 \text{ кОм}$, $R_Э = 3,9 \text{ кОм}$, $\beta = 100$, $U_{БЭ} = 0,6 \text{ В}$, $I_{КБ0} = 0$ и $U = 12 \text{ В}$.

Указание. Сначала следует определять I_K затем $U_{КЭ}$ с применением закона Кирхгофа: поскольку задано, что $I_{КБ0} = 0$, то можно считать, что $I_K = \beta \cdot I_B$. Если в процессе расчетов встретиться сочетание вида $\beta + 1$, то можно принять, что $\beta + 1 \approx \beta$.

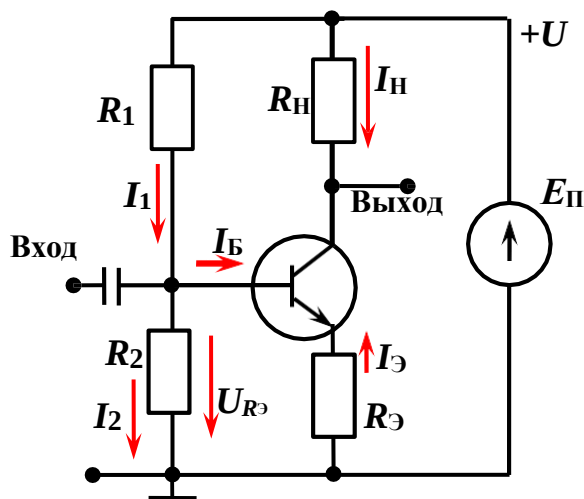


Рисунок 7.3

2. Для схемы на рисунке 7.4 определить ток коллектора I_K и напряжение $U_{КЭ}$, если $R_K = 6,8 \text{ кОм}$, $R_1 = 390 \text{ кОм}$, $U = 12 \text{ В}$, $\beta = 80$, $U_{БЭ} = 0,6 \text{ В}$. Принять $I_{КБ0} = 0$. Указание. Необходимо сначала рассчитать ток I_K . Принять $\beta + 1 \approx \beta$.

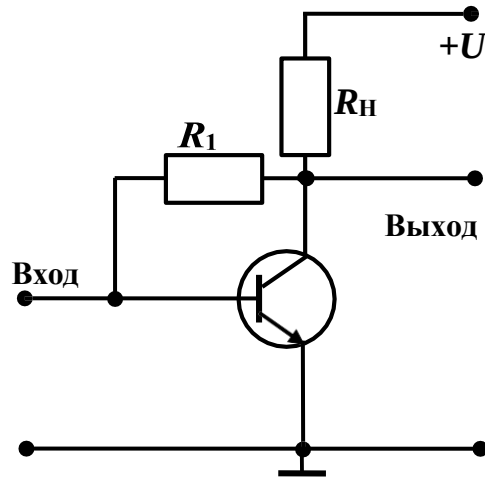


Рисунок 7.4

3. На рисунке 7.5 приведена схема усилительного каскада с общим эмиттером на транзисторе ГТ322А. Рассчитать сопротивление резистора R_B , при котором рабочая точка в режиме покоя усилителя будет находиться на середине линейных участков входной и переходной характеристик, если $E_K = 10 \text{ В}$ и $R_K = 1 \text{ кОм}$. Определить коэффициенты усиления по напряжению k_U , по току k_I , по мощности k_P , а также входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилительного каскада. Входная и выходные характеристики транзистора ГТ322А приведены на рисунке 7.6. Значения его h -параметров: $h_{11} = 330 \text{ Ом}$, $h_{21} = 56$, $h_{22} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ См}$.

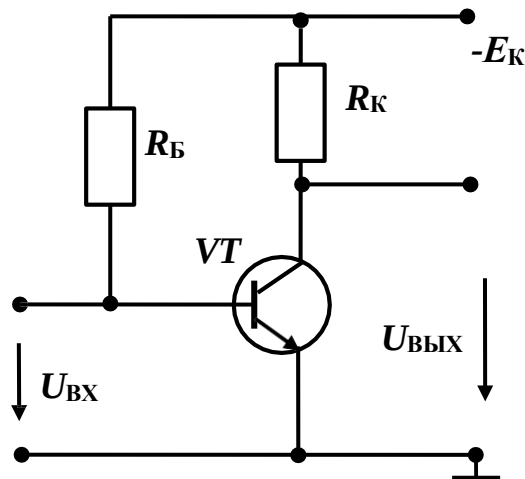


Рисунок 7.5

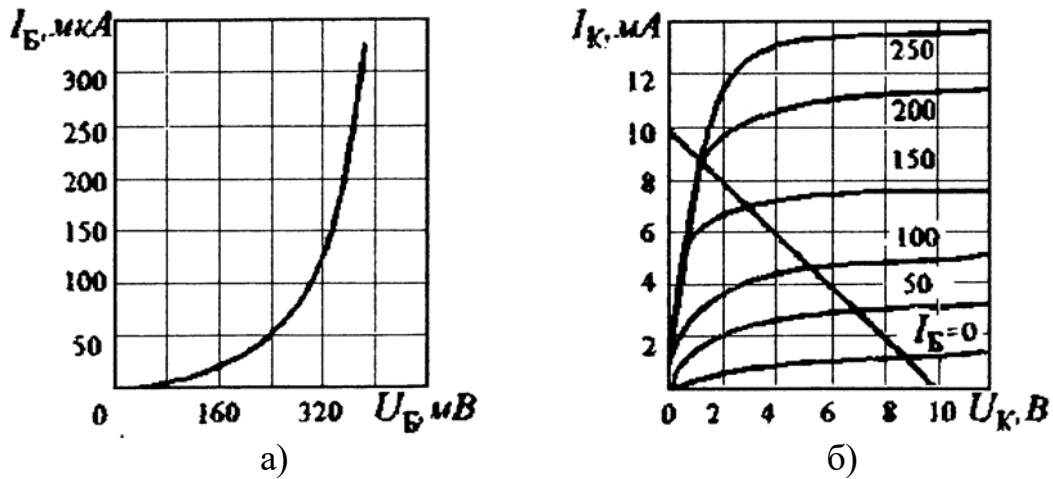


Рисунок 7.6

4. Определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ неинвертирующего и инвертирующего усилителя. Если параметры $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 2 \text{ кОм}$ и входное напряжение изменяется по закону $u(t) = (1 + 5 \cdot \sin(\omega \cdot t)) \text{ В}$.

Вопросы к практическому занятию

1. Что собой представляет усилитель электрических сигналов?
2. Приведите основные параметры усилителей электрических сигналов?
3. В чем заключается расчет усилителя на транзисторе по постоянному току?
4. Что собой представляют входные и выходные характеристики транзистора?
5. В чем заключается расчет усилителя на транзисторе по переменному току?
6. Какие методы расчета усилителя на транзисторе вам известны?
7. Назовите основные достоинства и недостатки различных методов расчета усилителей на транзисторе.
8. Что означает определить положение рабочей точки усилителя на транзисторе?
9. Что собой представляет операционный усилитель?
10. Приведите основные параметры операционных усилителей?
12. Как определяется коэффициент усиления инвертирующего усилителя?
13. Как определяется коэффициент усиления неинвертирующего усилителя?

Практическое занятие 8

Тема: Основы алгебры логики

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть.

Логическими сообщениями называются такие сообщения, истинность или ложность которых может быть оценена однозначно. Например: «Генератор включен». Каждое логическое сообщение может быть заменено математическим эквивалентом, *логической функцией*. Логическая функция $A=1$, если логическое сообщение истинно (например, «Генератор включен», если он действительно включен); $A=0$, если это сообщение ложное (генератор на самом деле выключен). Таким образом, логические функции в отличие от обычных функций принимают только два значения: 0 и 1.

При описании работы устройств автоматического управления, порядка проведения вычислительных работ, взаимосвязи физических явлений мы широко пользуемся логическими сообщениями. Но нам важны не только логические сообщения, но и связи между ними. Например, мы говорим: «Генератор включен, если включен тумблер на пульте оператора и включена блокировка защиты». Для математического описания связей между логическими сообщениями и функциями вводят *логические операции*. Рассмотрим три основные логические операции.

1. Операция НЕ (логическое отрицание или инверсия).

Логическое отрицание от функции A обозначается $\bar{A}$ (говорится «не A ») и определяется таблицей истинности (таблица 8.1), которая отражает связь между A и $\bar{A}$.

Таблица 8.1 – Таблица истинности операции НЕ

A	$\bar{A}$
0	1
1	0

Пример. Функция A : «Включен первый генератор». Функция $\bar{A}$: «Первый генератор не включен».

Логические операции могут быть реализованы в виде электрических схем, называемых *логическими элементами*. На рисунок 8.1 а приведено обозначение логического элемента НЕ; временные диаграммы сигналов и пример реализации элементов НЕ изображена на рисунке 8.1 б.

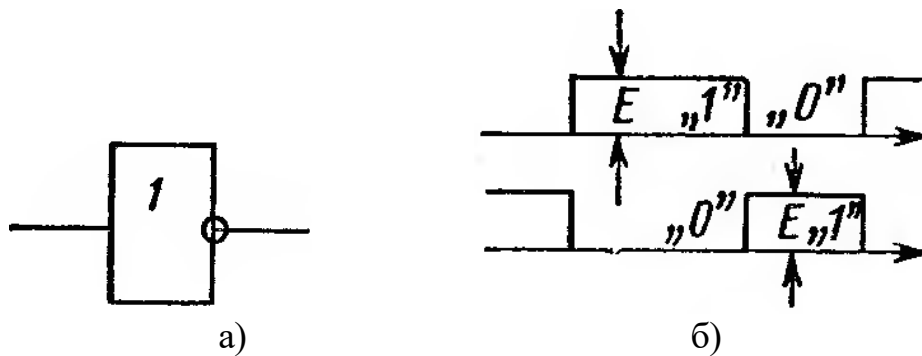


Рисунок 8.1

2. *Операция ИЛИ* (логическое сложение или *дизъюнкция*) обозначается в случае двух независимых аргументов $F = A \vee B$ либо $F = A + B$ (читается « A или B ») и определяется таблицей истинности (таблица 8.2). Операцию ИЛИ можно выполнить для трех и более независимых аргументов. Функция $F = 1$, если хотя бы одна из независимых переменных равна единице.

Таблица 8.2 – Таблица истинности операции ИЛИ

A	B	$F = A + B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логическая операция ИЛИ имеет тот же смысл, что и в обыденной речи. Например: «Двигатель можно включить ключом на пульте оператора *или* по команде с ЭВМ». На рисунке 8.2 а приведено обозначение логического элемента ИЛИ, временные диаграммы сигналов на входе и выходе элемента рисунке 8.2 б.

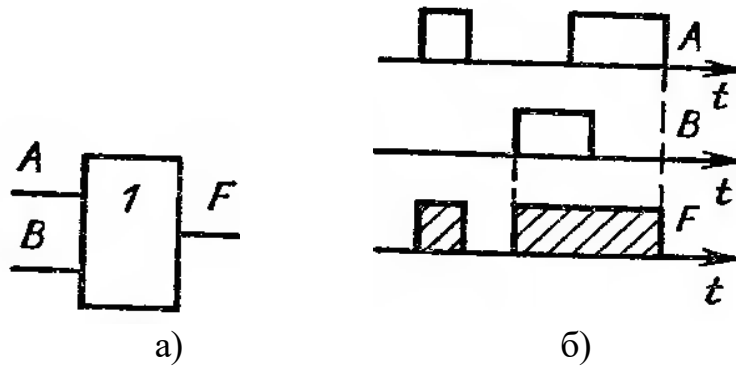


Рисунок 8.2

3. *Операция И* (логическое умножение или *конъюнкция*) обозначается $F=AB$ либо $F = A \wedge B$ (читается «*A и B*») и определяется таблицей истинности (таблица 8.3). Операцию логического умножения можно распространить на три и более независимых аргументов. Функция $F = 1$ только тогда, когда все независимые переменные единичны.

Таблица 8.3 – Таблица истинности операции И

A	B	$F = A \wedge B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логическая операция И имеет тот же смысл, что и в обыденной речи. Например: «Двигатель включен, если включен выключатель на пульте *и* включена система охлаждения двигателя». На рисунке 8.3 а приведено обозначение элемента И, временные диаграммы сигналов на входе и выходе элемента (рисунок 8.3).

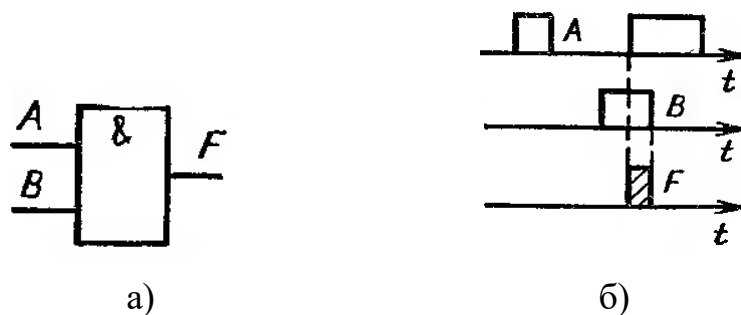


Рисунок 8.3

Алгебра логики является аналогом обычной алгебры. Ее особенность заключается в том, что аргументы и функции принимают только два значения: 0 и 1. Алгебра логики выполняет следующие функции:

1) позволяет математически записывать логические сообщения и связи между ними, что необходимо для определения порядка и принципа работы устройства;

2) позволяет реализовать логические уравнения в виде логических схем, т. е. переходить от аналитического описания процесса к его схемной реализации в виде *логического автомата*;

3) позволяет проводить реализацию логических автоматов в оптимальном виде (минимальное число элементов, их однородность, надежность функционирования и т. д.).

Порядок действий в алгебре логики следующий: сначала выполняется операция НЕ, затем И и наконец ИЛИ. Как и в обычной алгебре, для изменения порядка действий используются скобки. Не следует забывать, что операций вычитания и деления в алгебре логики нет. Справедливы переместительный и сочетательный законы:

$$\begin{aligned} A + B + C &= A + C + B = B + A + C, \\ A \cdot B \cdot C &= A \cdot C \cdot B = B \cdot A \cdot C, \\ A + B + C &= A + (B + C) = (A + B) + C, \\ A \cdot B \cdot C &= A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C. \end{aligned}$$

Для осуществления операций над логическими выражениями пользуются рядом *тождеств*:

$$\begin{aligned} 1) A + A &= A; & 5) A \cdot A &= A; \\ 2) A + \bar{A} &= 1; & 6) A \cdot \bar{A} &= 0; \\ 3) A + 0 &= A; & 7) A \cdot 0 &= 0; \\ 4) A + 1 &= 1; & 8) A \cdot 1 &= A; \\ 9) \bar{\bar{A}} &= A; \\ 10) A + A \cdot B + A \cdot C &= A; \\ 11) A + \bar{A} \cdot B &= A + B. \end{aligned}$$

Следующие тождества называются формулами де Моргана:

$$12) \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} = \overline{A \cdot B \cdot C}; \quad 13) \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} = \overline{A + B + C}.$$

2. Задачи

1. Требуется создать логическое устройство для подключения напряжения к двигателю. Двигатель может быть включен непосредственно ($A = 1$) или по команде с диспетчерского пункта ($B = 1$). Агрегат работает только тогда, когда напряжение питания $U \geq U_{\min}$ (логическая функция $C = 1$).

2. Найти логическую функцию питания нагрузки Н2 (Рисунок 8.4) и создать логическое устройство. Работа генератора Г1 – это $A = 1$, работа генератора Г2 – это $B = 1$. Линии между Г1 и Н2 – это $C = 1$, Г2 и Н1 – это $D = 1$, Н1 и Н2 – это $E = 1$.

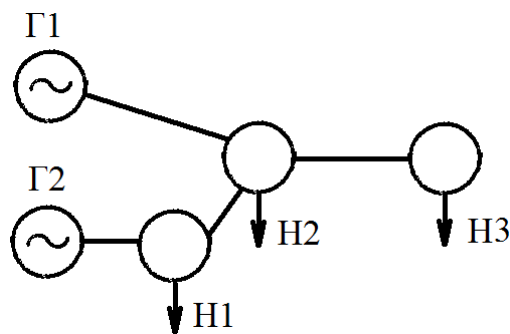


Рисунок 8.4

3. Найти логическую функцию питания нагрузки Н3 от генератора Г1 (Рисунок 8.4). Работа генератора Г1 – это $A = 1$. Линии между Г1 и Н2 – это $B = 1$. Линии между Н1 и Н2 – это $C = 1$.

Вопросы к практическому занятию

1. Что такое логическая функция и какие значения она может принимать?
2. Что понимается под логическими операциями? Назовите их.
3. Поясните, что такое таблица истинности.
4. Что собой представляют логические элементы?
5. Что такое алгебра логики и каков порядок выполнения логических операций?
6. Каких операций нет в алгебре логики?
7. Какие законы алгебры логики вам известны?

**Тема: Расчет выпрямителей, стабилизаторов напряжения и тока
различного типа**

Цель: Формирование у студента компетенции ОПК-6, ОПК-8.

1. Теоретическая часть.

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. Основные разновидности схем преобразователей переменного напряжения в постоянное, *называемых выпрямителями* представлены на рисунке 9.1.

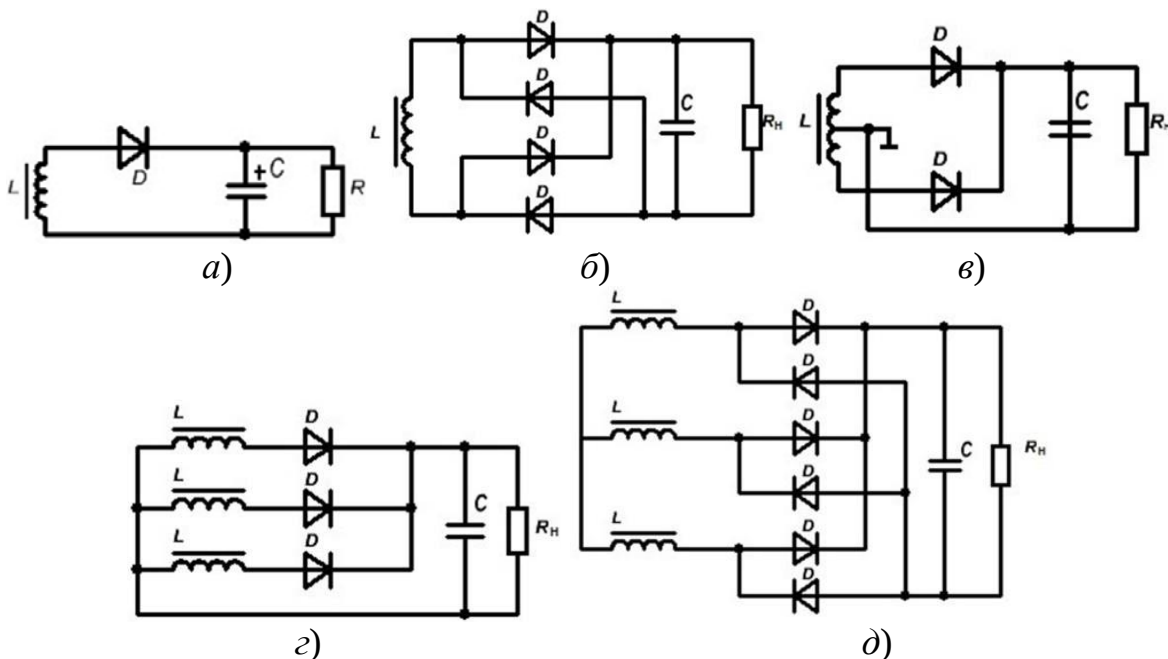


Рисунок 9.1 – Схемы выпрямителей: а) однополупериодный; б) двухполупериодный мостовой; в) двухполупериодный, с серединой точки; г) трехфазный однотактный; д) трехфазный мостовой

Существуют также *управляемые выпрямители* в которых вместо диодов используются управляемые тиристоры. Такие выпрямители совместно с системами управления применяются в автоматизированных электроприводах.

Однополупериодный выпрямитель. Однополупериодный выпрямитель (рисунок 9.2 а) состоит из трансформатора, ко вторичной обмотке которого последовательно присоединены диод VD и нагрузочный резистор R_H .

Для упрощения анализа работы выпрямителей трансформатор и диод считают идеальными, т.е. принимают следующие допущения: у трансформатора активное сопротивление обмоток, а у диода прямое сопротивление равны нулю; обратное сопротивление диода равно бесконечности; в трансформаторе отсутствуют потоки рассеяния. При таких допущениях с подключением первичной обмотки трансформатора к сети переменного синусоидального напряжения во вторичной обмотке будет наводиться синусоидальная ЭДС (рисунок 9.2 б).

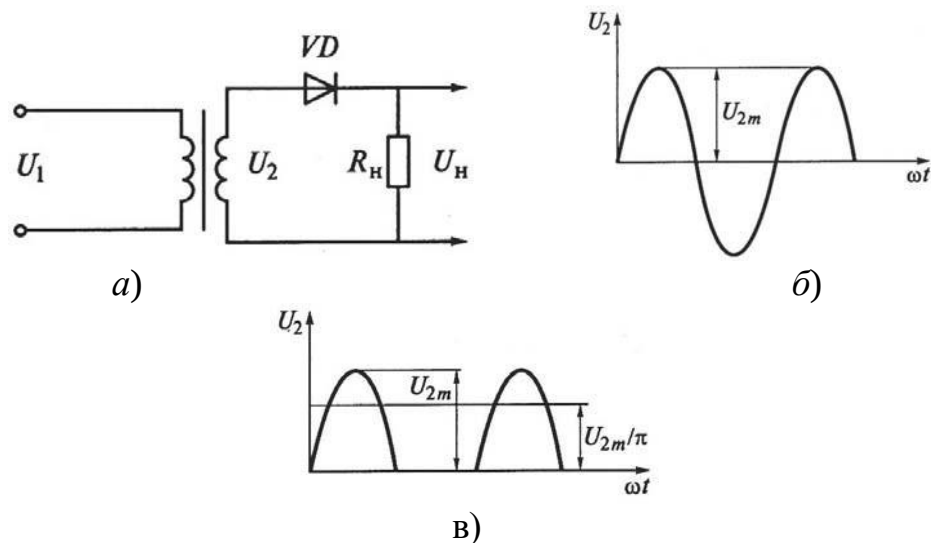


Рисунок 9.2 – Схема и напряжения однополупериодного выпрямителя

Работу выпрямителя рассматривают с помощью временных диаграмм (рисунок 9.2 б, в). В первый полупериод, т.е. в интервале времени $0 - T/2$, диод открыт и в нем появляется ток i_{VD} , а в нагрузочном резисторе – ток i_H , причем $i_{VD} = i_H$. Падение напряжения на диоде $u_{VD} = 0$. В интервале времени $T/2 - T$ диод закрыт, ток $i_{VD} = i_H = 0$, а к запертому диоду прикладывается обратное напряжение U_{2m} т.е. $u_{VD} = U_{2m}$, тогда $U_{обр.макс} = U_{2m} = U_2 \cdot \sqrt{2}$, где U_2 – действующее значение напряжения во вторичной обмотке.

Основными электрическими параметрами однополупериодного выпрямителя являются:

- средние значения выпрямленного тока и напряжения I_{Hcp} и U_{Hcp} ;
- мощность нагрузочного устройства $P_{Hcp} = U_{Hcp} \cdot I_{Hcp}$;
- амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения $U_{осн\ m}$;
- коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $p = \frac{U_{осн\ m}}{U_{Hcp}}$;
- коэффициент полезного действия $\eta = \frac{P_{Hcp}}{P_{Hcp} + P_{VD} + P_{тр}}$,

где $P_{тр}$ – мощность потерь в трансформаторе, а P_{VD} – мощность потерь в диодах.

В однополупериодном выпрямителе (рисунок 9.2):

$$U_{Hcp} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega t = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} \approx 0.45 \cdot U_2, \quad (9.1)$$

$$I_{Hcp} = \frac{U_{Hcp}}{R_H}. \quad (9.2)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi \cdot U_{Hcp}}{\sqrt{2} \cdot R_H} \approx 2.22 \cdot I_{Hcp}. \quad (9.3)$$

Коэффициент пульсаций можно получить из разложения в ряд Фурье выходного напряжения однополупериодного выпрямителя:

$$u_H = \frac{U_{Hm}}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{2}{3} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - \frac{2}{15} \cdot \cos(4 \cdot \omega \cdot t) + \dots \right),$$

$$p = \frac{U_{осн\ m}}{U_{Hcp}} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_{Hm}}{\pi}}{\frac{U_{Hm}}{\pi}} = \frac{\pi}{2} \approx 1.57.$$

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота. Недостатками этого выпрямителя являются: большой коэффициент пульсаций, малые значения выпрямленного тока и напряжения. Вместе с тем, следует обратить внимание еще на один недостаток однополупериодного

выпрямителя. Ток имеет постоянную составляющую, которая вызывает подмагничивание сердечника трансформатора, из-за чего уменьшается магнитная проницаемость сердечника, что в свою очередь снижает индуктивность обмоток трансформатора. Это приводит к росту тока холостого хода трансформатора, а, следовательно, к снижению КПД всего выпрямителя.

Диод в выпрямителе является основным элементом, поэтому диоды должны соответствовать основным электрическим параметрам выпрямителей. При выборе типа диодов необходимо знать:

- среднее значение прямого тока $I_{\text{пр ср}} = I_{\text{Н ср}}$;

- максимальное обратное напряжение на диоде $U_{\text{обр.макс}}$. Для надежной работы диодов в выпрямителях требуется, чтобы каталожные параметры превышали рассчитанные значения примерно на 30%. Отметим, что при выпрямлении напряжения, амплитудное значение которого превышает $U_{\text{обр.макс}}$ для одного диода, можно включать последовательно два или несколько однотипных диодов. Однако эти диоды должны быть зашунтированы сопротивлением, примерно равным $R_{\text{ш}} \approx (0.1..0.2) \cdot R_{\text{обр.}}$.

Промышленность выпускает полупроводниковые диодные столбы (например, КЦ 106, КЦ 201). Выпрямительный столб – это группа последовательно соединенных диодов, помещенных в общий корпус. Такие столбы выдерживают напряжения $U_{\text{обр.макс}}$ свыше 15 кВ.

Двухполупериодный выпрямитель. Двухполупериодные выпрямители бывают двух типов: мостовыми и с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора. Эти выпрямители являются более мощными, чем однополупериодные, так как с их помощью нагрузочные устройства используют для своего питания оба полупериода напряжения сети. Они свободны от недостатков, свойственных однополупериодным выпрямителям. Однако это достигается за счет усложнения схем двухполупериодных выпрямителей.

Наибольшее распространение получил *двухполупериодный мостовой выпрямитель* (рисунок 9.3 а). Он состоит из трансформатора и четырех диодов, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подсоединяется вторичная обмотка трансформатора, а к другой – нагрузочный резистор R_H . Каждая пара диодов $VD1, VD4$ и $VD2, VD3$ работает поочередно.

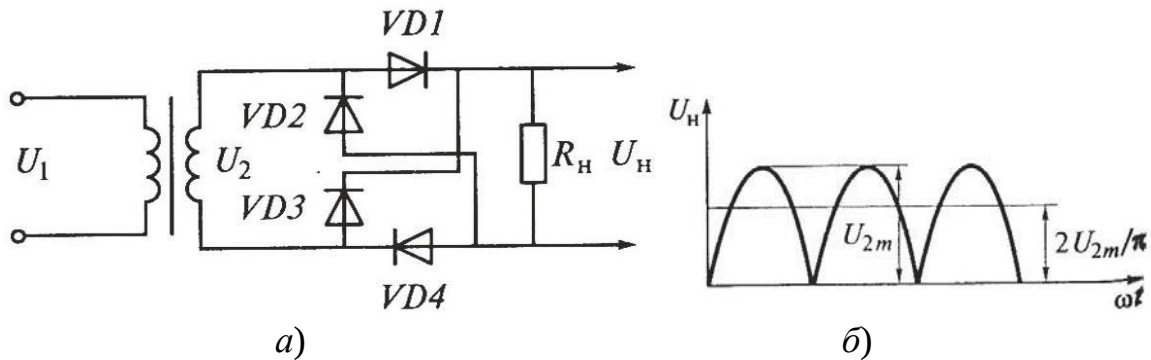


Рисунок 9.3 – Схема и выходное напряжение мостового двухполупериодного выпрямителя

Диоды $VD1, VD4$ открыты в первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 (интервал времени $0 - T/2$). При этом в нагрузочном резисторе R_H появляется ток i_H . В этом интервале диоды $VD2, VD3$ закрыты.

В следующий полупериод напряжения вторичной обмотки (интервал времени $T/2 - T$) диоды $VD2, VD3$ открыты, а диоды $VD1, VD4$ закрыты. В оба полупериода через нагрузочный резистор R_H протекает ток, имеющий одно и то же направление.

Анализ временных диаграмм позволяет получить выражения для средних значений выпрямленных напряжений и токов:

$$U_{H\text{cp}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin(\omega \cdot t) d\omega t = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2}{\pi} \approx 0,9 \cdot U_2, \quad (9.4)$$

$$I_{H\text{cp}} = \frac{U_{H\text{cp}}}{R_H}.$$

Средний ток каждого диода:

$$I_{VD\text{cp}} = \frac{I_{H\text{cp}}}{2}.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi \cdot U_{H\text{ср}}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot R_H} \approx 1,11 \cdot I_{H\text{ср}}. \quad (9.5)$$

Максимальное обратное напряжение на диодах

$$U_{\text{обр.макс}} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \frac{\pi \cdot U_{H\text{ср}}}{2} \approx 1,57 \cdot U_{H\text{ср}}. \quad (9.6)$$

Максимальный прямой ток диода

$$I_{VD\text{ макс}} = \frac{U_{2m}}{R_H} = \frac{\pi \cdot U_{H\text{ср}}}{2 \cdot R_H} \approx \frac{1,57 \cdot U_{H\text{ср}}}{R_H}. \quad (9.7)$$

Коэффициент пульсаций можно получить из разложения в ряд Фурье выходного напряжения двухполупериодного выпрямителя:

$$u_H = \frac{2 \cdot U_{Hm}}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - \frac{2}{15} \cdot \cos(4 \cdot \omega \cdot t) + \dots \right),$$

$$p = \frac{U_{\text{осн}m}}{U_{H\text{ср}}} = \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot U_{Hm}}{\pi}}{\frac{2 \cdot U_{Hm}}{\pi}} = \frac{2}{3} \approx 0,67.$$

Частота основной гармоники $2 \cdot \omega$.

Анализ приведенных соотношений показывает, что при одинаковых значениях параметров трансформаторов и сопротивления R_H мостовой выпрямитель по сравнению с однополупериодным имеет следующие преимущества: средние значения выпрямленного тока $I_{H\text{ср}}$ и напряжения $U_{H\text{ср}}$, в 2 раза больше, а пульсации значительно меньше.

В то же время максимальное обратное напряжение на каждом из закрытых диодов, которые по отношению к зажимам вторичной обмотки включены параллельно, имеет такое же значение, что и в однополупериодном выпрямителе, т.е. $U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2$. Все эти преимущества достигнуты за счет увеличения числа диодов в 4 раза, что является основным недостатком мостового выпрямителя.

Промышленность выпускает полупроводниковые выпрямительные блоки, в которых диоды соединены по мостовой схеме.

Стабилизаторов напряжения и тока различного типа.

Стабилизатор напряжения – преобразователь электрической энергии, позволяющий получить на выходе напряжение, находящееся в заданных пределах при значительно больших колебаниях входного напряжения и сопротивления нагрузки.

В зависимости от расположения элемента с изменяемым сопротивлением линейные стабилизаторы делятся на два типа. Последовательный: регулирующий элемент включен последовательно с нагрузкой. Параллельный: регулирующий элемент включен параллельно нагрузке.

В зависимости от способа стабилизации:

Параметрический: в таком стабилизаторе используется участок ВАХ прибора, имеющий большую крутизну.

Компенсационный: имеет обратную связь. В нём напряжение на выходе стабилизатора сравнивается с эталонным, из разницы между ними формируется управляющий сигнал для регулирующего элемента.

Параллельный параметрический стабилизатор на стабилитроне (рисунок 9.4).

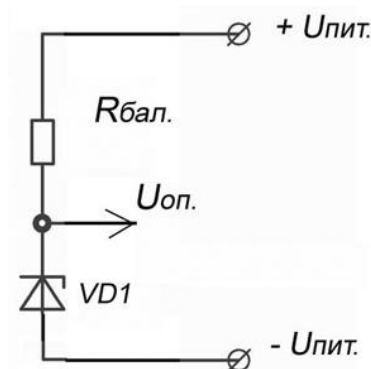


Рисунок 9.4 – Параметрический стабилизатор на стабилитроне

Рассмотрим работу параметрический стабилизатор на стабилитроне на *примере*.

Допустим, $U_{пит}$ изменяется от 18 до 36 Вольт. Используется стабилитрон 2С139А. Рассчитаем балластное сопротивление $R_{бал.}$, которое определяется исходя из минимальной величины $U_{пит.}$, при этом следует задаться минимальным током стабилитрона $I_{стаб. min.}$

Из справочных данных следует что рабочий диапазон токов стабилитрона лежит в пределах 3–70 мА. Номинальный ток – 10 мА. Подбираться слишком близко к нижнему пределу не стоит, так как при этом слишком сильно возрастает $R_{ст.}$. Определимся с минимальным током стабилитрона равным 7 мА.

$$\text{Тогда: } R_{бал.} = (U_{пит. \min} - U_{стаб.}) / I_{стаб. \min} = (18 - 3.9) / 7 = 2,014 \text{ кОм.}$$

Ближайшее значение 2 кОм. При $R_{бал.} = 2 \text{ кОм}$ и дельта $U_{пит.} = 18 \text{ В}$, дельта $U_{оп.}$ составит 0,53 В. Разделив дельту на номинальное напряжение стабилитрона, определим величину нестабильности напряжения такого источника опорного напряжения (ИОН): $0,53 / 3,9 = 0,135$. Т.е. нестабильность ИОН будет равна 13,5%. Понятно, что напряжение на выходе стабилизатора напряжения будет изменяться по такому же закону. И его нестабильность так же составит 13,5%.

Ток, протекающий через стабилитрон, можно вычислить по следующей формуле:

$$\Delta I_{стаб.} = (U_{пит. \max} - U_{пит. \min}) / R_{бал.} = (36 - 18) / 2000 = 9 \text{ мА.}$$

Изменение тока составило 129% так как: $\Delta I_{стаб.} / I_{стаб. \min} = 9 / 7 = 1,29$.

В случае если рассматриваемая схема стабилизации напряжения не отвечает необходимым требованиям, тогда используют схемы на рисунке 9.5.

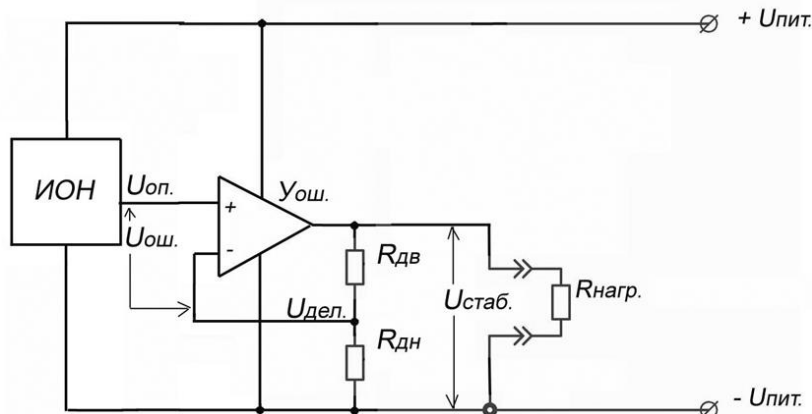


Рисунок 9.5 – Функциональная схема стабилизатора напряжения. Обозначения в схеме: ИОН - источник опорного напряжения; Уош. – усилитель ошибки; $U_{оп.}$ – опорное напряжение; $U_{дел.}$ – напряжение снимаемое с делителя подключенного к выходному напряжению стабилизатора напряжения; $U_{ош.}$ – напряжение ошибки, оно вычисляется как $U_{оп.} - U_{дел.}$.

Стабилизатором тока называют устройство, которое способно поддерживать в нагрузке неизменный ток при изменении сопротивления нагрузки и напряжения на входе всей схемы.

Стабилизацию постоянного тока можно производить с помощью различных схем. Простейшая для понимания и расчёта практическая схема стабилизатора тока представлена на рисунке 9.6.

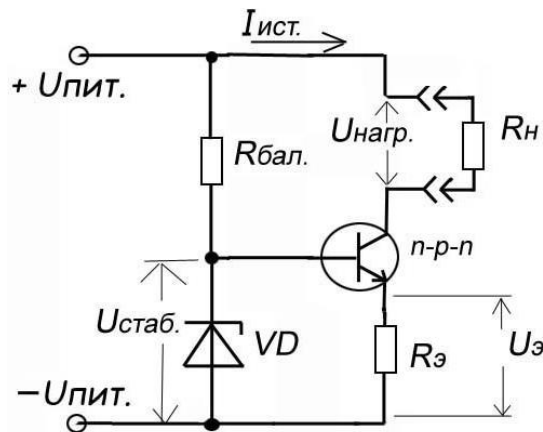


Рисунок 9.6 – Практическая схема простого стабилизатора тока на биполярном транзисторе

В схеме стабилизатора тока транзистор включен по схеме с общим коллектором (эмиттерный повторитель). Эмиттерным повторителем она названа за то, что изменение напряжения на эмиттере ($U_{\text{э}}$) повторяет изменение напряжения на базе, в нашем случае это $U_{\text{стаб.}}$. Повторяет именно изменение напряжения, а не само напряжение, так как существует падение напряжения на эмиттерном переходе транзистора. Поэтому в случае усилителя постоянного тока напряжение $U_{\text{э}}$ будет определяться по формуле:

$$U_{\text{э}} = U_{\text{стаб.}} - U_{\text{б}}, \quad (8.8)$$

где $U_{\text{б}}$ – падение напряжения на переходе база - эмиттер транзистора.

Поскольку $U_{\text{э}}$ зависит только от напряжения стабилизации стабилитрона и от напряжения $U_{\text{б}}$, а значения этих напряжений можно считать константами, то в идеальном случае $U_{\text{э}}$ не будет зависеть от изменения $U_{\text{пит.}}$ и $R_{\text{н}}$.

Ток, протекающий через $R_{\text{э}}$, является одновременно и током протекающим через нагрузку, то есть $I_{R_{\text{э}}} = I_{\text{ист.}}$. Соответственно, $I_{\text{ист.}}$ вычисляется по формуле:

$$I_{\text{ист.}} = U_{\text{э}} / R_{\text{э}}, \quad (8.9)$$

где U_z и R_z константы, следовательно, и $I_{ист.}$ – также константа.

На самом деле стабильность напряжения U_z зависит от того, насколько стабилитрон VD чувствителен к изменению протекающего через него тока и к воздействию окружающей температуры.

Не всегда используя представленную схему можно добиться необходимой стабилизации тока. Для это используют схемы на рисунке 9.7.

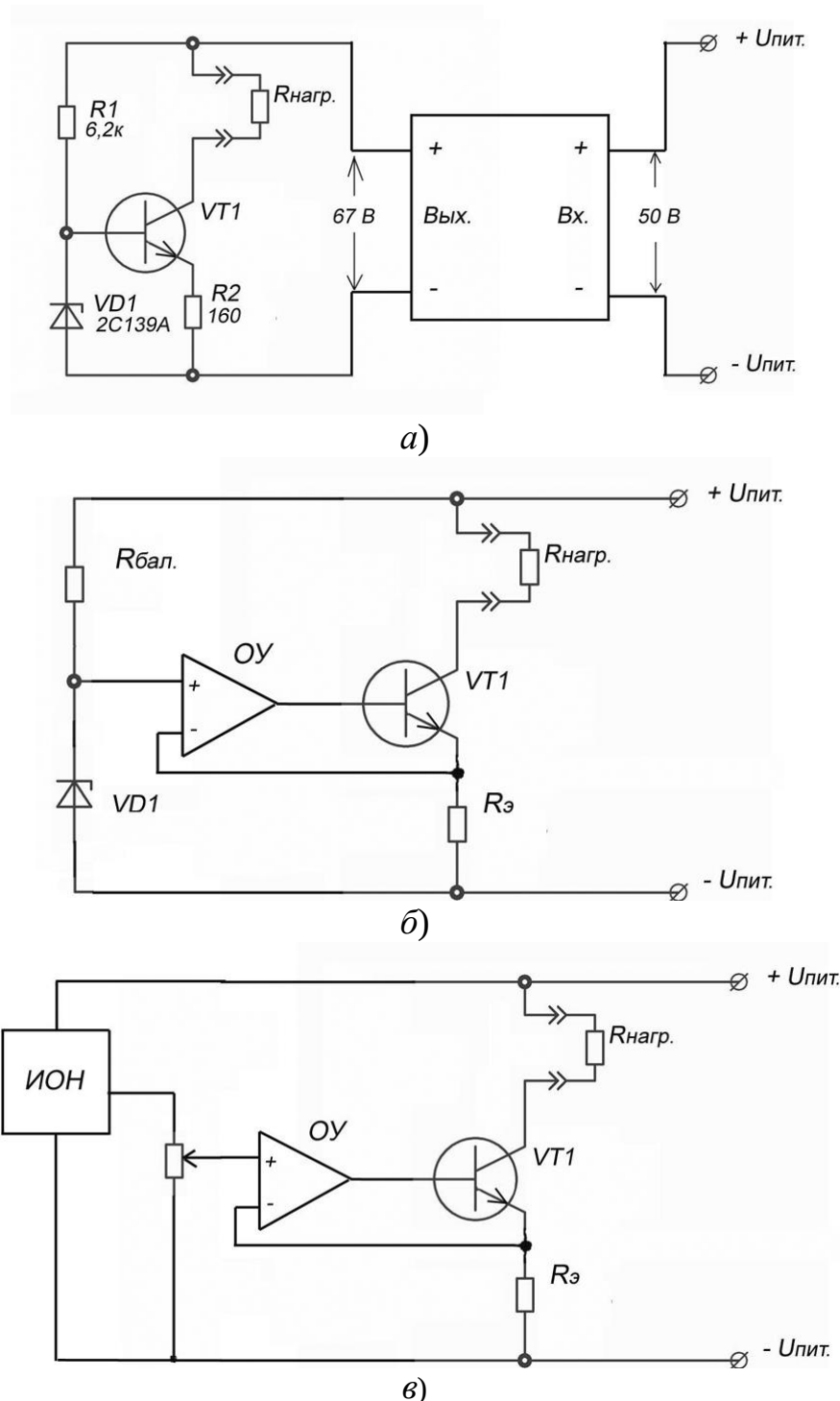


Рисунок 9.7 – Схемы стабилизатора тока: а) с внутренним источником напряжения; б) с операционным усилителем в) регулируемый с ОУ

2. Задачи

1. Определить среднее и максимальное значение прямого тока, а также максимальное обратное напряжение полупроводникового диода в однополупериодном выпрямителе (рисунок 9.2 а) и коэффициент трансформации трансформатора, если на нагрузочном резисторе сопротивлением $R_H = 3 \text{ кОм}$ среднее значение выпрямленного напряжения $U_{H\text{ср}} = 180 \text{ В}$. Напряжение сети $U_1 = 220 \text{ В}$. Сопротивление диода в прямом направлении и обратный ток считать равными нулю.

2. В двухполупериодном выпрямителе напряжение (рисунок 9.3 а) на вторичной обмотке трансформатора $U_2 = 100 \text{ В}$, сопротивление нагрузки $R_H = 130 \text{ Ом}$. Определить $I_{H\text{ср}}$ и $U_{H\text{ср}}$, а также параметры необходимых диодов.

3. Определить ток $I_{H\text{ср}}$ нагрузочного резистора $R_H = 120 \text{ Ом}$ мостового выпрямителя, если напряжение вторичной обмотки $U_2 = 50 \text{ В}$, а прямое сопротивление каждого полупроводникового диода $R_{\text{пр}} = 10 \text{ Ом}$.

4. Определить значение сопротивления добавочного резистора R_d , включенного последовательно в цепь магнитоэлектрического вольтметра с пределом измерения 30 В , внутренним сопротивлением $R_V = 1000 \text{ Ом}$ и шкалой на 150 делений для расширения предела измерения напряжения до 300 В . Чему равна цена деления?

5. На рисунке 9.8 а задана ВАХ стабилитрона, включенного в схему параметрического стабилизатора (рисунок 9.8 б). Координаты точек «т» и «п», значение R_H , напряжение на входе стабилизатора U_1 известны.

$I_{\text{ст.мин}},$ мА	$U_{\text{ст.мин}},$ В	$I_{\text{ст.мак}},$ мА	$U_{\text{ст.мак}},$ В	$U_1,$ В	$R_H,$ кОм
6	5	35	5,5	20	2,0

При условии, что номинальное напряжение на нагрузке равно $U_H = (U_{\text{ст.мин}} + U_{\text{ст.мак}})/2$, для заданного значения сопротивления нагрузки определить величину балластного сопротивления R_0 , обеспечивающего требуемый режим в точке пересечения ВАХ стабилитрона и зеркального изображения ВАХ входного сопротивления линейной части схемы по отношению к зажимам, к которым подключен стабилитрон. Принять $U_{\text{абх}} = (0,7-0,8) \times U_1$.

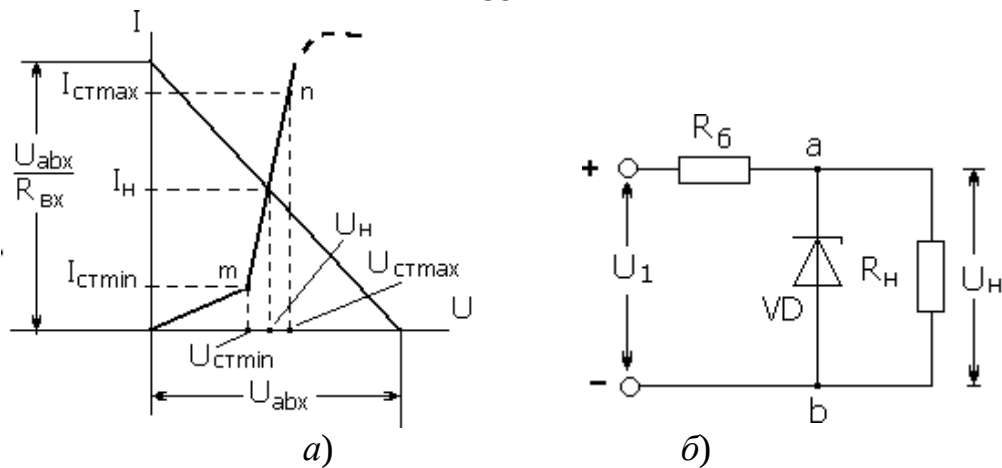


Рисунок 9.8 – ВАХ стабилитрона и схема параметрического стабилизатора

Вопросы к практическому занятию

1. Из чего состоит однополупериодный выпрямитель?
2. Приведите соотношения между входным напряжением выпрямителя и его средним значением.
3. Пояснить связь между действующим значением тока выпрямителя и его постоянной составляющей.
4. Что называется коэффициентом пульсаций выпрямленного напряжения?
5. Чему равен коэффициент пульсаций для однополупериодного выпрямителя?
6. Какое условие используется при выборе диодов после расчета однополупериодного выпрямителя?
7. Каковы различия между входным и выходным сигналами однополупериодного выпрямителя?
8. Поясните принцип действия однополупериодного выпрямителя.
9. Из чего состоит двухполупериодный выпрямитель?
10. Приведите соотношения между входным напряжением выпрямителя и средним его значением.
11. Поясните связь между действующим значением тока выпрямителя и его постоянной составляющей.
12. Чему равен коэффициент пульсаций для двухполупериодного выпрямителя?
13. Как определяется частота пульсаций для двухполупериодного выпрямителя?

14. Перечислите достоинства двухполупериодного выпрямителя в сравнении с однополупериодным?
15. Как отразится на работе мостового выпрямителя обрыв одного из диодов?
16. Каковы различия между входным и выходным сигналами однополупериодного выпрямителя?
17. Поясните принцип действия однополупериодного выпрямителя.
18. Назначение стабилизаторов напряжения и тока и их типы.
19. Какие полупроводниковые приборы используются в схемах параметрического стабилизатора напряжения?

Тема: Цифровые устройства: дешифраторы, регистры, счетчики

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Устройства, оперирующие двоичной информацией, подразделяются на два больших класса: комбинационные схемы (дискретные автоматы без памяти) и последовательные устройства (дискретные автоматы с памятью).

Все комбинационные устройства не имеют памяти. Память – свойство системы сохранять в течение требуемого времени значения своих сигналов. Сигналы на выходах комбинационного устройства определяются сочетанием сигналов на входах и не зависят от его предыдущих состояний. Схемным признаком таких устройств служит отсутствие цепей обратных связей. К комбинационным устройствам относятся логические элементы, электронные ключи, шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры, демультимплексоры, большинство арифметических устройств.

Последовательные устройства обладают памятью, и выходное состояние этих устройств определяется не только сменой входных сигналов, но и состоянием, в котором устройство было до прихода этих сигналов. Показателем принадлежности устройства к последовательному типу является наличие в нем обратных связей. Простейшими последовательными устройствами являются триггеры. К этому же классу относятся регистры, счетчики, запоминающие устройства. В последовательных устройствах за счет памяти функция переходов определяется состоянием входов и выходов в двух соседних тактах – до и после воздействия сигналов. Эту пару тактов принято обозначать t^n и t^{n+1} . Запись $Q^n=1$ означает, что на выходе Q в интервале времени $t^n \leq t < t^{n+1}$ действует сигнал логической 1. Иногда вместо символов t^n и t^{n+1} применяют

СИМВОЛЫ t^{n-1} и t^n .

2. Задачи

1. На дешифратор (рисунок 17.1) при $E = 1$ подан код $a_3a_2a_1 = 101$. На каком выходе будет логическая 1?

2. На дешифратор (рисунок 17.1) при $E = 0$ подан код $a_3a_2a_1 = 101$. На каком выходе будет логическая 1?

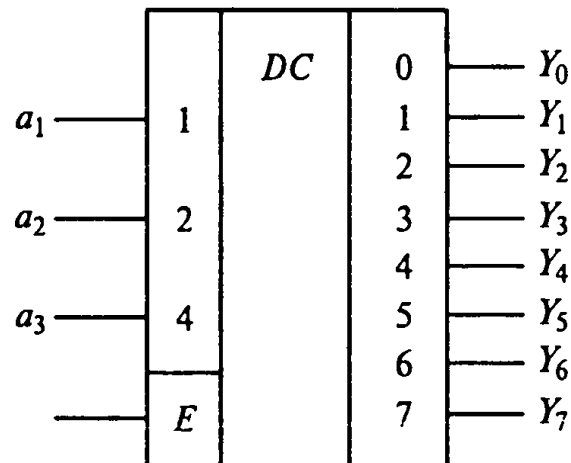


Рисунок 17.1

3. На рисунке 17.2 представлено условное обозначение четырехразрядного универсального сдвигающего регистра. Определите, какое из высказываний об этом регистре является ошибочным:

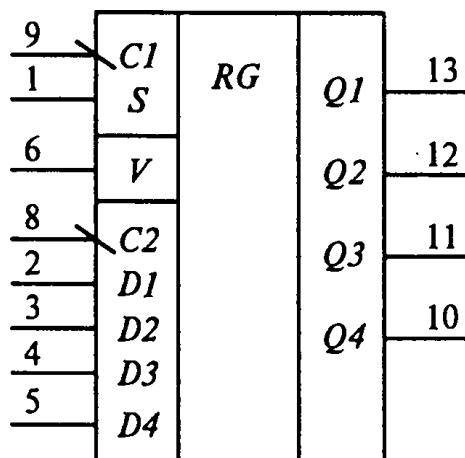


Рисунок 17.2

а) универсальный регистр можно использовать в качестве преобразователя параллельного кода в последовательный, и наоборот;

б) если на управляющем входе $V = 1$ (сигнал высокого уровня), то регистр производит параллельную запись информации с входов $D1 - D4$ по сигналу синхронизации на входе $C2$;

в) вход S служит для последовательного ввода информации в первый разряд регистра;

г) если на управляющем входе $V = 0$ (сигнал низкого уровня), то регистр работает в режиме сдвига по тактовым импульсам на входе $C1$.

4. Определите, какое из высказываний о цифровом счетчике (рисунок 17.3) является ошибочным:

- а) счетчик осуществляет счет поступающих на его вход T импульсов;
- б) результат счета счетчик хранит до прихода следующего импульса;
- в) считывание результата счета может осуществляться в промежутках между импульсами;
- г) счетчик состоит из цепочки последовательно включенных триггеров;
- д) счетчик преобразует натуральный двоичный код в унитарный;
- е) счетчик преобразует унитарный двоичный код в натуральный двоичный код.

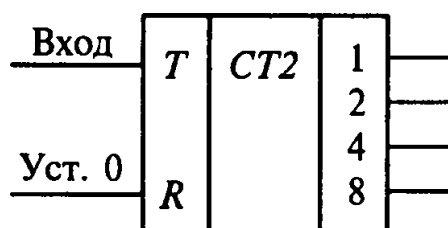


Рисунок 17.3

5. Какое из приведенных высказываний является ошибочным?

- а) в суммирующем счетчике (рисунок 17.4) прямой выход предыдущего триггера соединяется со входом последующего;
- б) выходной код суммирующего счетчика увеличивается на 1 с приходом каждого счетного импульса;

в) в вычитающем счетчике тактовые входы триггеров подключаются к инверсным выходам предыдущих триггеров;

г) выходной код вычитающего счетчика уменьшается на 1 с приходом каждого счетного импульса;

д) в вычитающем счетчике можно осуществить предварительную установку кода, большего $K_{сч} - 1$;

е) реверсивный счетчик с изменяемым направлением счета можно выполнить путем введения в состав счетчика мультиплексора, подключающего тактовые входы триггеров к прямым или инверсным выходам предыдущих триггеров.

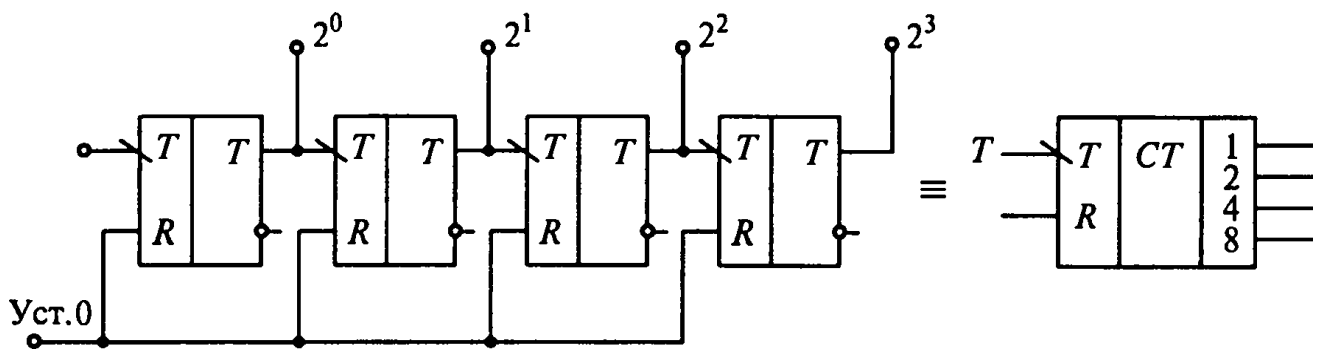


Рисунок 17.4

Вопросы к практическому занятию

1. Для чего нужен регистр?
2. Что такое регистр сдвига?
3. По каким признакам можно осуществить классификацию регистров?
4. Назначение дешифратора.
5. Какой код следует установить на входе дешифратора, чтобы возбудить выход № 11?
6. На выходе дешифратора установился код 0110, укажите номер возбужденного входа шифратора.
7. Для чего нужны счетчики?
8. Какие триггеры используются для реализации счетчика.

9. Какие типы счетчиков вы знаете?
10. Сколько триггеров нужно для десятичного счетчика?
11. Объясните принципы работы реверсивного счетчика

Практическое занятие 11

Тема: Режимы работы триггеров

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Импульсный режим работы имеет ряд преимуществ перед непрерывным:

- 1). В импульсном режиме может быть достигнута значительная мощность во время действия импульсов при малом значении средней мощности устройства,
- 2). Импульсный режим позволяет ослабить влияние температуры и разброса параметров полупроводниковых приборов на работу устройств,
- 3). Импульсный режим дает возможность повысить скорость передачи информации и помехоустойчивость электронной аппаратуры,
- 4). Переход к дискретному представлению сигналов позволяет резко повысить точность измерительных устройств.

Для реализации импульсных устройств требуется большое число сравнительно простых однотипных элементов, легко выполняемых методами интегральной технологии. Импульсные устройства широко распространены в вычислительной технике, радиолокации, телевидении, автоматике, промышленной электронике. Импульсный режим лежит в основе работы ЭВМ.

В импульсных устройствах используются видеоимпульсы следующих форм: прямоугольные, трапецеидальные, экспоненциальные, колоколообразные и пилообразные. В радиолокации применяются радиоимпульсы.

Обычно импульсы следуют периодически с периодом

$$T = t_{\text{и}} + t_{\text{п}},$$

где $t_{\text{и}}$, $t_{\text{п}}$ – продолжительность соответственно импульса и паузы (рисунок 16.1).

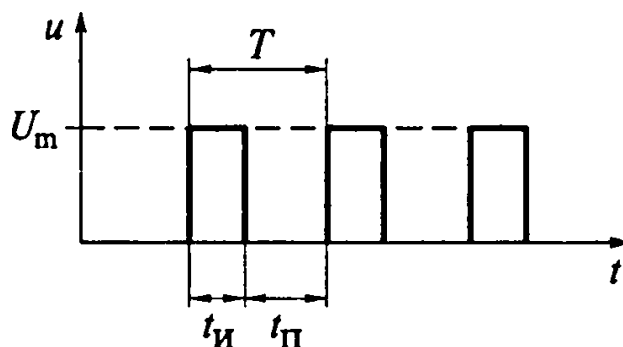


Рисунок 16.1

Частота повторения прямоугольных импульсов $F = 1/T$. Скважность $Q = T/t_{\text{и}}$ в автоматике и вычислительной технике колеблется в пределах $2 \dots 10$, а в радиолокации она может достигать 10000.

Упомянувшиеся ранее формы имеют только идеализированные импульсы. Реальные импульсы искажены, что выражается в замедлении нарастания и убывания импульса, в спаде его плоской вершины (рисунок 16.2).

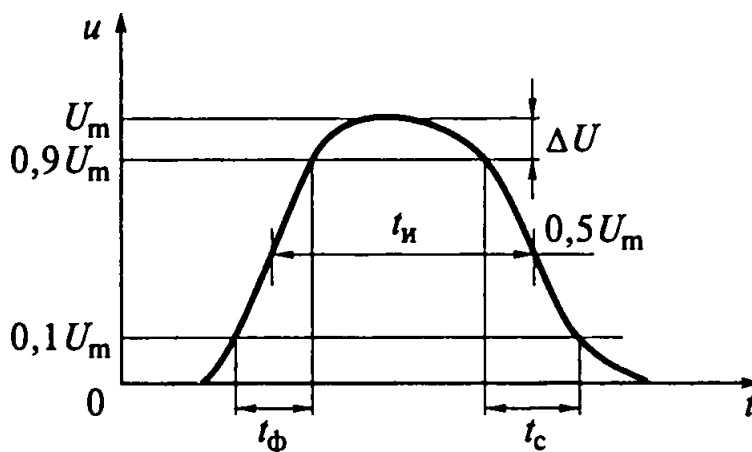


Рисунок 16.2

Реальные импульсы характеризуются следующими основными параметрами:

U_m – амплитуда импульса,

$t_{\text{ф}}$ – длительность фронта импульса – время нарастания его от $0,1U_m$ до $0,9U_m$,

$t_{\text{с}}$ – длительность среза импульса – время убывания его от $0,9U_m$ до $0,1U_m$,

ΔU – спад вершины импульса.

Длительность импульса $t_{\text{и}}$, так называемую активную длительность, отсчитывают на уровне $0,5U_m$. Прямоугольным называется импульс, у которого длительности фронта и среза меньше $1/10$ длительности импульса.

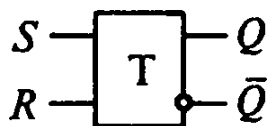
Импульсные устройства выполняются как на цифровых, так и на аналоговых микросхемах. Наиболее распространенными семействами микросхем являются ТТЛ, КМОП. Широко используются операционные усилители, таймеры.

Триггеры в отличие от логических элементов обладают памятью. Одновибратор (ждущий мультивибратор, моновибратор) предназначен для генерации одиночного прямоугольного импульса заданной длительности при воздействии запускающего импульса.

Автогенераторы прямоугольных импульсов (колебательные мультивибраторы) в отличие от одновибраторов характеризуются двумя чередующимися временно устойчивыми состояниями высокого и низкого напряжения. Частоту генерирования задают хронизирующие (временязадающие) элементы – RC -цепь (одна или две). В режиме автоколебаний состояния устойчивого равновесия нет, а существуют два чередующихся состояния квазиравновесия.

2. Задачи

1. Триггер (рисунок 16.3) находится в единичном состоянии $Q = 1$ после прихода первого импульса $S = 1$. В каком состоянии окажется этот триггер после прихода второго импульса $S = 1$?



2. На рисунке 16.4 представлена схема инверсного RS -триггера на логических элементах И-НЕ. Какое состояние примут прямой Q и инверсный $\bar{Q}$ выходы этого триггера, если входные сигналы имеют значение $\bar{R} = 1$, $\bar{S} = 0$?

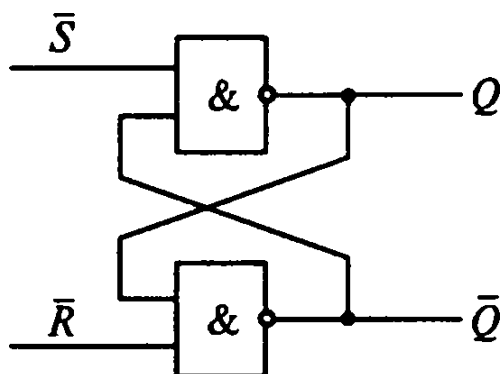


Рисунок 16.4

3. На рисунке 16.5 показана схема синхронного RS -триггера на логических элементах И-НЕ. В таблице 16.1 исходное состояние триггера на прямом выходе Q обозначено как q .

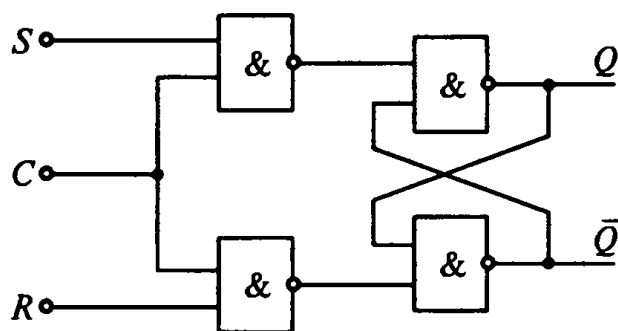


Рисунок 16.5

Таблица 16.1

Номер состояния	C	S	R	q	Q
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1
3	0	1	0	0	0
4	0	1	0	1	0
5	1	0	0	0	0

6	1	0	0	1	1
7	1	1	0	0	1
8	1	0	1	1	0

На входы триггера поданы входные сигналы C , S и R со значениями, приведенными в указанной таблице. Какое состояние примет при этом выход Q ? (Укажите номер состояния, для которого приведено неправильное значение Q)

4. Синхронный D -триггер выполнен на инверсном RS -триггере с логическими элементами И-НЕ (рисунок 16.6). Входы $\bar{R}$ и $\bar{S}$ предназначены для начальной установки триггера. Какое состояние примут выходы Q и $\bar{Q}$ этого триггера, если заземлить вход $\bar{R}$ (т.е. $\bar{R} = 0$) при $\bar{S} = 1$?

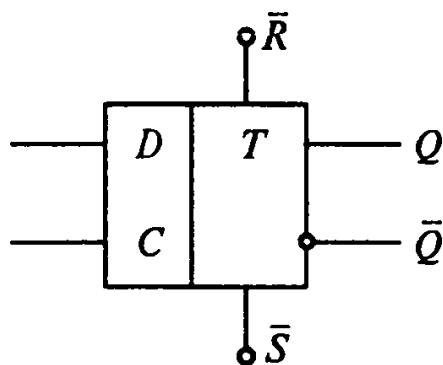


Рисунок 16.6

5. Синхронный JK -триггер (рисунок 16.7) имеет информационные входы J , K и вход синхронизации C . Исходное состояние триггера нулевое ($Q = 0$, $\bar{Q} = 1$). Какое состояние примут выходы и при перечисленных значениях сигналов J , K и C ?

- а) $J = 0$, $K = 0$ при $C = 0$,
- б) $J = 0$, $K = 0$ при $C = 1$,
- в) $J = 1$, $K = 0$ при $C = 0$,
- г) $J = 1$, $K = 0$ при $C = 1$,
- д) $J = 1$, $K = 1$ при $C = 0$,
- е) $J = 1$, $K = 1$ при $C = 1$.

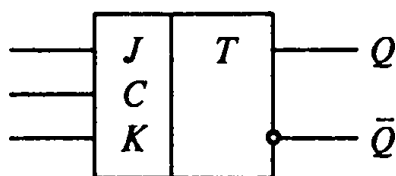


Рисунок 16.7

6. На рисунке 16.8 приведены различные варианты подключения входов универсального JK -триггера. Определите, каким типам триггеров они соответствуют:

а) I – D -триггер, II – асинхронный T -триггер, III – синхронный T -триггер, IV – RS - триггер;

б) I – RS -триггер, II – D -триггер, III – асинхронный T -триггер, IV – синхронный T -триггер;

в) I – асинхронный T -триггер, II – синхронный T -триггер, III – RS -триггер, IV – D -триггер;

г) I – синхронный T -триггер, II – RS -триггер, III – D -триггер, IV – асинхронный T -триггер;

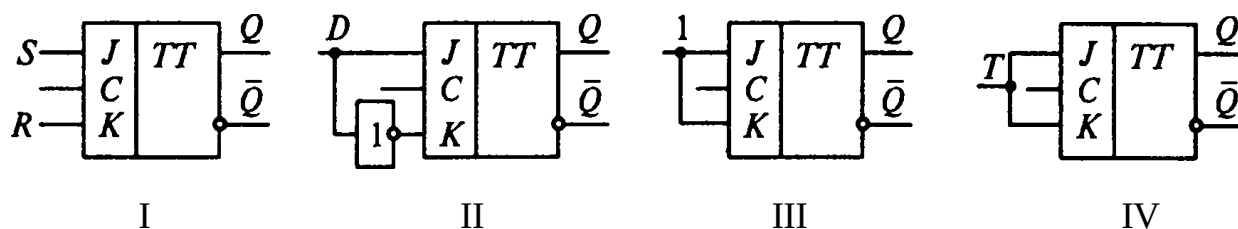


Рисунок 16.8

Вопросы к практическому занятию

1. Что такое триггерные устройства? Перечислите области их применения.
2. Перечислите известные вам типы триггеров.
3. Какими параметрами и характеристиками определяется работа триггеров в статическом и динамическом режимах?
4. Перечислите разновидности RS -триггеров.

5. Чем отличается синхронный RS -триггер от асинхронного?
6. Чем принципиально отличается работа T -триггера от работы RS -триггера?
7. Опишите работу JK -триггера в асинхронном и синхронном режимах.
8. Десять триггеров соединены последовательно. Каким способом лучше всего перевести их в состояние $Q = 0, \bar{Q} = 1$?
9. На входы JK -триггера поданы сигналы высокого уровня. Какой сигнал будет на выходе Q ?

Практическое занятие 12

Тема: АЦП, ЦАП, микропроцессоры и микро ЭВМ

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Цифровые электронные устройства работают в двоичном коде, а большинство исполнительных механизмов автоматизированных систем управления, как правило, реагирует на аналоговые уровни напряжения или тока. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) преобразует цифровую информацию в аналоговую. ЦАП используют также в бытовой электронике, например, в системах высококачественного воспроизведения звука, записанного в цифровой форме на компакт-дисках.

В системах управления информация о состоянии контролируемого промышленного оборудования снимается чаще всего в аналоговом виде. Для последующей обработки эта информация преобразуется в цифровую форму. Такое образование выполняют в два этапа. Вначале непрерывно изменяющийся сигнал измеряют в дискретные моменты времени. Затем полученные значения сигнала подают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который с некоторым шагом квантования по уровню ΔU преобразует их в эквивалентные

цифровые значения, представленные в двоичном коде.

Дискретизация во времени выполнена корректно, если возможно однозначное восстановление исходного аналогового сигнала. При этом исходный сигнал должен удовлетворять условиям:

- частотный (спектральный) состав исходного сигнала должен быть ограничен некоторой верхней граничной частотой $f_{\text{в}}$;
- частота дискретизации (следование отсчетов) $f_{\text{д}}$ должна быть больше или равна $2 f_{\text{в}}$.

Обычно выбирают частоту дискретизации $f_{\text{д}} = (3 \dots 10) f_{\text{в}}$.

Основными характеристиками ЦАП и АЦП являются быстродействие и погрешность преобразования.

Быстродействие – это время преобразования информации из одной формы в другую.

Погрешность преобразования определяется абсолютной погрешностью и относительной разрешающей способностью. Абсолютная погрешность преобразования равна половине шага квантования по уровню ΔU . При шаге квантования ΔU n -разрядный ЦАП обеспечивает 2^n различных значений выходного напряжения, максимальное значение которого, называемой напряжением шкалы,

$$U_{\text{шк}} = (2^n - 1) \Delta U.$$

Относительная разрешающая способность

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_{\text{шк}}} = \frac{1}{(2^n - 1)}.$$

Число уровней квантования напряжения

$$N = \frac{U_{\text{вх}}}{\Delta U}.$$

Период следования тактовых импульсов

$$T_{\text{т}} = 1 / f_{\text{т}},$$

где $f_{\text{т}}$ – тактовая частота, Гц.

Время преобразования в АЦП последовательного типа

$$t_{\text{пр}} = T_{\text{т}} N .$$

Число возможных состояний (коэффициент пересчета) двоичного счетчика $K_{\text{сч}}=2^n$, где n – разрядность счетчика и число его триггеров.

Максимальное число счетчика равно $(2^n - 1)$.

Микропроцессоры (МП) предназначены для приема набора чисел (ввод), выполнения некоторых арифметических и логических операций над числами (обработка), хранение результатов тех или иных операций во внутренней памяти (регистрах), либо их выдаче в другие блоки микропроцессорной системы. МП может обрабатывать только двоичные числа. Информация, получаемая от приборов, перед обработкой МП должна быть преобразована в двоичную форму с помощью подсистемы ввода–вывода, присоединенной к МП.

Достоинством МП является большая скорость обработки данных. МП могут принимать, обрабатывать и выдавать данные со скоростями в миллионы бит в секунду.

Эволюция архитектуры МП пошла по нескольким различным направлениям, в результате чего появились следующие их классы:

- простые однокристалльные 4- и 8-разрядные контроллеры относительно невысокой производительности для применения в бытовых приборах и небольших подсистемах,

- быстродействующие секционные комплекты микропроцессорных БИС для создания ЭВМ произвольной разрядности с наращиваемой системой команд,

- мощные однокристалльные 16- и 32-разрядные интегральные схемы супер большой интеграции (ССБИС) с фиксированной системой команд для персональных ЭВМ, производительность которых приближается к производительности полупрофессиональных и мини ЭВМ,

- специализированные процессоры цифровой обработки, предназначенные для ускорения выполнения арифметических операций и алгоритмов

спектрального анализа сигналов,

– аналоговые процессоры – устройства с аналоговыми входом и выходом, внутри которых вся обработка сигналов ведется в цифровом коде.

2. Задачи

1. В АЦП последовательного небалансного типа (рисунок 18.1) аналоговое напряжение $U_{\text{вх}}$ преобразуется формирователем временного интервала ФВИ в импульс длительностью $t_{\text{и}}$, пропорциональной величине $U_{\text{вх}}$. В течение времени $t_{\text{и}}$ элемент $И$ пропускает на вход двоичного счетчика $СТ$ импульсы стабильной частоты от тактового генератора импульсов $ГИ$. Счетчик формирует двоичный код Y , пропорциональный $U_{\text{вх}}$. Определите число разрядов счетчика n и время преобразования $t_{\text{пр}}$, если $U_{\text{вх}} = (0 \dots 10) \text{ В}$, шаг квантования $\Delta U = 0,01 \text{ В}$, тактовая частота $ГИ$ $f_{\text{т}} = 1 \text{ МГц}$.

2. В АЦП балансного типа (рисунок 18.2) цифроаналоговый преобразователь преобразует код, снимаемый со счетчика, в аналоговое напряжение $U_{\text{цап}}$, пропорциональное коду. При равенстве напряжений $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{цап}}$ компаратор прекращает поступление импульсов на счетчик. В этот момент код счетчика Y будет пропорционален $U_{\text{вх}}$.

Определите верхнюю граничную частоту $f_{\text{в}}$ аналоговых сигналов, преобразуемых этим 10-разрядным АЦП последовательного счета, тактовая частота которого $f_{\text{т}} = 10 \text{ МГц}$.

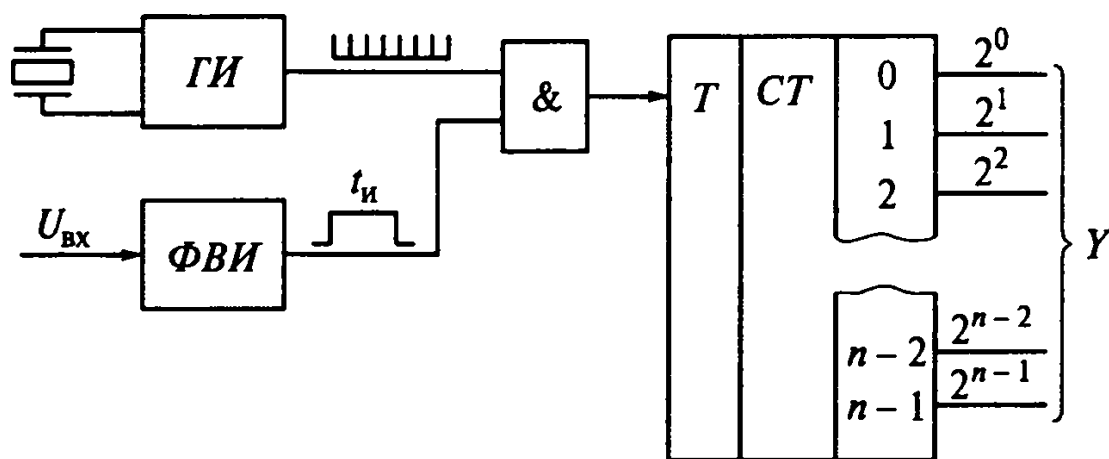


Рисунок 18.1

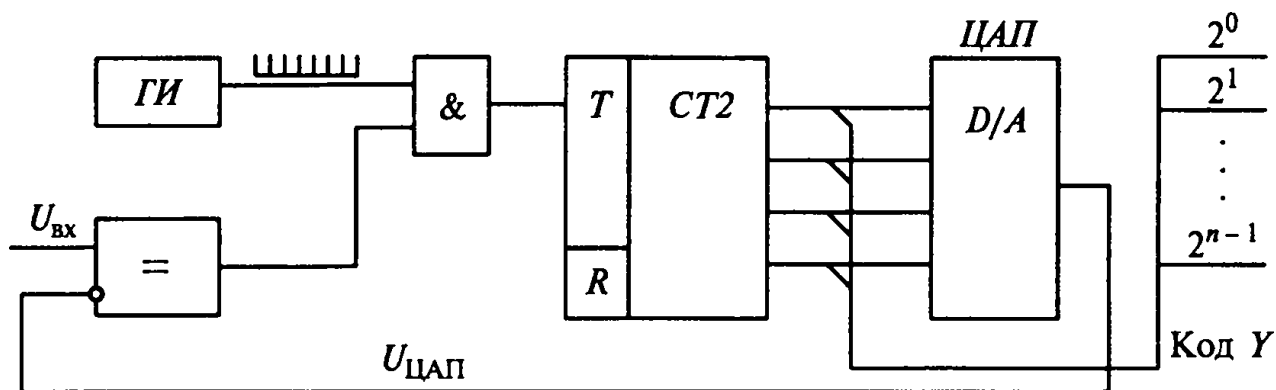


Рисунок 18.2

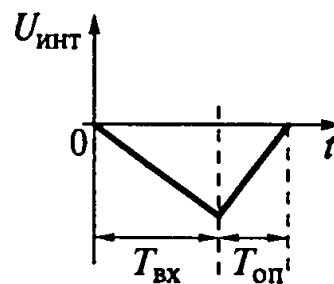
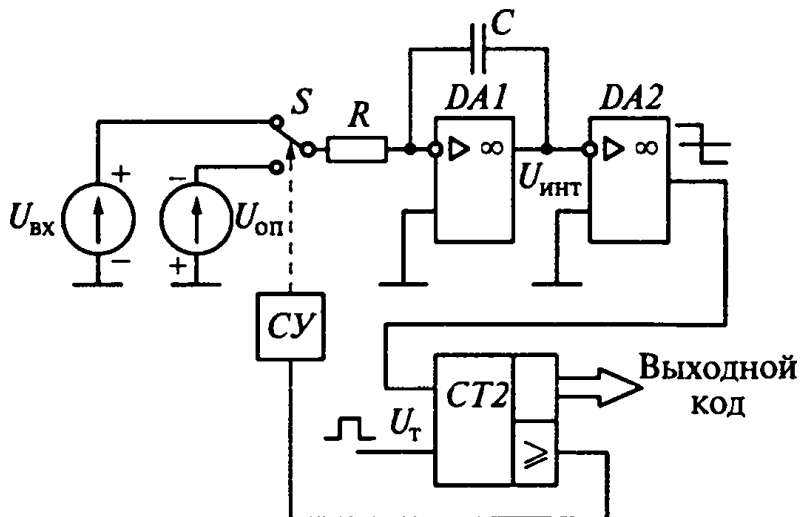
3. Аналого-цифровой преобразователь с двойным интегрированием (рисунок 18.3 а) используется в высокоточных цифровых вольтметрах постоянного тока. Он состоит из переключателя S , интегратора $DA1$, компаратора $DA2$, двоичного счетчика $CT2$ и системы управления CY . Вначале интегрируется входное напряжение U_{BX} в течение времени T_{BX} , затем – опорное напряжение $U_{оп}$ противоположной полярности в течение времени $T_{оп}$ (рисунок 18.3 б). Преобразование аналогового сигнала U_{BX} в цифровой сигнал на выходе счетчика $CT2$ является высокоточным по следующим причинам (укажите неправильный ответ):

- а) точность не зависит от величины емкости C интегратора $DA1$,
- б) точность не зависит от частоты тактовых импульсов U_T ,

в) точность не зависит от нестабильности опорного напряжения $U_{оп}$,

г) мало влияние сетевых помех на точность измерения,

д) величина входного напряжения определяется как $U_{вх} = \frac{T_{оп}}{T_{вх}} U_{оп}$.



а)

б)

Рисунок 18.3

4. Схема простейшего ОЗУ – параллельного регистра – показана на рисунке 18.4. Регистр управляется сигналами X_3 (записи), X_R (установки нуля) и $X_{сч}$ (считывания). Какому номеру состояния в таблице 18.1 соответствует режим записи в регистр многоразрядного числа $a_0a_1\dots a_{n-1}$?

Таблица 18.1

Номер состояния регистра	Сигналы управления		
	X_3	X_R	$X_{сч}$
1	0	0	0
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0	0	1

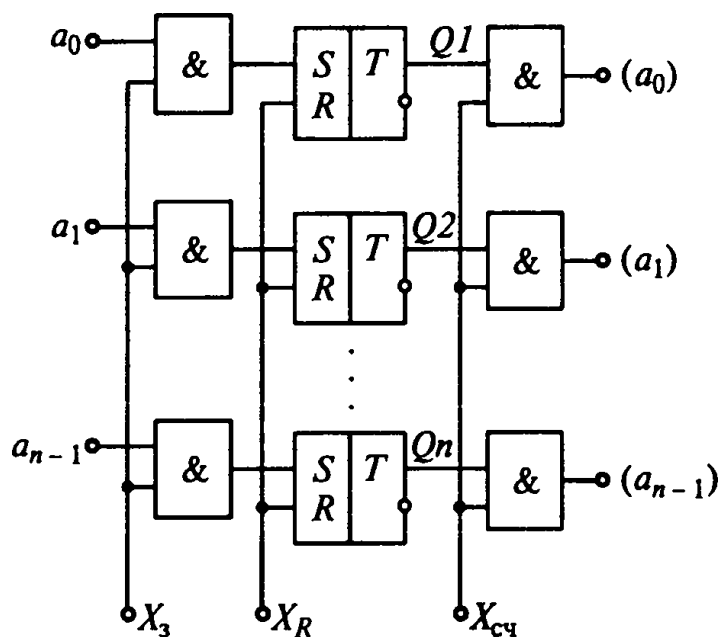


Рисунок 18.4

5. Используя данные, приведенные в предыдущем задании, определите, какому номеру состояния в таблице 18.1 соответствует режим хранения в параллельном регистре записанного многоразрядного числа $a_0a_1\dots a_{n-1}$?

6. Микросхемы микропроцессорных систем разработаны с учетом подключения входов и выходов нескольких микросхем к одной шине. Эти микросхемы на выходах Y имеют логический 0 или логическую 1, но при необходимости могут отключаться от шины, переходя в третье, высокоимпедансное состояние.

Для перехода в третье состояние со стороны выходов Y бесконечно велико, используется транзистор $VT5$ и резистор $R5$, управляемые сигналом Z (рисунок 18.5). Определите, при каком сочетании сигналов x_1 , x_2 и Z наступит третье состояние. Символ $\times$ означает, что состояние не имеет значения:

- а) $Z = 0$, $x_1 = 0$, $x_2 = 0$;
- б) $Z = 0$, $x_1 = 1$, $x_2 = 1$;
- в) $Z = 1$, $x_1(\times)$, $x_2(\times)$.

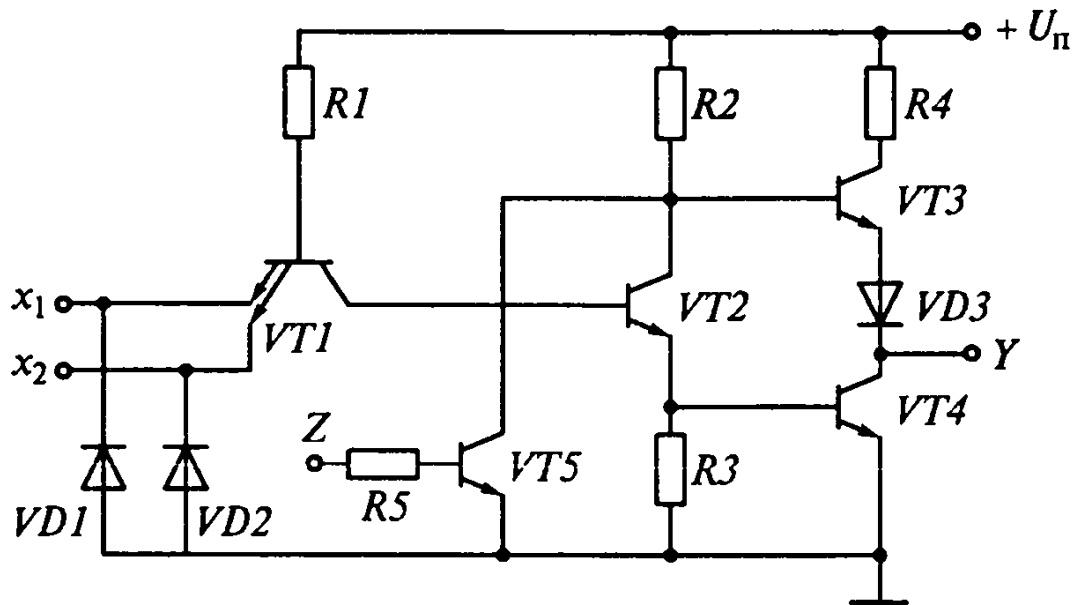


Рисунок 18.5

Вопросы к практическому занятию

1. Для чего предназначены АЦП и ЦАП?
2. Какой из АЦП последовательного действия обладает наибольшим быстродействием: с последовательным счетом, с поразрядным уравниванием или интегрирующий?
3. Что выполняется при преобразовании аналоговых величин в цифровые и наоборот: квантование по уровню, квантование по времени или квантование и по уровню, и по времени?
4. Что является элементом памяти в микросхемах ОЗУ, выполненных на биполярных транзисторах? на МОП-транзисторах?
5. Что вызывает наибольшие трудности при автоматизации: ситуация, когда алгоритм составлен некорректно, отладка отдельных частей программы или выбор датчиков?
6. Какими числами представлена информация, обрабатываемая микропроцессором: десятичными, двоичными или двоичными и десятичными числами?
7. Чем определяется разрядность микропроцессора: числом проводников его внешней шины данных, шины адреса или шины управления?

8. Чем определяется предельно возможный объем памяти, к которой может обращаться микропроцессор: числом ячеек памяти, сложностью выполняемых программ, разрядностью шины данных МП, разрядностью шины адреса МП?

Практическое занятие 13

Тема: Синтез генератора кодов на логических элементах, дешифраторе, мультиплексорах

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Задача синтеза функциональной схемы устройства также не имеет однозначного решения. Поэтому в процессе синтеза обычно формулируют некоторые критерии оптимизации, дающие основания для сравнения и выбора наилучшего варианта воплощения устройства. Обычно критериями оптимизации выступают аппаратные затраты при технической реализации, энергопотребление, устойчивость к факторам внешней среды, надежность, стоимость и др. Поскольку особые условия эксплуатации в задании не оговорены, то за основные критерии следует принять аппаратную сложность и энергопотребление.

Синтез схемы устройства выполняется по блокам структурной схемы.

Основным блоком является синхронный цифровой автомат, который по тактам формирует на своих выходах двоичные числа в соответствии с заданием. Поскольку заранее нельзя определить оптимальное техническое решение, то целесообразно синтезировать и сравнить несколько вариантов функциональной схемы. Можно указать два очевидных пути построения автомата: на основе счетчика импульсов с выходной комбинационной схемой; на основе параллельного регистра с входной комбинационной логикой. Каждый из упомянутых путей также предполагает различные подходы в части применения типовых комбинационных и последовательностных узлов. В любом случае целью синтеза является создание комбинационной части устройства с минимальными затратами элементов. Процедура синтеза заключается, как правило, в формальном описании блока с использованием таблицы истинности, в последующей записи функций выходов в форме

МДНФ методом Квайна - Мак-Класки, либо графическим методом карт Карно, и реализации функций на уровне функциональной схемы в выбранном логическом базисе.

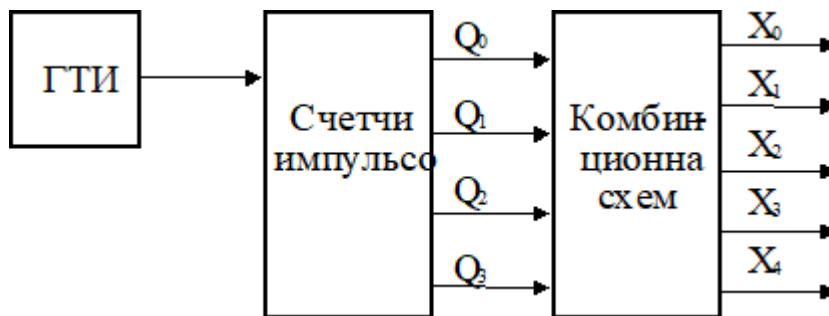


Рис. 13.1 – Общая структура блока на основе счетчика импульсов

Таблица 13.1

Такт	Аргументы				Функции				
	Q ₃	Q ₂	Q ₁	Q ₀	X ₄	X ₃	X ₂	X ₁	X ₀
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	1	0	1	0
4	0	0	1	1	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	1	1	0	0	0
6	0	1	0	1	1	1	1	0	0
7	0	1	1	0	1	0	1	0	1
8	0	1	1	1	0	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	1	0	0

Количество мультиплексоров в комбинационной схеме должно быть равным количеству выходных функций - числу разрядов выходных слов, которое в нашем примере равно пяти. Каждый мультиплексор должен иметь по 4 адресных входа (по числу аргументов) и, соответственно, по 16 информационных входов, которые подключаются к шинам логических 0 или 1 согласно таблице истинности. Можно, однако, упростить устройство, используя мультиплексоры меньшей разрядности, а именно мультиплексоры с меньшим на единицу числом адресных входов.

2. Задачи

1. Синтезировать схему генератора последовательности двоичных 5-то разрядных кодов:

00000, 00001, 00010, 10111, 10010, 11000, 11101, 01101, 10100,

работающего с частотой $f_T = 10240 \text{ кГц}$ различными способами:

- на основе логических элементов;
- с помощью дешифратора;

2. Синтезировать схему генератора последовательности двоичных 5-то разрядных кодов:

00000, 00001, 00010, 10111, 10010, 11000, 11101, 01101, 10100,

работающего с частотой $f_T = 10240 \text{ кГц}$ различными способами:

- на мультиплексорах;

Вопросы к практическому занятию

- 1 В чем отличие схем и принципов функционирования счетчиков с параллельным и сквозным переносами?
- 2 Объясните принцип работы последовательно-параллельного регистра.
- 3 Опишите обобщенную структурную схему ПЛИС и поясните свойство их универсальности.
- 4 Как реализуется принцип программной коммутации логических элементов в ПЛМ?
- 5 Почему структура ПМЛ оказалась более перспективной по сравнению со структурой ПЛМ?
- 6 Охарактеризуйте ПЛИС CPLD.
- 7 Перечислите основные этапы проектирования цифровых устройств на базе ПЛИС.
- 8 Перечислите основные преимущества использования ПЛИС по сравнению с микросхемами базовых логических элементов.

Практическое занятие 14

Тема: Синтез генератора кодов на триггерах

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Другим распространенным способом построения цифрового автомата является способ формального синтеза на основе отдельных триггеров, как правило синхронного типа JK или D. Для проведения такого синтеза удобно использовать промежуточную таблицу переходов триггеров, в которой указаны состояния информационных входов, необходимые для осуществления перехода в момент синхронизации (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Переход	JK-триггер		D-триггер
$Q_n \rightarrow Q_{n+1}$	J	K	D

$0 \rightarrow 0$	0	x	0
$0 \rightarrow 1$	1	x	1
$1 \rightarrow 0$	x	1	0
$1 \rightarrow 1$	x	0	1

Структура автомата на основе триггеров, отличается от общей структуры цифрового автомата отсутствием информационных входов, поскольку его функцией является генерирование слов. Задача синтеза состоит в определении оптимальной логической структуры комбинационной схемы (КС), которая отвечает за подготовку совокупности логических состояний входов триггеров в текущем такте, которая определяет выходное слово в следующем такте. Синтез выполняется с составления таблицы истинности (переключений) устройства, которая дополняется столбцами для функций возбуждения триггеров (табл. 14.2). Далее в обычном порядке проводится минимизация функций возбуждения, например, при числе аргументов не более шести минимизацию рекомендуется выполнять графическим способом карт Карно.

Таблица 14.2

Выходы триггеров					Информационные входы триггеров									
X_4	X_3	X_2	X_1	X_0	J_4	K_4	J_3	K_3	J_2	K_2	J_1	K_1	J_0	K_0
0	0	0	0	0	0	x	0	x	0	x	0	x	1	x
0	0	0	0	1	0	x	1	x	0	x	1	x	x	1
0	1	0	1	0	0	x	x	1	1	x	x	0	0	x
0	0	1	1	0	1	x	1	x	x	1	x	1	0	x
1	1	0	0	0	x	0	x	0	1	x	0	x	0	x
1	1	1	0	0	x	0	x	1	x	0	0	x	1	x
1	0	1	0	1	x	1	1	x	x	0	1	x	x	0
0	1	1	1	1	0	x	x	1	x	0	x	1	x	1
0	0	1	0	0	0	x	0	x	x	1	x	0	x	0

Многие из необходимых для построения устройства блоков являются типовыми, выпускаются в виде готовых ИС и не требуют синтеза. К таким блокам относятся регистр, который может использоваться для хранения предшествующей комбинации, многоразрядный сумматор для выполнения операции вычитания (сложения дополнительных кодов положительного и отрицательного чисел), компаратор для сравнения чисел, счетчик импульсов и др.

Заключительным этапом разработки функциональной схемы является сравнение возможных вариантов ее исполнения с целью выявления оптимального варианта. Критерием сравнения на данном этапе, когда еще нет данных по электрическим характеристикам и потребляемой мощности, служит функциональная сложность, которая может быть оценена количеством необходимых условных корпусов ИС средней интеграции. При оценке следует исходить из ориентировочного количества элементов в одном корпусе: 6 инверторов, 4

двухвходовых логических элемента, 3 - трехвходовых, 2 - четырехвходовых, 1 - восьмивходовой, 2 триггера, 1 четырехразрядный сумматор, счетчик импульсов или регистр, 1 ПЗУ или ПЛМ. Сравнение упрощается, если данные о вариантах собрать в одну таблицу.

Выбор элементной базы

Выбор элементной базы является определяющим этапом проектирования, поскольку функциональные возможности, быстродействие, конструктивное исполнение, энергопотребление и стоимость элементов отражаются на технико-экономических показателях устройства. В табл.14.3 приведены для сравнения типовые электрические характеристики ИС общего назначения со средней степенью интеграции (ТТЛ - транзисторно-транзисторная логика, ТТЛШ - транзисторно-транзисторная логика с диодами Шотки, ЭСЛ - эмиттерно-связанная логика, КМДП - логика на комплементарных МДП-транзисторах, ПТШ - логика на арсенид-галлиевых полевых транзисторах с затвором Шотки)

Таблица 14.3

Техно- логия	Схемо- техника	Серия	Электрические параметры					Зарубеж- ный аналог
			U _{CC} В	P _{CC} /ЛЭ мВт	t _{Рав} нс	P _{CC} × t _{Рав} пДж	F _{max} МГц	
Бипо- лярная	ТТЛ	K155, K133	5	10	10	100	35	SN74
	ТТЛШ	KP531		19	3	57	125	SN54S/74S
		KP1531		4	2	8	130	74F (FAST)
		K555		2	9,5	19	45	SN54LS/74LS
		KP1533		1	4	4	100	SN54ALS/74ALS
	ЭСЛ	K500	-5,2	25	2	50	125	MC10000
		K1500	-4,5	40	0,75	30	300	F100K
Уни- поляр- ная	КМДП	K561	3...15	0,0025 на	45	0,1	10	CD4000A
		K176	5...10		10	0,025	30	54HC
		KP1561	3...18	1 МГц	3,5	0,008	125	74AC (FACT)
	ПТШ	K6500	4, -2,45	3...6	0,1	0,3...0,6	1000	10G000

2. Задачи

1. Синтезировать схему генератора последовательности двоичных 5-то разрядных кодов:

00000, 00001, 00010, 10111, 10010, 11000, 11101, 01101, 10100,

работающего с частотой $f_T = 10240 \text{ кГц}$ различными способами:

- на основе триггеров;

2. Сравнить результаты Практического занятия 13 и 14 провести моделирования и проверку в Multisim.

Вопросы к практическому занятию

- 1 Какие методы дискретизации аналоговых сигналов вам известны?
- 2 Какие характеристика АЦП и ЦАП на ваш взгляд определяют их точность?
- 3 Какими недостатками обладает структура ЦАП с резисторами R-2R.
- 4 Опишите принцип функционирования ЦАП с резисторной матрицей R-2R.
- 5 Сформулируйте принцип аналого-цифрового преобразования методом последовательного счета.
- 6 Почему АЦП последовательного приближения обладает более высоким быстродействием по сравнению с АЦП последовательного счета?
- 7 Что такое информационная технология?

Практическое занятие 15

Тема: Разработка программы на языке на C++.

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Введение в C++. Объявление переменных в C++. Использование переменных. Изменение и сравнение величин. Операторы выбора if и else в C++. Тернарный оператор в C++. Оператор множественного выбора switch в C++. Цикл for в C++. Операторы break и continue в C++. Циклы while и do while в C++.

В настоящее время C (Си) является многофункциональным языком программирования высокого уровня, подобным таким языкам как Pascal или Python, но в отличие от них он имеет возможность работы с командами низкого уровня, подобно языку ассемблера. Программу на языке C можно скомпилировать в машинный код практически для любого известного микропроцессора. Не исключением стали и микроконтроллеры – сейчас по популярности использования (особенно для начинающих) язык Си обогнал в них доминировавший до этого язык ассемблера. Программирование на языке C поддерживает и самая популярная в настоящее время программная платформа Atmel Studio для микроконтроллеров семейства AVR.

Сейчас уже можно с уверенностью сказать, что язык С стал своеобразным фундаментом, на котором строится все современное программирование – чего стоят хотя бы «Visual C» и «C Sharp». Основанные на нем языки программирования сейчас занимают доминирующее положение в мире программирования. А все началось с удачной структуры языка, разработанной в 1972 г. Деннисом Ритчи.

Файлы программ на языке Си имеют расширение .C, а простейшая структура программы выглядит следующим образом.

```
#include <avr/io.h> /* заголовок */

int main(void) /* главная функция: начало программы */
{ /* открывающая скобка в начале программы */
оператор программы;
... оператор программы;
} /* закрывающая скобка в конце программы */
```

Комментарии являются необязательным элементом программы, но они крайне желательны для лучшего понимания ее сути.

Назначение основных элементов программы на языке С (Си)

Заголовки

В представленной структуре программы на языке С строка `#include <avr/io.h>` является заголовком. Заголовки содержат специализированную информацию для компилятора об общих условиях выполнения программы и требуемых ей ресурсах. В рассмотренном случае мы указываем компилятору на то, чтобы при выполнении программы он учел информацию, содержащуюся в файле `io.h` – забегаая вперед скажем что этот файл содержит инструкции для портов ввода/вывода микроконтроллера.

Символ `#` указывает на то, что представленная инструкция должна быть обработана препроцессором, который выполняет предварительную обработку текста программы перед началом компиляции и подключает внешние библиотеки.

Какие заголовки (управление портами ввода/вывода, функции задержки и т.д.) следует подключить определяется потребностями конкретной программы. Если вы забыли подключить необходимый заголовок, то программа не скомпилируется – компилятор выдаст сообщение об ошибке. К слову сказать, эти ошибки легко устраняются – ведь компилятор сам подсказывает какие заголовки следует подключить.

Функции

По сути программа на языке С представляет собой набор функций, каждая из которых может вызывать для выполнения любые другие функции. Функций в программе может быть много, но обязательной является только одна из них, называемая «`main`» («главная»).

Выполнение программы на языке С начинается всегда с нее. Программист не может изменить название главной функции «main», но названия для всех других функций программы он может выбирать произвольно.

Функции в языке С легко узнать по их отличительному признаку – круглым скобкам после их имени. В общем случае в скобках содержится набор параметров, которые могут передаваться в функцию для ее работы, а также набор переменных, через которые функция может передавать результаты ее работы во внешнюю функцию (которая ее вызвала). Если скобки пустые, как например, в представленном примере с функцией main(), то это значит что у функции нет ни входных, ни выходных параметров.

Идущая следом за названием функции фигурная скобка { отмечает начало последовательности операторов, образующих тело функции. Закрывающая фигурная скобка } отмечает конец этой последовательности операторов. На этой скобке выполнение функции завершается.

Фигурные скобки также используются для того, чтобы объединить несколько операторов программы в составной оператор или блок.

Операторы

Как правило, тело функции в языке Си представляет собой набор операторов, в конце каждого из которых стоит точка с запятой ;. Можно размещать каждый оператор на своей строке или несколько операторов на одной строке – компилятору это неважно, главное чтобы они разделялись точкой с запятой (этот символ свидетельствует о конце оператора). Но для восприятия человеком, конечно, удобнее чтобы каждый оператор располагался на отдельной строке. Допускается использование и пустых строк чтобы визуально отделить структурные элементы программы.

Операторы выполняются последовательно в том порядке, в котором они записаны. Но структура программы не обязательно должна быть линейной – при наличии циклов и условий возможны пропуски выполнения отдельных операторов (условия) или многократное выполнение одних и тех же операторов (циклы).

Стандартные типы данных в С++

Прежде чем мы продолжим знакомство с переменными в С++, узнаем, значениями какого типа мы можем заполнять созданные нами переменные.

Вот список стандартных типов данных:

int – это целый тип, который может хранить в себе только целые числа.

float – данный тип является неточным. Он позволяет хранить не только целую часть, но, в отличие от типа int, и дробную.

double – данный тип нечем не отличается от float, кроме более высокой точности (позволяет хранить больше чисел после запятой).

char – в данный тип данных можно записывать отдельные символы (абсолютно любые).

bool – хранит в себе значения логического типа: «правду» – true, либо «ложь» – false.

Создание переменных

Чтобы объявить переменную нам необходимо воспользоваться следующей конструкцией:

```
1 | <тип данных> <имя переменной № 1>, ... , <имя переменной № N>;
```

Полный список типов данных вы можете увидеть выше. Имена же переменных задаются следующим образом:

Имя переменной не может начинаться с цифры.

В имени переменной не может быть пробелов, а также специальных символов (вроде ; № # % или /).

Имя переменной не может совпадать с другими, ранее объявленными, именами (функций, переменных, стандартных операторов и т. п.).

Теперь давайте разберем пример создания различных переменных:

```
1 | char c = 'p'; // переменная типа char инициализирована символом 'p'
2 | int i = 10; // здесь мы создали переменную целого типа со значением 10
3 | float f = 0.3; // эта переменная с плавающей точкой, со значением 0.3
4 | bool b = true; // мы передали переменной типа bool, значение true
```

Также мы можем не задавать значение при создании переменной. Для этого мы просто прописываем тип и имя переменной:

```
1 | int a, b = 9; // мы создали две переменные
2 | // для b указали значение 9
```

Теперь давайте более подробно разберем значения, передаваемые вышеперечисленным типам

Для указания переменной целого типа нам надо просто написать нужное число.

Для указания дробного значения мы должны в начале написать целую часть числа, затем указать точку, а после нее дробную часть числа.

Если мы хотим передать символ, мы должны обернуть требуемый символ в одинарные кавычки.

Для записи значения «верно», в переменную типа bool, мы должны написать true, и false для значения «ложь».

Пример выполнения работы

Пусть, например, требуется выполнить указанное задание для функции $\sin(x)$.

Такая программа имеет вид:

```
1 | #include <iostream> //подключаем модуль потокового ввода/вывода
2 | #include <math.h> //подключаем модуль математических функций
3 |
4 | int main() {
5 |     float h; //переменная для хранения текущего момента дискретного времени
6 |     int A[99]; //массив выходных данных
7 |     std::cout << '{'; //вывод символа "{" обозначающего начало данных массива
8 |     for (int i=0;i<100;i++)
9 |     {
10 |         h=2*3.14*i/99; //расчет текущего момента времени для вычисления значения функции
11 |         A[i]=trunc(127+127*sin(h)); //вычисление и кодирование значения функции в текущий момент времени
12 |         std::cout << A[i]; //вывод полученного значения
13 |         if (i!=99)
14 |             std::cout << ','; //если элемент не последний, ставим символ ","
15 |     }
16 |     std::cout << '}'; //вывод символа "}" обозначающего конец данных массива
17 |     return 0;
18 | }
```

Результатом работы программы является массив, содержащий закодированные числами в диапазоне $[0; 255]$ значения функции $\sin(x)$, при $x \in [0; 2\pi]$ в 100 точках:

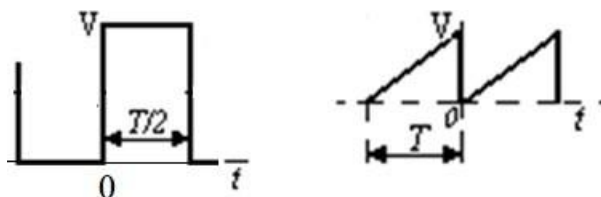
stdout

{127,135,143,151,158,166,174,181,188,195,202,208,214,220,225,230,234,238,242,245,248,250,252,253,253,253,252,251,249,247,244,240,237,232,228,223,217,211,205,199,192,185,178,170,162,155,147,139,131,123,115,107,99,91,83,76,69,61,55,48,42,36,31,26,21,17,13,9,7,4,2,1,0,0,0,1,3,5,8,11,14,18,23,28,33,39,45,51,58,64,72,79,87,94,102,110,118,126}

2. Задачи

1. Разработать программу на языке C++, преобразующую непрерывные периодические сигналы в последовательность двоичных кодов в диапазоне **[0;255]**, определяющих их значение в дискретные моменты времени t_i , $i = 0 \dots n-1$ на их периоде.

Сигналы для преобразования:



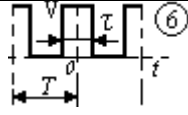
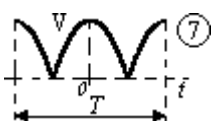
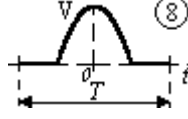
Амплитуду сигналов (V) принять равной 255, период (T) – равным **2π**, число точек для дискретизации (n) – равным 100.

Результат работы программы вывести на экран в виде массива, который может быть использован при написании другой программы на языке C++.

При решении можно использовать онлайн-компиляторы C++, например, http://primat.org/cpp_online_compiler.

2. Решить задачу 1 для других сигналов таблицы ниже:

График $f(t)$	Ряд Фурье функции $f(t)$	Примечание
	$f(t) = \frac{4V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k}$	$k=1,3,5,\dots$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$
	$f(t) = \frac{8V}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin k\omega t}{k^2}$	$k=1,3,5,\dots$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$
	$f(t) = \frac{4V}{\omega \pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k^2} \sin k\omega t$	$k=1,3,5,\dots$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$
	$f(t) = \frac{V}{2} - \frac{V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin k\omega t$	$k=1,2,3,4,5$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$
	$f(t) = \frac{4V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\omega t}{2} \cos k\omega t$	$k=1,3,5,\dots$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$

	$f(t) = V \left[\frac{\tau}{T} + \frac{2}{\tau} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\omega\tau}{2} \cos k\omega t \right]$	$k=1,2,3,4,5 \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$
	$f(t) = \frac{4V}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^{s+1}}{(2s)^2 - 1} \cos 2s\omega t \right]$	$S=1,2,3,4,..$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$
	$f(t) = \frac{2V}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t \right)$	$k=1,2,4,6,..$ $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Вопросы к практическому занятию

- 1 АЦП каких типов следует выбирать при оцифровке аналоговых сигналов с частотами в диапазоне сотен МГц и в диапазоне единиц герц?
- 2 Каким преимуществом и недостатком обладает последовательный канал передачи двоичного кода в ЦАП или из АЦП?
- 3 Для чего нужен регистр?
- 4 Что такое регистр сдвига?
- 5 По каким признакам можно осуществить классификацию регистров?
- 6 Назначение дешифратора.
- 7 Какой код следует установить на входе дешифратора, чтобы возбудить выход № 11?
- 8 На выходе дешифратора установился код 0110, укажите номер возбужденного входа шифратора.

Практическое занятие 16

Тема: Компьютерное проектирование и программирование генератора сигналов.

Цель: Формирование у студента компетенций ОПК-6, ОПК-8

1. Теоретическая часть

Микроконтроллеры семейства PIC16CXXX, выполненные по технологии HCMOS представляют собой 8-разрядные микроконтроллеры на основе RISC-процессора, выполненные по гарвардской архитектуре.

Имеют встроенное ПЗУ команд объемом от 0,5 до 4 Кслов (разрядность слова команд равна 12 – 14 бит).

Память данных PIC-контроллеров организована в виде регистрового файла объемом 32 – 128 байт, в котором от 7 до 16 регистров отведено для управления системой и обмена данными с внешними устройствами.

Одним из основных достоинств этих устройств является очень широкий диапазон напряжений питания (2 – 6 В).

Ток потребления на частоте 32768 Гц составляет менее 15 мкА, на частоте 4 МГц – 1 – 2 мА, на частоте 20 МГц 5 – 7 мА и в режиме микропотребления (режим SLEEP) – 1 – 2 мкА.

Выпускаются модификации для работы в трех температурных диапазонах: от 0 до +70°C, от -40 до +85°C и от -40 до +125°C.

Каждый из контроллеров содержит универсальные (от 1 до 3) и сторожевой таймеры, а также надежную встроенную систему сброса при включении питания.

Частота внутреннего тактового генератора задается либо кварцевым резонатором, либо RC-цепочкой в диапазоне 0 – 25 МГц.

PIC-контроллеры имеют от 12 до 33 линий цифрового ввода-вывода, причем каждая из них может быть независимо настроена на ввод или вывод.

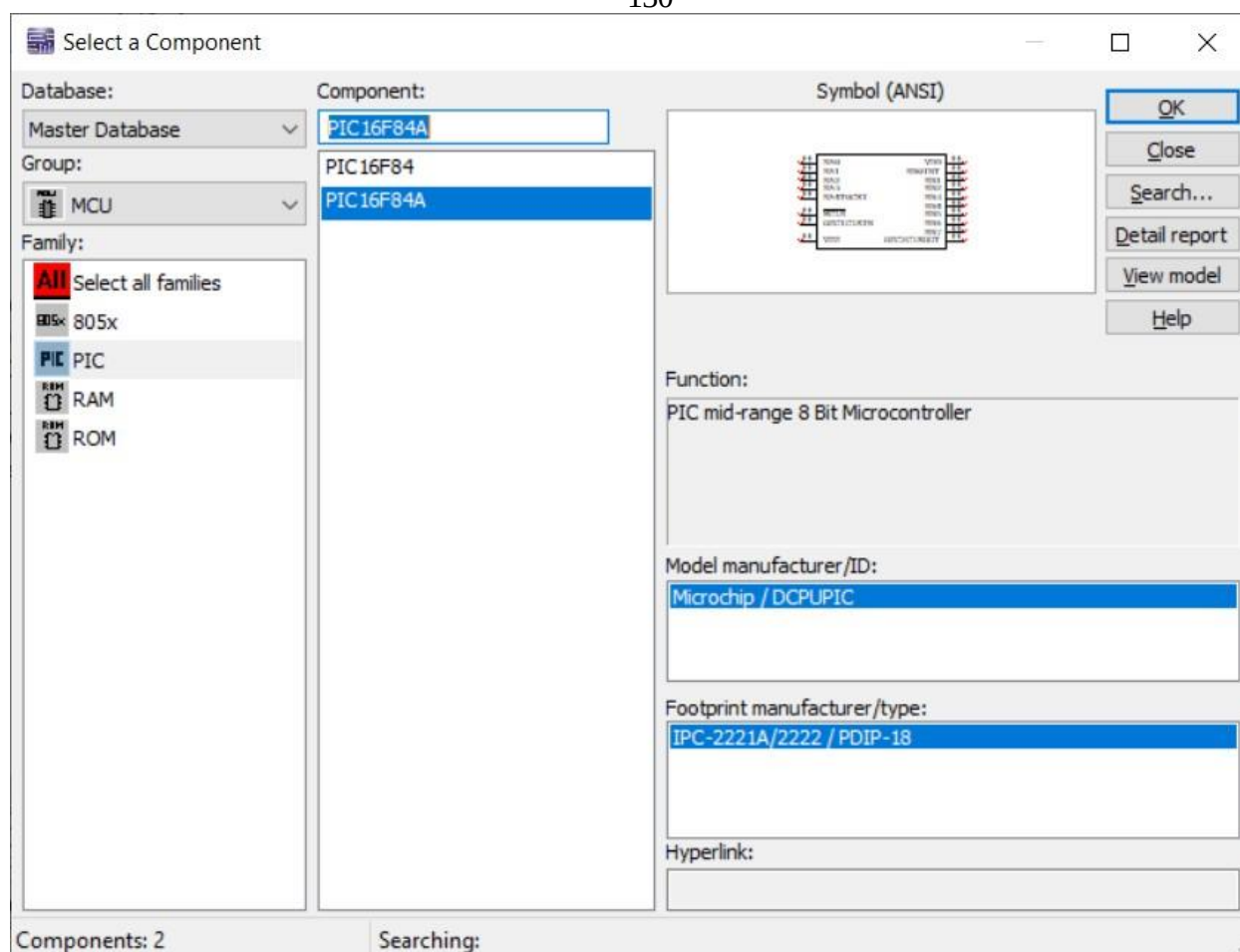
В устройство PIC16C64 входит широтно-импульсный модулятор, с помощью которого можно реализовать ЦАП с разрешением до 16 разрядов. Здесь есть и последовательный двунаправленный синхронно-асинхронный порт, обеспечивающий возможность организации шины I2C. Приборы

PIC16C71 и PIC16C74 содержат встроенный многоканальный 8-разрядный АЦП с устройством выборки-хранения.

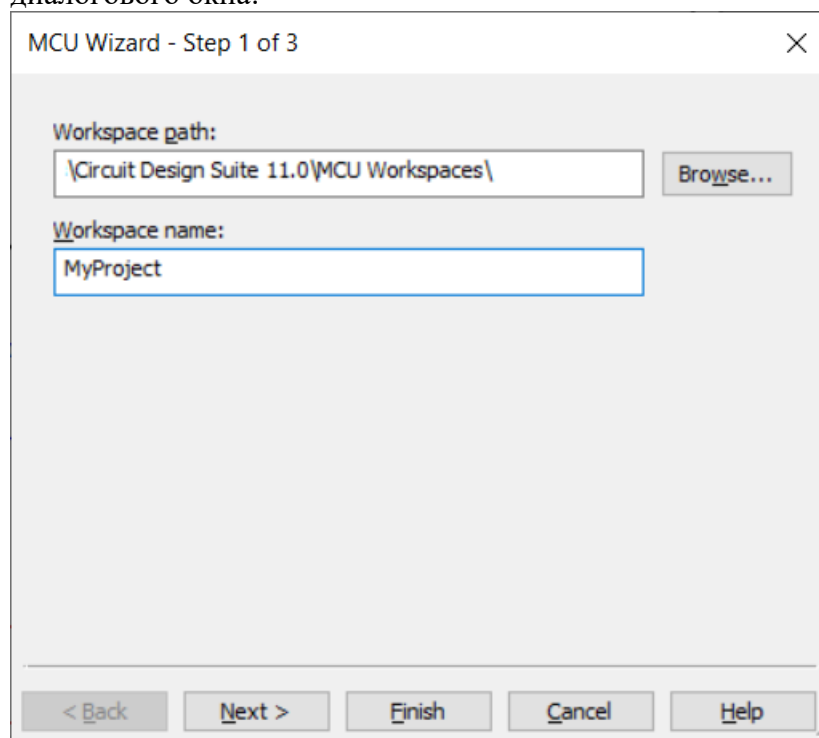
Пример выполнения работы

Пусть, например, требуется выполнить указанное задание для функции $\sin(x)$.

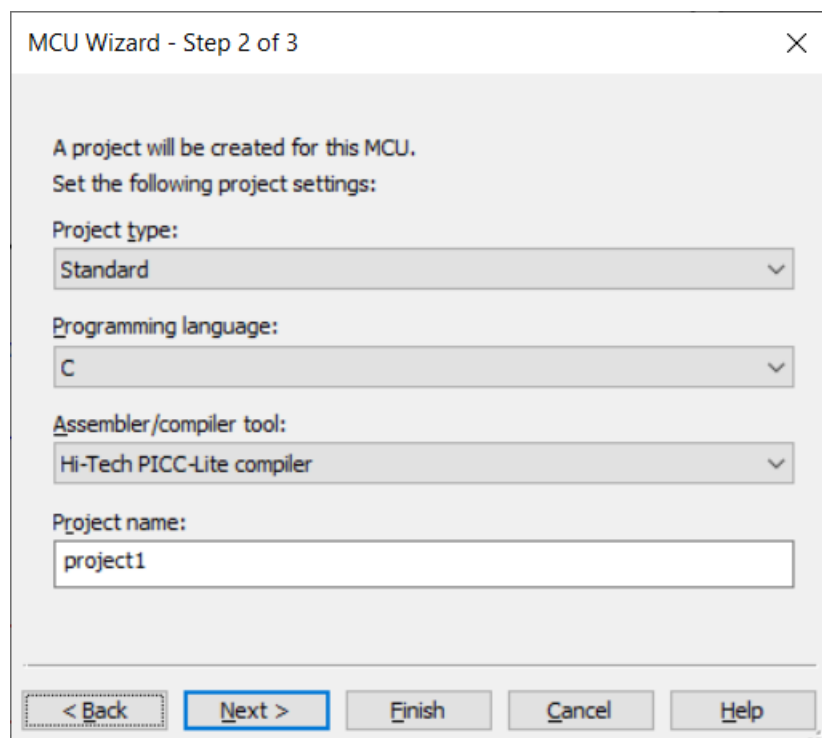
1. Создадим новый проект в среде Multisim и добавим на рабочее поле микроконтроллер PIC16F84A с помощью кнопки «Place MCU» на панели инструментов :



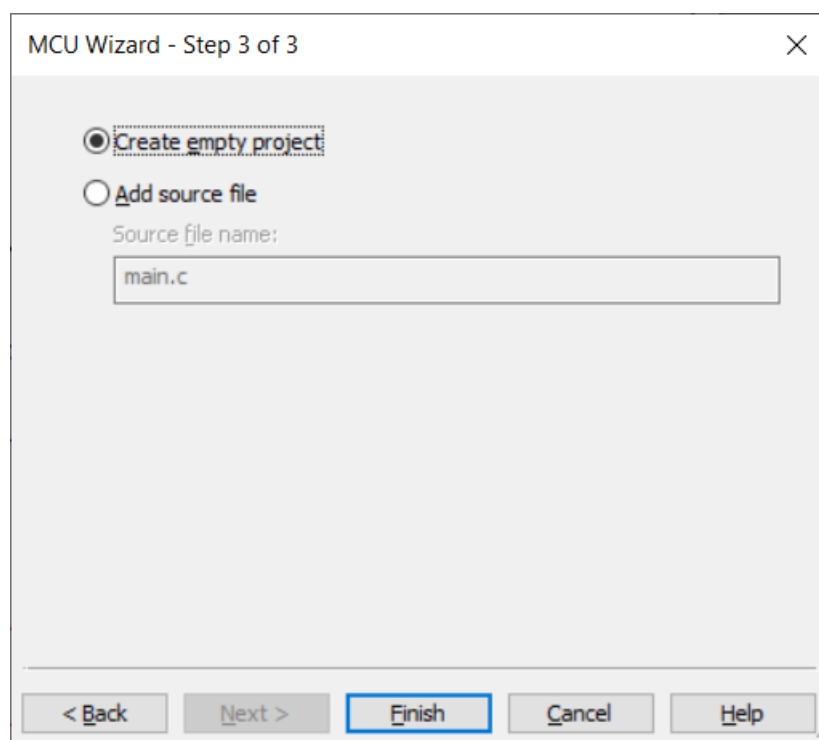
2. Укажем путь для хранения файлов проекта и его имя с помощью следующего диалогового окна:



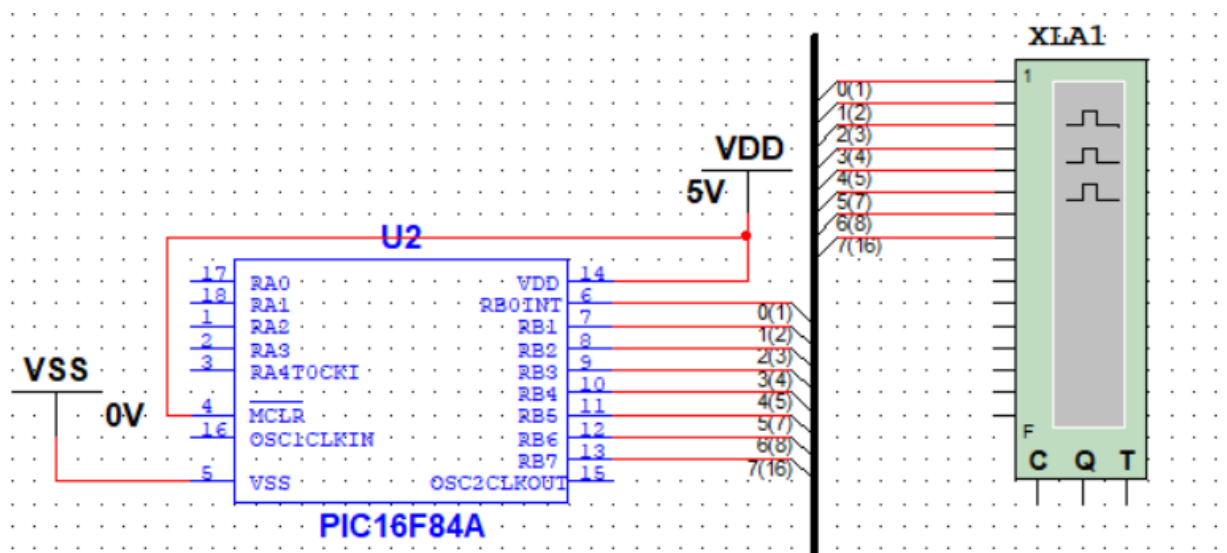
Выберем язык программирования «C» и имя каталога с программами для данного микроконтроллера:



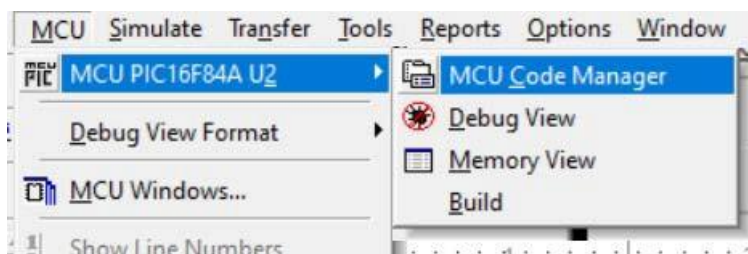
Для начала, создадим пустой файл программы микроконтроллера:



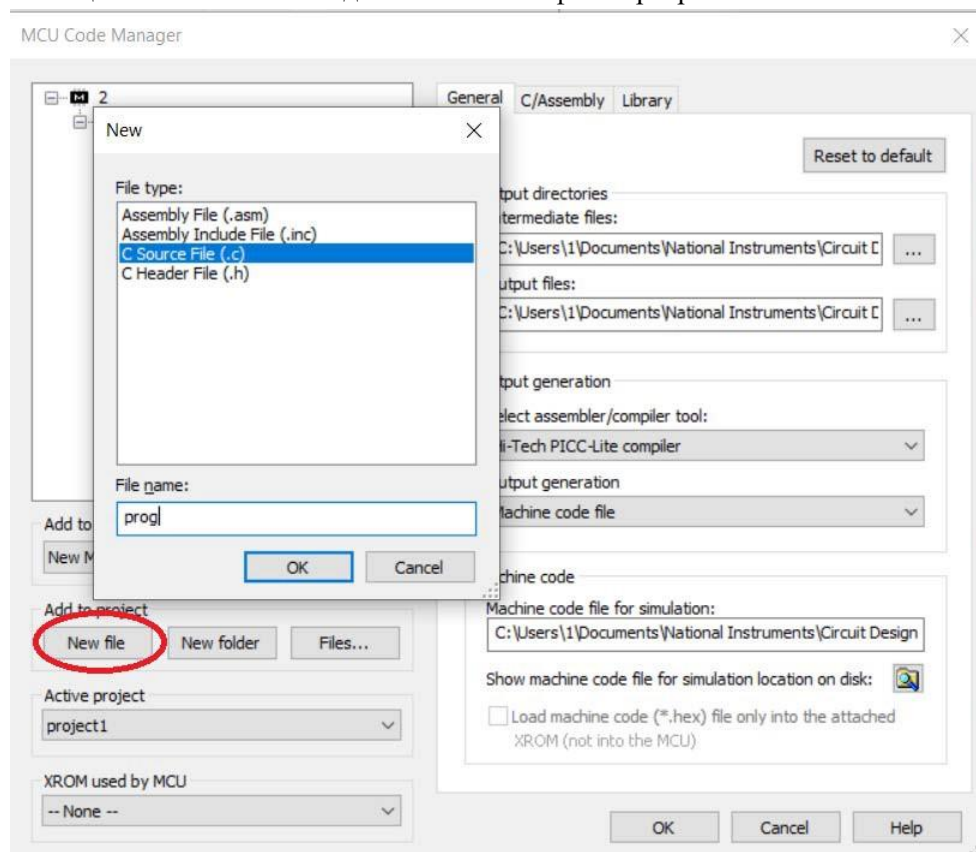
3. Разместим микроконтроллер на рабочей области, и подключим его по следующей схеме:



4. С помощью команды меню MCU



откроем менеджер программного кода для микроконтроллера, и в разделе Add to project, с помощью кнопки New file добавить новый файл программы на языке C:



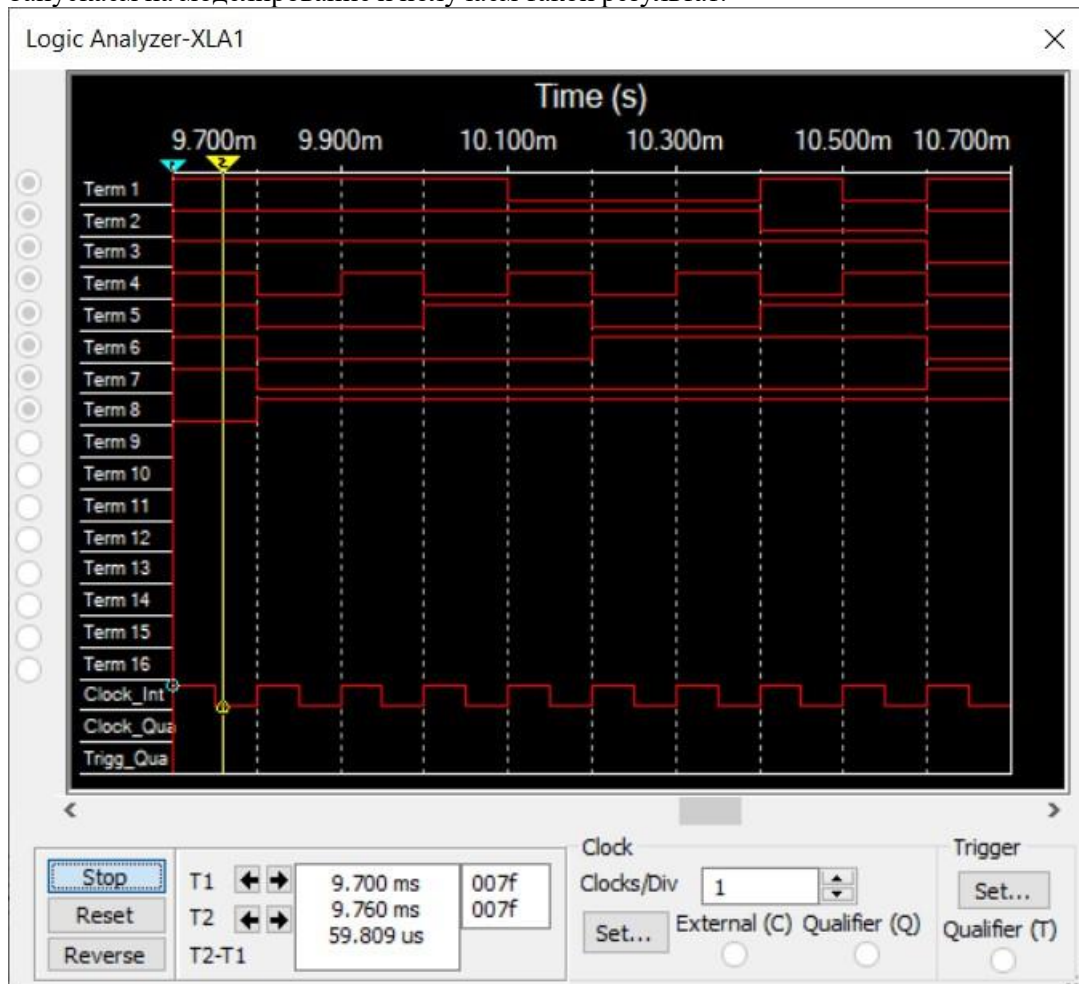
5. В файл prog.c пишем следующую программу:

```

1 #include <pic.h> //подключаем библиотеку для работы с контроллером
2 const unsigned char mas[100] = {127,135,143,151,158,166,174,181,188,195,202,208,214,220,225,230,234,238,242,245,248,250,252,253,253,
3 //данные для предыдущей строки получены в задаче 4.2
4 unsigned int i=0; // объявим переменную для счетчика цикла
5
6 void setup(void) //функция инициализации микроконтроллера
7 {
8   TRISA = 0b00000001; //программируем 0-й разряд порта А на ввод (в этой работе не принципиально, но скоро пригодится)
9   TRISB = 0b00000000; //программируем весь порт В на вывод
10  PORTA = 0; //обнуляем порт А
11  PORTB = 0; //обнуляем порт В
12 }
13
14 void wait(unsigned int t) //функция задержки (чем больше t, тем больше задержит)
15 {
16   while (t-->0);
17 }
18
19 void main()
20 {
21   setup(); //вызов функции инициализации микроконтроллера
22   while (1) //бесконечный цикл работы микроконтроллера
23   {
24     for (i=0;i<100;i++) // в цикле выводим все элементы массива с кодами
25     {
26       PORTB=mas[i]; //в порт В
27       wait(20); //и ждем 20ед.времени
28     }
29   }
30 }

```

6. Запускаем на моделирование и получаем такой результат:



Как видно, сигналы на выходе логического анализатора соответствуют заданным, и можно сделать вывод о корректности работы программы.

2. Задачи

Решить задачу 2 из предыдущего практического занятия.

Вопросы к практическому занятию

- 1 Для чего нужны счетчики?
- 2 Какие триггеры используются для реализации счетчика.
- 3 Какие типы счетчиков вы знаете?
- 4 Сколько триггеров нужно для десятичного счетчика?
- 5 Объясните принципы работы реверсивного счетчика.
- 6 Для чего предназначены АЦП и ЦАП?
- 7 Какой из АЦП последовательного действия обладает наибольшим быстродействием: с последовательным счетом, с поразрядным уравниванием или интегрирующий?

Список рекомендуемой литературы

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.
- 3 Системы электроснабжения: учебник / Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко. – Ростов н/Д: Феникс, 2011. – 382 с. (Высшее образование). – ISBN 978-5-222-17730-3.
4. 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.

Дополнительная литература

5. Касаткин А.С. Электротехника: Учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. - 12-е изд. – М.: Академия, 2008. - 544 с. – ISBN 9785769557729.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
7. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для студентов / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.
8. Вольдек А.И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. – 349 с.
9. Козлов В.А. Электроснабжение городов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 264 с.
10. Цигельман И.Е. Электроснабжение гражданских зданий и коммунальных предприятий. – М.: Высшая школа, 1988. – 319 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по организации самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

«ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

для студентов направление подготовки/специальности

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств
направленность (профиль) «Технология машиностроения»

СОДЕРЖАНИЕ

Самостоятельное занятие 1 (2 ч)	5
Эквивалентные преобразования в электрических цепях.....	6
Самостоятельное занятие 2 (2 ч)	7
Резонанс в цепях синусоидального тока.....	7
Самостоятельное занятие 3 (4 ч)	8
Методы анализа переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях	8
Самостоятельное занятие 4 (4 ч)	9
Специальные виды электрических машин	9
Самостоятельное занятие 5 (2 ч)	10
Управляемые выпрямители.....	10

Эквивалентные преобразования в электрических цепях

Цель занятия: Изучить эквивалентные преобразования в электрических цепях: сложение параллельных и последовательных сопротивлений, взаимные преобразования соединений сопротивлений треугольником и звездой

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

Контрольные вопросы

1. Как определяется общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении сопротивлений?
2. Как рассчитывается сопротивление при переходе от «звезды» сопротивлений к «треугольнику»?
3. Как рассчитывается сопротивление при переходе от «треугольника» сопротивлений к «звезде»?
4. Чему равно общее напряжение на участке цепи, если он состоит из нескольких сопротивлений, напряжение на которых известно?
5. Чему равен результирующий ток через последовательно соединенные сопротивления, если известен ток через каждый из них?
6. Три сопротивления соединены параллельно чему равно результирующее напряжение, если известно напряжение на каждом сопротивлении?
7. Несколько сопротивлений соединены параллельно, чему равен результирующий ток, если известен ток через каждое сопротивление?
8. Изменяется ли токораспределение в цепи при замене «звезды» сопротивлений на «треугольник»?
9. Поменяются ли потенциалы в узлах, являющихся вершинами «треугольника» сопротивлений при эквивалентной замене его на «звезду»?

Резонанс в цепях синусоидального тока

Цель занятия: изучить понятие и виды резонанса в синусоидальных цепях, условия его возникновения и основные характеристики колебательного контура.

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.
6. Что называют добротностью резонансного контура?
7. Что представляют собой частотные характеристики колебательного контура? Изобразите схематично частотные характеристики для последовательного и параллельного соединения L -, C -элементов.
8. Изменением каких параметров можно настроить колебательный контур на режим резонанса?
9. Изобразите схематично резонансные кривые.

Методы анализа переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях

Цель занятия: изучить динамические свойства преобразователей и признаки по которым производится классификация преобразователей.

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

Контрольные вопросы

1. Дайте определение переходному процессу.
2. Что понимают под установившимися (принужденными) и свободными токами и напряжениями.
3. Сформулируйте законы (правила) коммутации.
4. Дайте определение зависимым и независимым начальным условиям.
5. Что такое и как составляется характеристическое уравнение?
6. Изложите сущность классического метода расчета и принцип составления уравнений для определения постоянных интегрирования.
7. Изложите сущность и этапы расчета операторным методом.
8. Изложите сущность и охарактеризуйте идею расчета с помощью интеграла Дюамеля. В каких случаях используют этот метод?
9. Охарактеризуйте известные вам группы методов расчета переходных процессов в нелинейных цепях.

Специальные виды электрических машин

Цель занятия: изучить специальные виды электрических машин, область их применения.

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

Контрольные вопросы

1. Что собой представляют и где используются исполнительные двигатели постоянного тока и тахогенераторы?
2. Назначение сварочных и печных трансформаторов.
3. Выпрямительные трансформаторы
4. Для чего используются и что собой представляют асинхронные исполнительные двигатели и тахогенераторы?
5. Что такое вращающиеся трансформаторы?
6. Область использования однофазных сельсин.
7. Что собой представляет одноякорный преобразователь?
8. Где используются тихоходные и шаговые двигатели? Что они собой представляют?
9. Что собой представляют машины двойного питания?

Управляемые выпрямители

Цель занятия: изучить принцип действия управляемых выпрямителей, область их применения.

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

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой выпрямитель?
2. Какой полупроводниковый прибор является основой управляемого выпрямителя?
3. Поясните принцип действия однополупериодного управляемого выпрямителя.
4. Поясните принцип действия двухполупериодного управляемого выпрямителя
5. Что такое угол включения?
6. Для чего нужна схема управления в управляемом выпрямителе?
7. В какой момент вентиль управляемого выпрямителя закрывается?
8. Изобразите схематично временную диаграмму одно- и двухполупериодного управляемого выпрямителя с углом включения $\pi/6$.
9. Что такое отпирающее напряжение?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

1. Касаткин А.С. Электротехника: Учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. - 12-е изд. – М.: Академия, 2008. - 544 с. – ISBN 9785769557729.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
3. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для студентов / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. – 349 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по выполнению контрольной работы
по дисциплине «ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»
для студентов направления подготовки/специальности
15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств
направленность (профиль) «Технология машиностроения»

Ставрополь
2025

1 ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЯ И ЕГО ОБЪЕМ

Цель занятия: проверка усвоения студентом соответствующих тем по дисциплине «Электротехника и электроника».

Контрольная работа состоит из двух заданий. Исходные данные для расчетов по заданиям выдаются преподавателем студенту индивидуально.

Задание 1. Тема: Расчет электрических цепей постоянного тока.

Задание. Для электрической схемы, изображенной на рисунках 1.1–1.30 и по параметрам, заданным в таблице 1.1, для соответствующего варианта выполнить следующее:

- 1) Найти токи в ветвях, пользуясь:
 - а) законами Кирхгофа;
 - б) методом контурных токов;
 - б) методом узловых потенциалов;
- 2) определить показание вольтметра и составить баланс мощностей;
- 3) построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура.

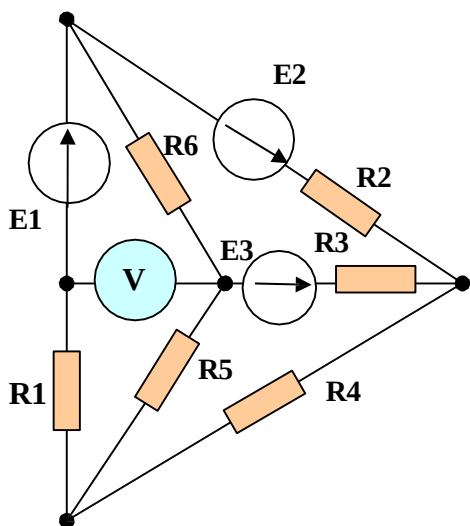


Рисунок 1.1

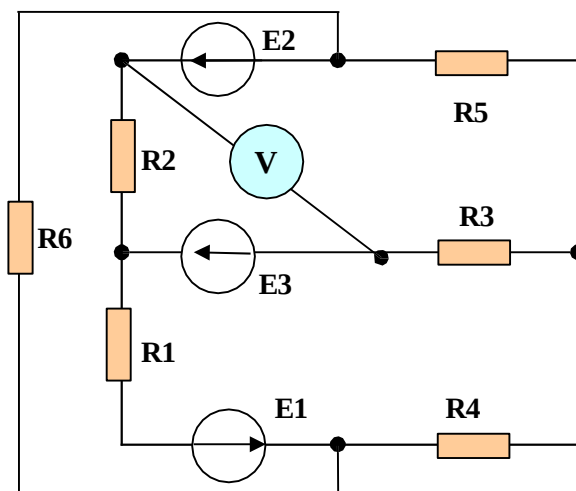


Рисунок 1.2

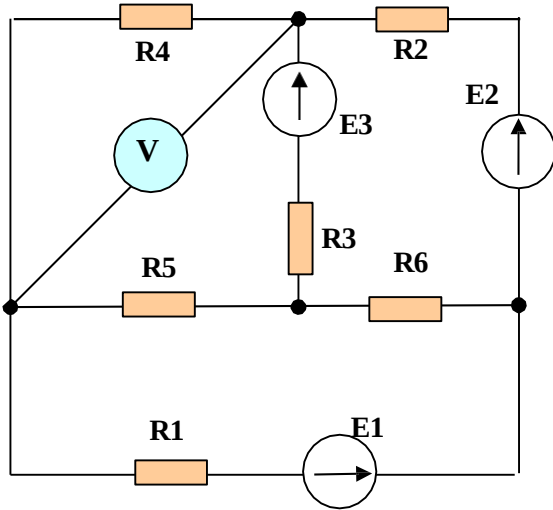


Рисунок 1.3

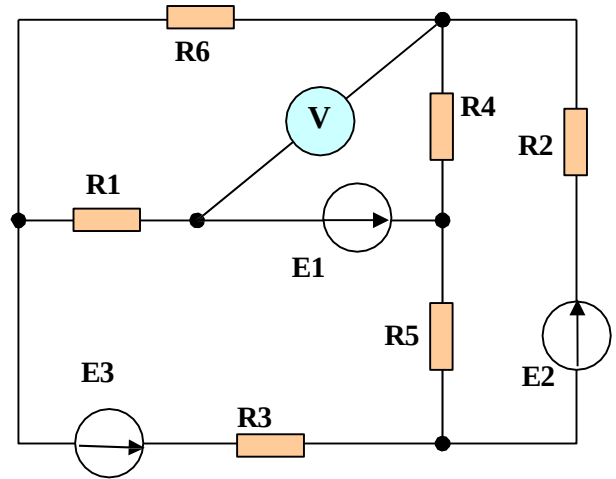


Рисунок 1.4

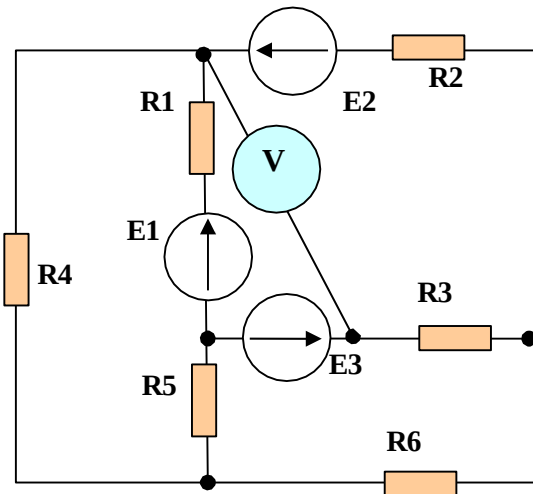


Рисунок 1.5

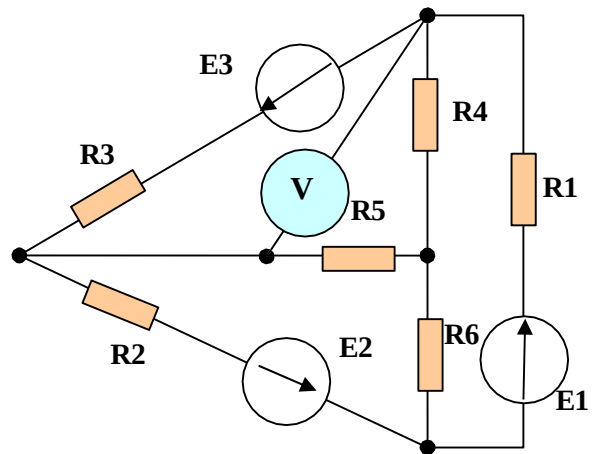


Рисунок 1.6

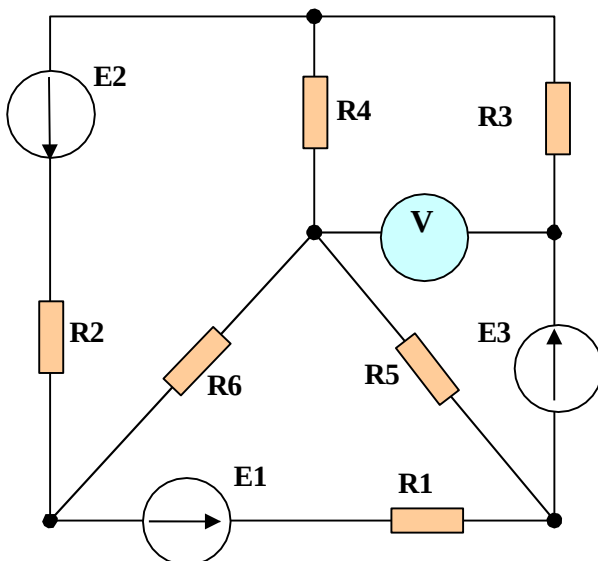


Рисунок 1.7

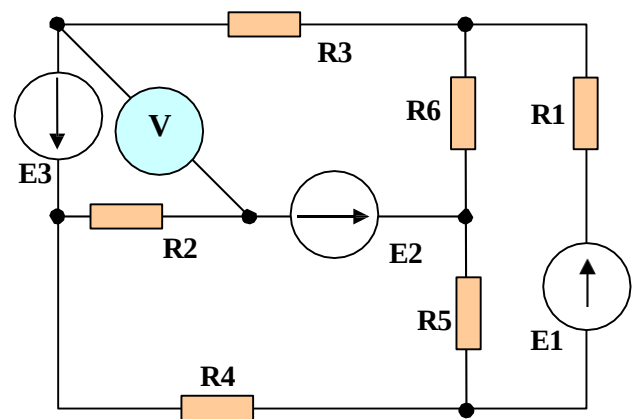


Рисунок 1.8

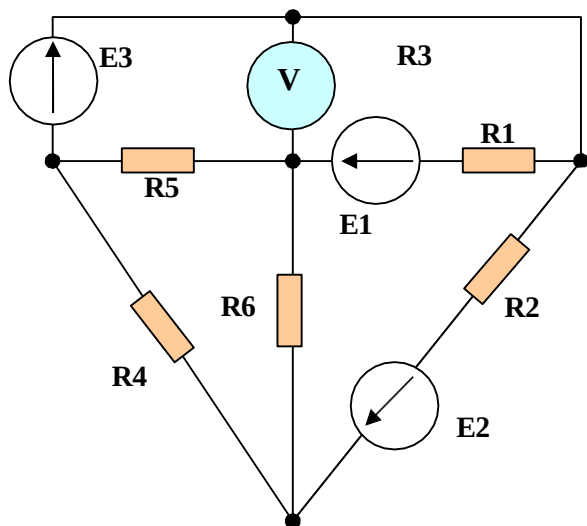


Рисунок 1.9

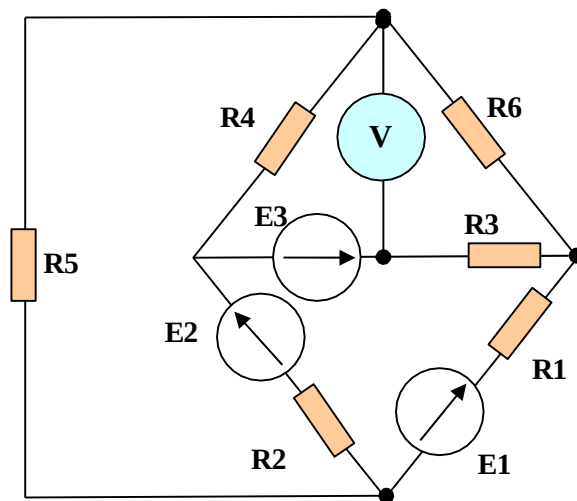


Рисунок 1.10

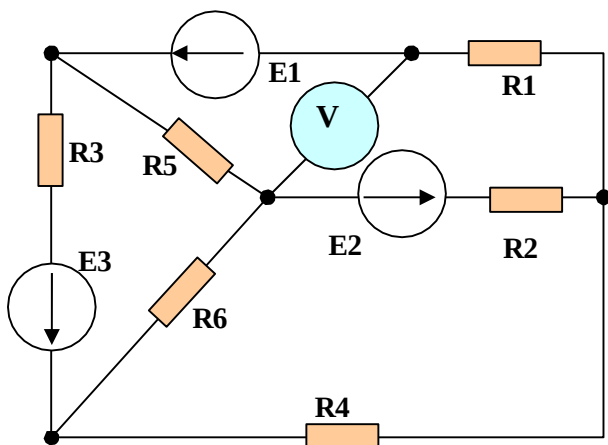


Рисунок 1.11

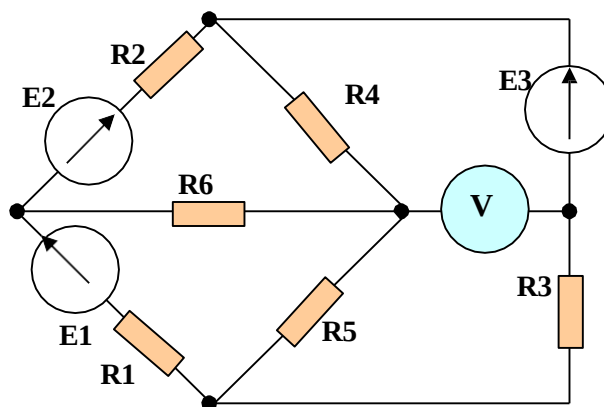


Рисунок 1.12

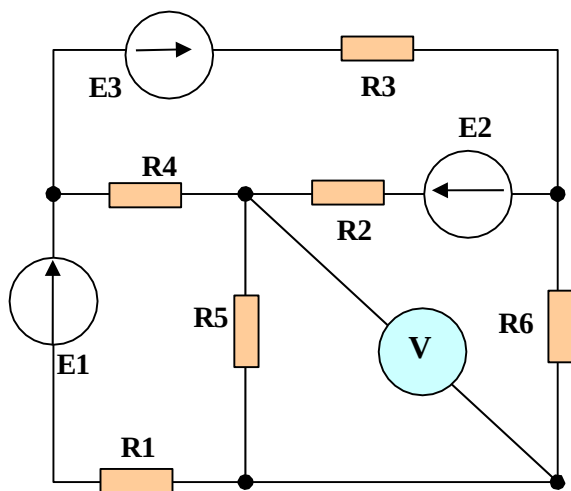


Рисунок 1.13

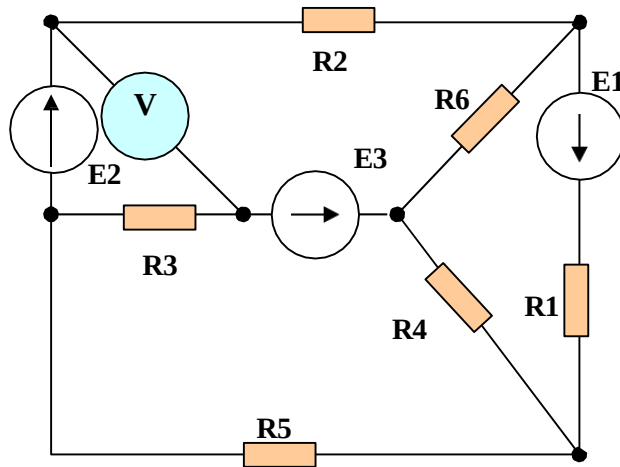


Рисунок 1.14

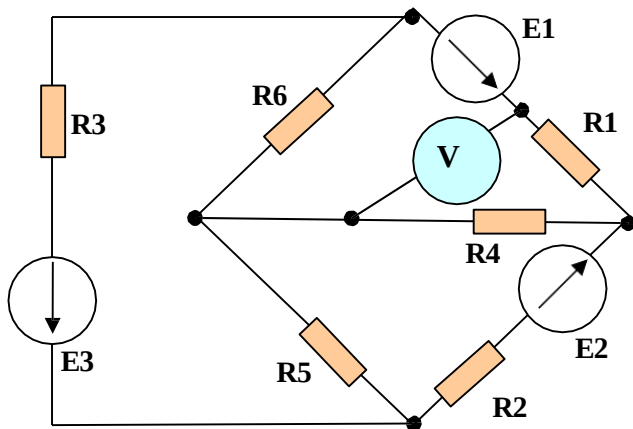


Рисунок 1.15

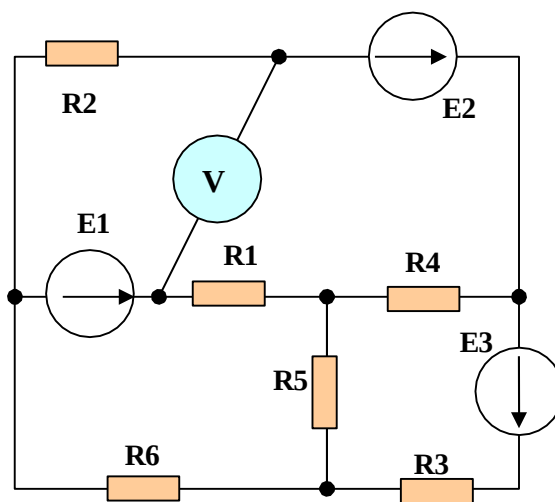


Рисунок 1.16

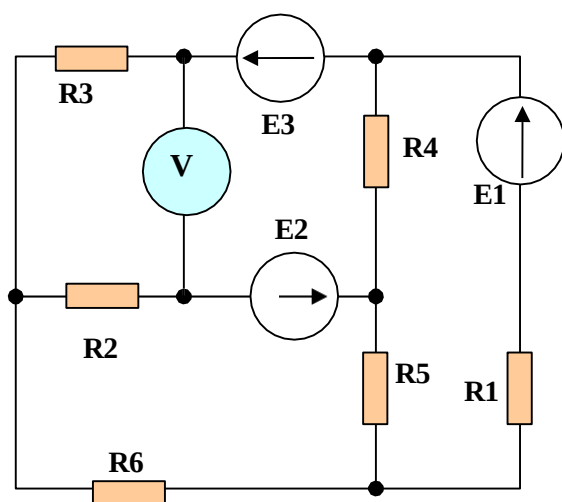


Рисунок 1.17

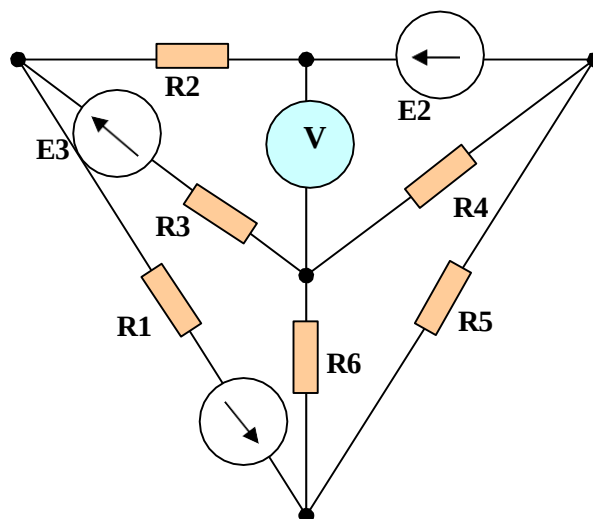


Рисунок 1.18

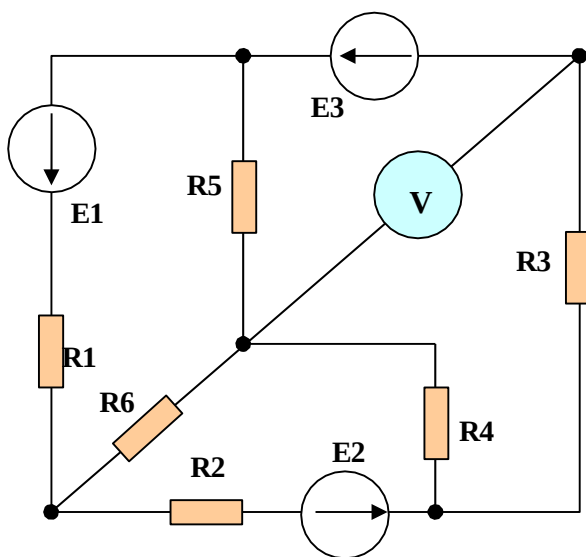


Рисунок 1.19

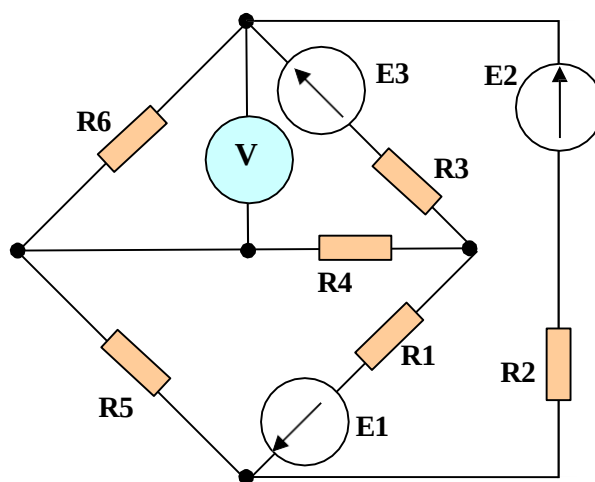


Рисунок 1.20

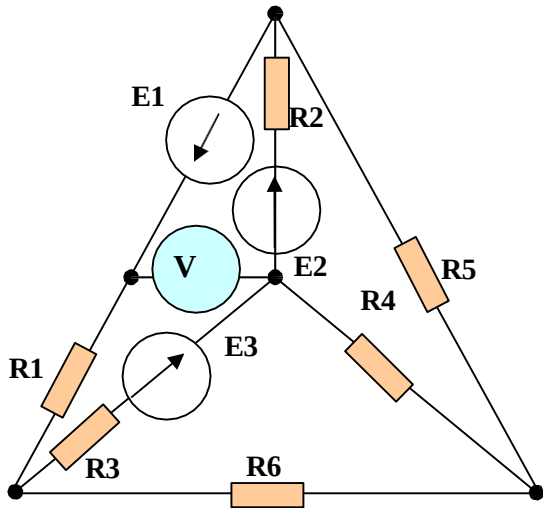


Рисунок 1.21

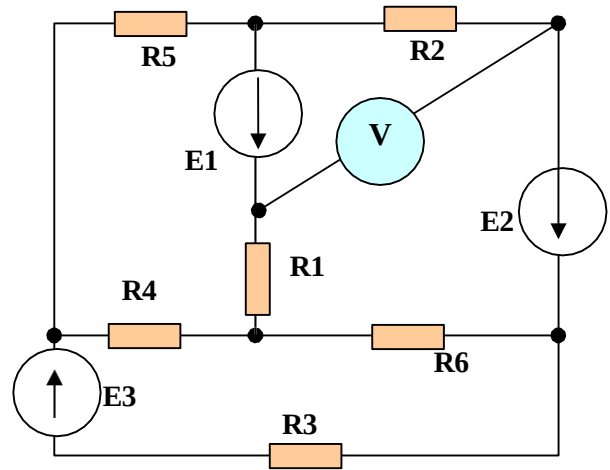


Рисунок 1.22

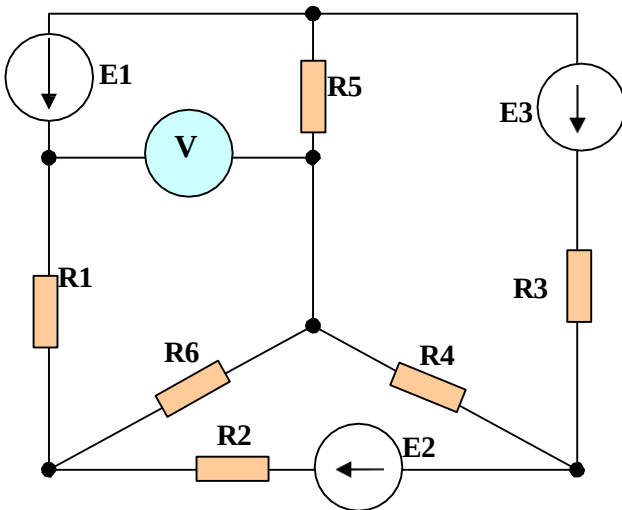


Рисунок 1.23

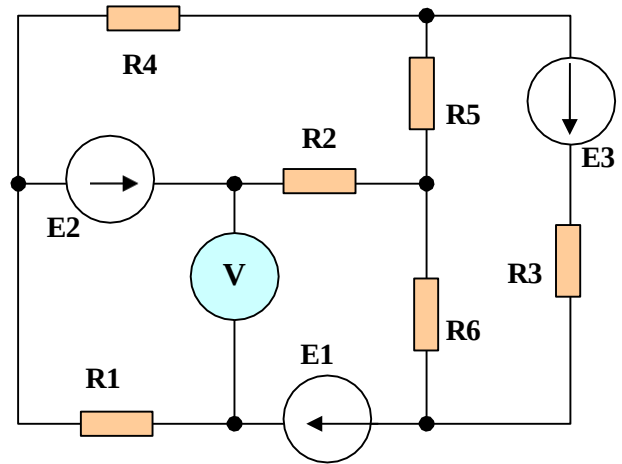


Рисунок 1.24

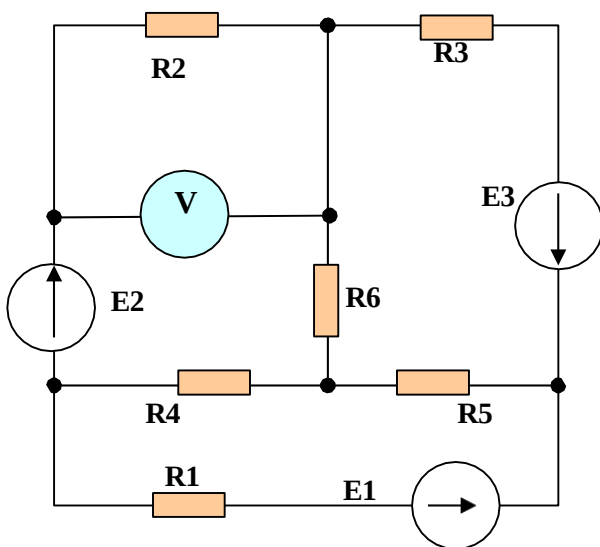


Рисунок 1.25

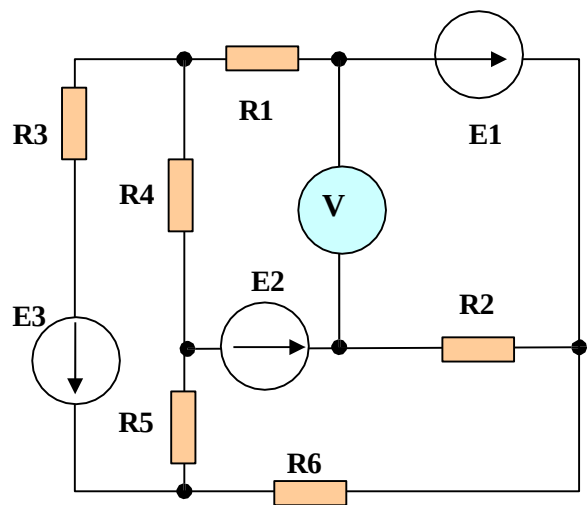


Рисунок 1.26

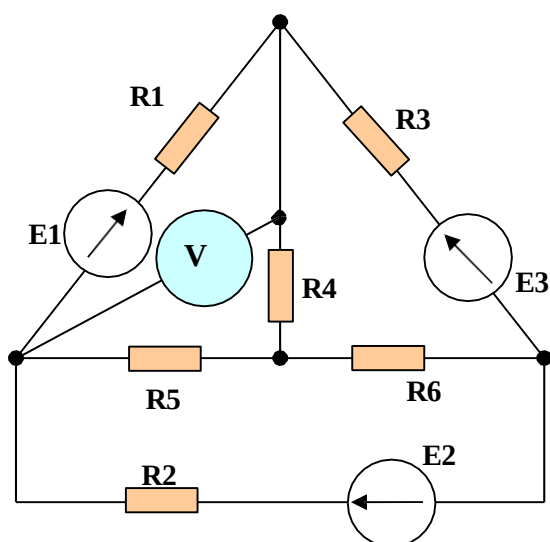


Рисунок 1.27

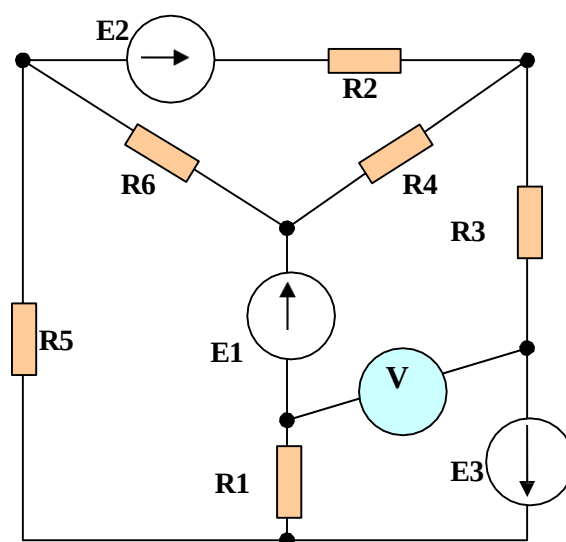


Рисунок 1.28

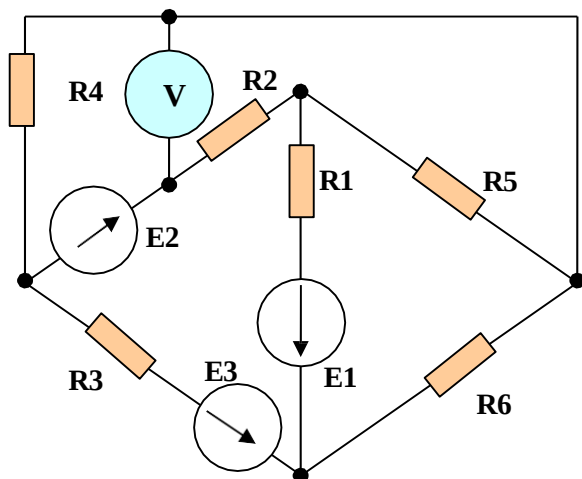


Рисунок 1.29

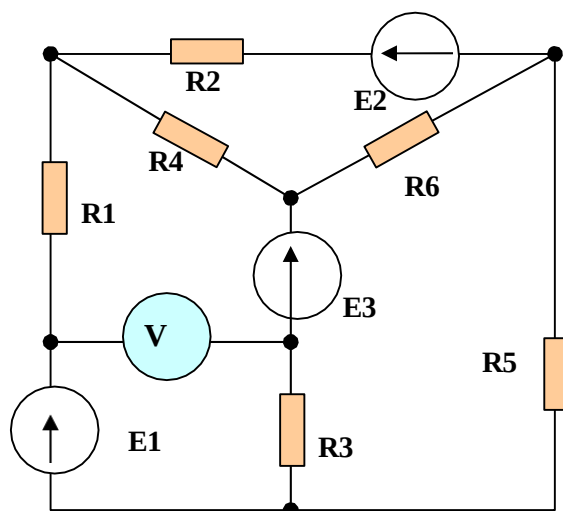


Рисунок 1.30

Таблица 1.1 – Варианты задания 1

№ варианта	№ рисунка	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.1	25	38	4	6	7	4	2	10	4
2	1.2	31	20	25	6	8	2	1	3	7
3	1.3	36	15	32	4	5	6	4	5	5
4	1.4	18	26	28	7	3	7	2	4	6
5	1.5	40	26	9	2	4	4	3	2	4
6	1.6	25	13	30	4	1	8	2	7	3

№ варианта	№ рисунка	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
7	1.7	30	16	24	7	7	7	6	5	1
8	1.8	10	30	4	5	5	6	4	8	3
9	1.9	11	8	10	4	8	9	8	7	1
10	1.10	45	19	18	4	6	1	8	8	2
11	1.11	54	26	6	6	9	4	6	9	4
12	1.12	36	18	9	4	10	3	5	1	5
13	1.13	40	22	6	9	3	3	9	2	2
14	1.14	15	46	12	8	7	4	7	4	9
15	1.15	32	26	40	8	6	3	6	7	8
16	1.16	18	16	36	6	3	7	8	6	6
17	1.17	52	17	4	5	4	5	4	9	4
18	1.18	32	38	6	2	5	3	2	3	2
19	1.19	20	50	9	3	6	9	3	3	3
20	1.20	29	6	27	5	5	4	9	3	4
21	1.21	18	53	6	3	3	7	3	9	1
22	1.22	44	26	3	5	6	4	5	1	4
23	1.23	38	19	24	7	5	3	7	3	2
24	1.24	13	60	9	5	3	7	3	5	6
25	1.25	14	20	25	2	9	6	3	3	5
26	1.26	20	26	10	5	7	9	2	6	8
27	1.27	30	36	10	9	5	4	5	4	3
28	1.28	15	40	36	7	3	7	7	8	5
29	1.29	42	28	8	4	7	5	4	7	4
30	1.30	18	48	10	6	6	1	9	9	2

Задание 2. Тема: Расчет трехфазных электрических цепей.

Задание. Трехфазная нагрузка соединена звездой с нулевым проводом (рисунок 1.31) и подключена к источнику с симметричными линейными напряжениями $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Значения сопротивлений фаз нагрузки выбираются согласно таблицы 1.2. Требуется:

1. Рассчитать линейные токи I_A, I_B, I_C .
2. Рассчитать активную, реактивную и полную мощности цепи.
3. Построить векторную диаграмму и определить ток I_N в нулевом проводе.

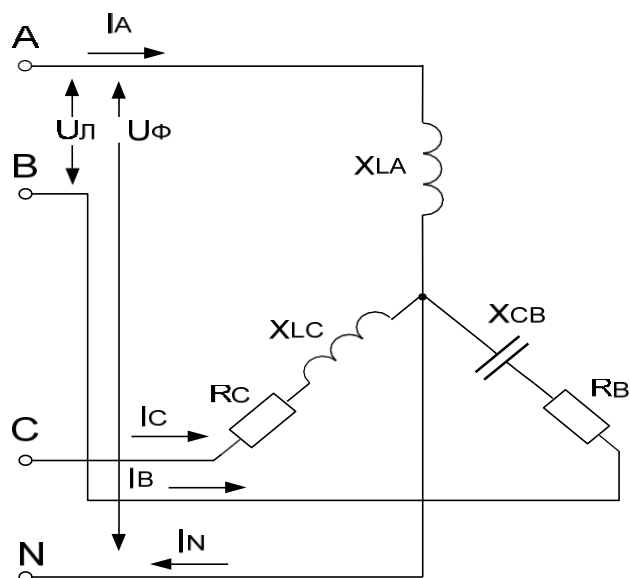


Рисунок 1.31 – Схема трехфазной цепи

Таблица 1.2 – Исходные данные к заданию

№ варианта	Сопротивление нагрузки фазы, Ом A	Сопротивление нагрузки фазы, Ом B		Сопротивление нагрузки фазы, Ом C	
	X_{LA}	R_B	X_{CB}	R_C	X_{LC}
1	21	10	8	4	8
2	12	8	7	5	12
3	16	14	6	14	5
4	18	7	5	15	6
5	34	15	15	10	16
6	22	16	13	8	16
7	28	18	11	9	18
8	10	11	18	9	7
9	25	5	22	21	9
10	8	9	14	7	13
11	11	14	8	5	7
12	27	16	8	15	15
13	30	13	18	16	8
14	15	9	16	18	7
15	24	18	5	10	21
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).

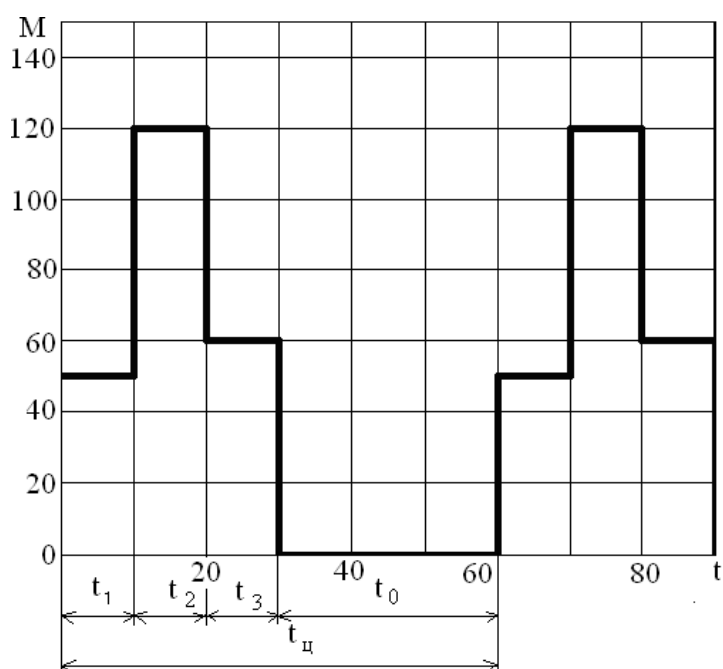


Рисунок 1.32 – Циклический график нагрузки привода механизма

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	$M_{\Pi}^* =$	$M_{\max}^* =$	$s_{ном}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%		
	$M_{пуск}$	$M_{\max}$		$P_{ном}$, кВт	, %	cos	$P_{ном}$, кВт	, %	cos	$P_{ном}$, кВт	, %	cos	$P_{ном}$, кВт	, %	cos
	$M_{ном}$	$M_{ном}$													
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	$M_{\Pi}^* =$	$M_{\max}^* =$	$s_{\text{ном}}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%			
	$M_{\text{пуск}}$	$M_{\max}$		$P_{\text{ном}}$, кВт	, %	cos	$P_{\text{ном}}$, кВт	, %	cos	$P_{\text{ном}}$, кВт	, %	cos	$P_{\text{ном}}$, кВт	, %	cos	
	$M_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}}$														
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	

Задание 4 Тема: Основы электроники.

Задание. По рекомендуемой литературе изучить раздел «Электроника» и ответить на вопрос своего варианта.

1. Электропроводность полупроводников.
2. Контактные явления в полупроводниках.
3. Электронно-дырочный переход: запирающий слой, прямое и обратное включение, вольт-амперная характеристика, емкость, пробой .
4. Полупроводниковые выпрямительные диоды: устройство, принцип действия, основные параметры и характеристики.
5. Полупроводниковые диоды: классификация, назначения, области применения.
6. Стабилитроны: назначения, устройство, принцип действия, параметры, применение, характеристики.
7. Фотодиоды: устройство, назначение, принцип действия, параметры.
8. Светодиоды: устройство, назначение, принцип действия, параметры.
9. Туннельные диоды: устройство, принцип действия, параметры, применение.
10. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы.
11. Излучающие полупроводниковые приборы.
12. Назначение, классификация, устройство, принцип действия, основные параметры и характеристики варикапов.
13. Назначение, классификация, устройство, назначение оптоэлектронных элементов.
14. Принцип действия, параметры и характеристики оптоэлектронных элементов.
15. Биполярные транзисторы: устройство, усилительные свойства.
16. Схемы включения биполярных транзисторов.
17. Параметры и характеристики биполярных транзисторов.
18. Полевые транзисторы: классификация, основные физические процессы.
19. Устройство полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

20. Устройство полевого транзистора с изолированным затвором
21. Полевые транзисторы: схемы включения, использование.
22. Параметры и характеристики полевых транзисторов
23. Тиристоры: устройство, принцип действия, назначения, классификация.
24. Основные параметры и характеристики тиристоров.
25. Понятие и классификация источников вторичного электропитания
26. Выпрямители: назначение, классификация, структура, основные параметры.
27. Однофазные неуправляемые выпрямители: принцип действия различных схем, их достоинства, недостатки, параметры.
28. Управляемые однофазные выпрямители.
29. Трехфазные неуправляемые выпрямители.
30. Управляемые трехфазные выпрямители.

2 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НАПИСАНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа выполняется на листах стандартных размеров формата А4 (297×210мм²), заполненных с одной стороны. Листы нумеруются и оставляются поля: слева для подшивки – 30 мм, справа – 15 мм, снизу и сверху – 20 мм. При оформлении отчета условные обозначения всех элементов схем изображать по действующим ГОСТ. При этом можно ориентироваться на принятые в учебной литературе изображения элементов электронных схем. Рисунки должны быть выполнены аккуратно. Первые листы содержат текст задания, схемы и исходные данные расчетного варианта. Расчеты и необходимые пояснения выполняются на остальных листах отчета.

Структура должна соответствовать пунктам задания. Отдельные части должны иметь заголовки, комментарии и выводы. Записи и формулировки должны быть точными и ясными. При численных значениях должны быть обязательно указаны единицы измерения. В конце работы обязательно указать используемую литературу, дату и поставить свою подпись. Небрежно оформленная работа может быть возвращена студенту на доработку.

3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ, ПРИМЕРНЫЙ КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ

3.1 Последовательность выполнения задания 1

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

$$\sum I_i = 0.$$

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:

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

Пример расчета электрической цепи (рисунок 3.1) с использованием законов Кирхгофа.

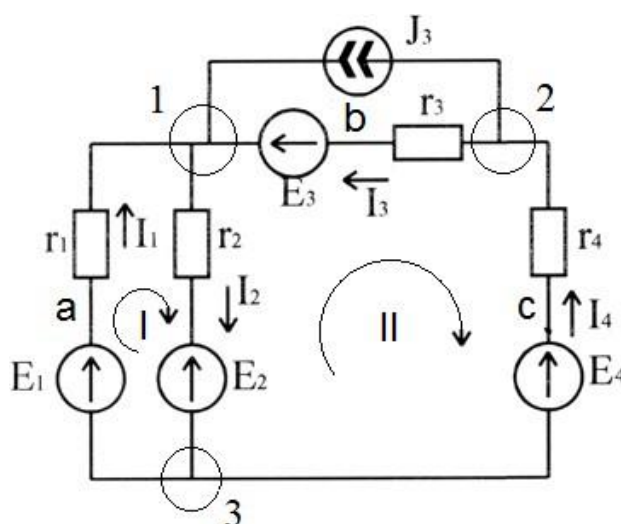


Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи

1. Определим количество узлов u и ветвей b электрической цепи. Так, в данной цепи имеется три узла, обозначенных цифрами 1, 2 и 3, всего $u = 3$. Ветви находятся между узлами и в представленной схеме 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, не содержащих источников тока:

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

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

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

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

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.

Пример расчета электрической цепи (рисунок 3.2) методом контурных токов. 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: $7 - 2 - 3 = 2$.

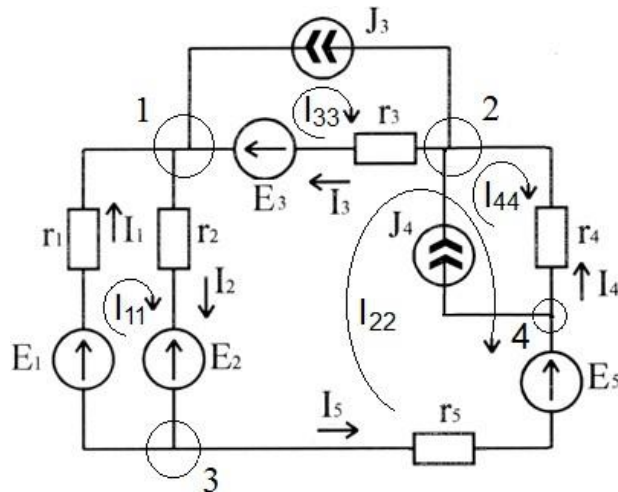


Рисунок 3.2 Схема электрической цепи для расчета по методу контурных токов

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:

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

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

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (r_1 + r_2) - I_{22} \cdot r_2 = E_1 - E_2, \\ -I_{11} \cdot r + I_{22} \cdot (r + r + r + r) - I_{33} \cdot r + I_{44} \cdot r = E_2 - E_3 - E_5. \end{cases}$$

$\begin{matrix} & 11 & 2 & 22 & 2 & 3 & 4 & 5 & 33 & 3 & 44 & 4 & 2 & 3 & 5 \end{matrix}$

Решив эту систему относительно I_{11} и I_{22} , считая $I_{33} = -J_3$ и $I_{44} = J_4$ известными, найдем токи в ветвях электрической цепи через контурные токи:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{11} - I_{22}; I_3 = I_{33} - I_{22};$$

$$I_4 = -I_{44} - I_{22}; I_5 = -I_{22}.$$

Пример расчета электрической цепи (рисунок 3.3) методом 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 $\equiv$ у φ_4 на расчетной схеме. Потенциал узла, в который входит источник ЭДС E_5 , будет известным и равным величине ЭДС источника $\varphi_3 = E_5$.

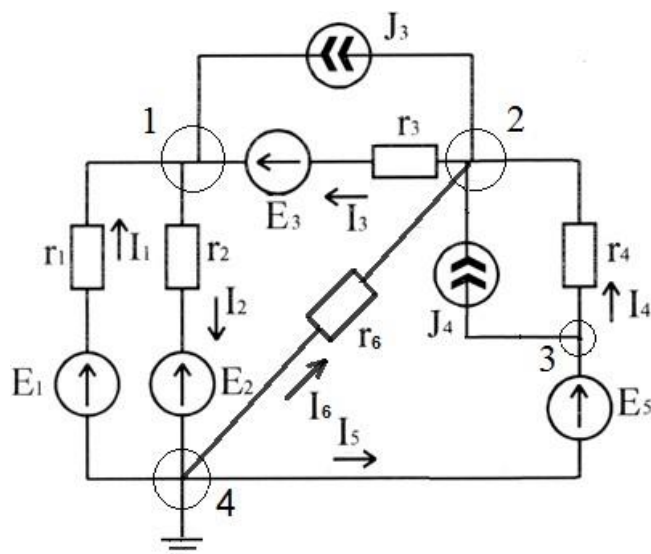


Рисунок 3.3 – Схема электрической цепи для расчета по методу узловых потенциалов

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

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

где g_{SS} – собственная проводимость узла S (сумма проводимостей ветвей,

присоединенных к узлу S). В данном случае $g_{11} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$;

$g_{22} = \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_6}$. В системе уравнений у собственных проводимостей узлов

по главной диагонали матрицы будут всегда стоять знаки «плюс».

g_{SN} – сумма проводимостей ветвей, соединяющих узел S с узлом N , всегда в системе уравнений берется со знаком «минус». В нашем случае 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

$$3 \quad g_{23} = \frac{1}{r_4}.$$

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

ветвей, примыкающих к узлу S , на их проводимости; при этом со знаком «плюс» берутся те произведения, в ветвях которых ЭДС действуют в направлении узла S , и со знаком «минус», – в направлении от узла S ;

$\sum_S J$ – алгебраическая сумма источников тока, присоединенных к узлу S , знак

перед J определяется согласно правилу, указанному выше. В данном 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 примет следующий вид

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

Решив полученную систему 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 потенциалы:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\varphi_4 - \varphi_1 + E_1}{r_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_4 - E_2}{r_2}; \quad I_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_3}{r_3}; \\ I_4 &= \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{r_4}; \quad I_5 = I_4 + J_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{r_4} + J_4; \quad I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_2}{r_6}. \end{aligned}$$

Баланс мощностей в электрической цепи.

Общая мощность источников электрической энергии для электрической цепи (рисунок 3.1) определяется следующим образом:

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

Знак «минус» 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 3.1) определяется следующим образом:

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

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.

Построение потенциальной диаграммы для внешнего контура электрической цепи, представленной на рисунке 3.1. 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 следует избегать ветвей 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. схема не изменилась.

Тогда потенциалы обозначенных в схеме точек при известных токах определяются следующим образом: $\varphi_3 = 0$; $\varphi_a = \varphi_3 + E_1$; $\varphi_1 = \varphi_a - I_1 \cdot r_1$; $\varphi_b = \varphi_1 - E_3$; $\varphi_2 = \varphi_b + I_3 \cdot r_3$; $\varphi_c = \varphi_2 + I_4 \cdot r_4$; $\varphi_3 = \varphi_c - E_4 = 0$.

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

На основании полученных значений потенциалов точек строится потенциальная диаграмма (рисунок 3.4).

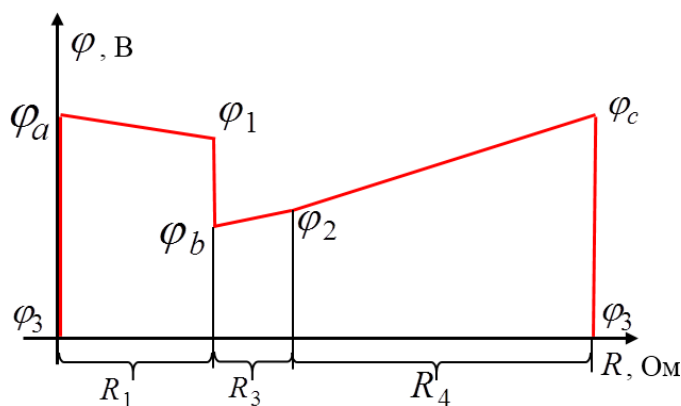


Рисунок 3.4 – Потенциальная диаграмма

Решения задания 1 рекомендуется производить в MathCad

3.2 Последовательность выполнения задания 2

При соединении обмоток трехфазного генератора звездой линейные напряжения определяются через разности фазных напряжений:

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

Для симметричного генератора (источника) фазные напряжения:

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

линейные напряжения:

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

Между линейными и фазными напряжениями для симметричного источника существует зависимость:

$$U_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\phi.$$

При соединении обмоток трехфазного источника треугольником линейные напряжения равны фазным

$$U_\phi = U_\phi.$$

Расчет трехфазных цепей синусоидального тока.

Так как трехфазные цепи являются разновидностью цепей синусоидального тока, то для них применимы те же методы и приемы: символический метод расчета, построение векторных и топографических диаграмм.

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

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

где $\underline{Z}_\phi$ – сопротивление симметричной линии на фазу. По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 3.5 б):

$$I_A = I_B = I_C = \frac{U_\phi}{|\underline{Z} + \underline{Z}_\phi|}.$$

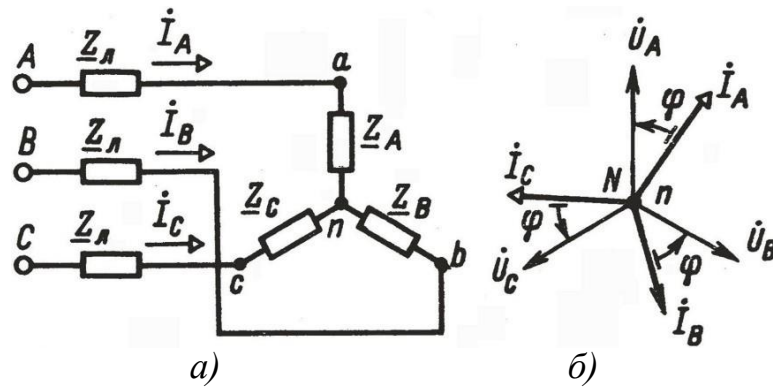


Рисунок 3.5 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

Для симметричного приемника, соединенного треугольником (рисунок 3.6 а), справедливо соотношение $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z$. Если $Z_L = 0$, то фазные токи приемника равны:

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

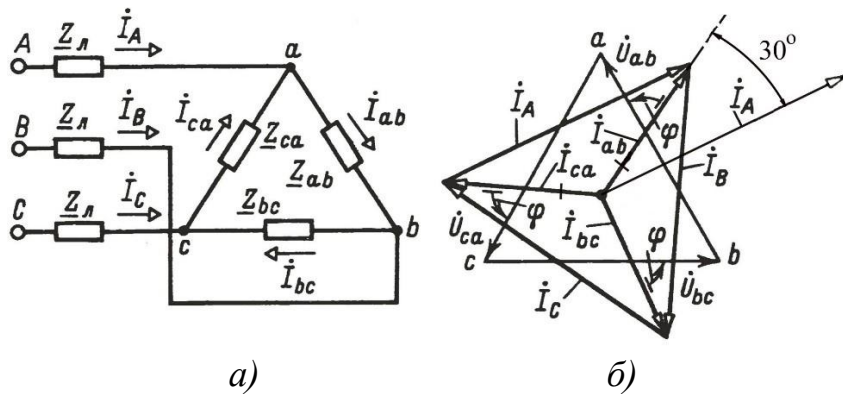


Рисунок 3.6 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

По модулю токи равны и имеют сдвиг по фазе относительно друг друга, равный 120° (рисунок 3.6 б):

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi = U_L / |Z|.$$

Линейные токи приемника определяются разностью фазных токов:

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

Как видно из векторной диаграммы (рисунок 2.13 б),

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

Если $Z_L \neq 0$, то (после преобразования треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду) линейные токи равны:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_\lambda}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_\lambda}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}/3 + \underline{Z}_\lambda}.$$

Фазные токи определяются через линейные:

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

Несимметричный режим.

Рассмотрим случай соединения приемника звездой с нейтральным проводом (рисунок 3.7).

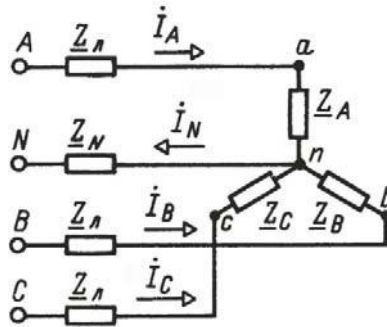


Рисунок 3.7 – Схема трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

Напряжение смещения нейтрали на основании метода двух узлов:

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

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

Линейные токи и ток в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_\lambda}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_\lambda}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_\lambda}; \dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_N}.$$

По первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C, \\ \dot{I}_A = \dot{U}_{An}/(\underline{Z}_A + \underline{Z}_\lambda); \dot{I}_B = \dot{U}_{Bn}/(\underline{Z}_B + \underline{Z}_\lambda); \dot{I}_C = \dot{U}_{Cn}/(\underline{Z}_C + \underline{Z}_\lambda). \quad (2.25)$$

При соединении приемника треугольником и $\underline{Z}_\lambda = 0$ фазные и линейные токи:

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

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

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:

$$\dot{U}_{ab} = \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A - \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B; \dot{U}_{bc} = \underline{Z}'_B \cdot \dot{I}_B - \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C;$$

$$\dot{U}_{ca} = \underline{Z}'_C \cdot \dot{I}_C - \underline{Z}'_A \cdot \dot{I}_A;$$

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

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

3.3 Последовательность выполнения задания 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:

$$M_{НОМ} = 9,55 \cdot P_{НОМ} / n_{НОМ}. \quad (3.1)$$

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

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{\sum_{k=1}^n t_k + t_0} \cdot 100\%,$$

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

$$P_P = P_{ЭКВ} \sqrt{\frac{ПВ_P\%}{ПВ_{СТ}\%}}.$$

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

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

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

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

Эквивалентная мощность двигателя

$$P_{\text{ЭКВ}} = 0,105 M_{\text{ЭКВ}} n_{2\text{НОМ}}.$$

Номинальную мощность двигателя выбирают исходя из условия

$$P_{\text{ДВ НОМ}} \geq P_p = P_{\text{ЭКВ}} \sqrt{\frac{ПВ_p \%}{ПВ_{\text{СТ}} \%}}$$

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

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

Номинальный момент двигателя рассчитываем по формуле (3.1).

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 $\lambda_{\text{МОМ}}$, т. е. отношением максимального кратковременно допустимого перегрузочного момента к номинальному моменту: $\lambda_{\text{МОМ}} = M_{\text{МАХ}} / M_{\text{НОМ}}$. Для большинства двигателей $\lambda_{\text{МОМ}} = 1,6 \dots 2,5$ (у специальных электродвигателей $\lambda_{\text{МОМ}} = 3 \dots 4$).

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

$$M_{\text{МАХ}} = \lambda_{\text{МОМ}} \cdot M_{\text{НОМ}}.$$

Необходимо выполнить условие

$$M_{\text{НБ}} < k_U \cdot M_{\text{МАХ}}.$$

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, эквивалентный момент на валу двигателя рассчитывается по формуле:

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

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 $P_{ДВНОМ} > P_{ЭКВ}$, а затем выполняется проверочный расчет по перегрузочной способности.

Задание 4. Тема: Расчет параметрического стабилизатора напряжения.

Цель: на основе заданных характеристик стабилитрона, параметров входного напряжения на входе стабилизатора, используя аналитические и графоаналитические методы рассчитать режимы работы параметрического стабилизатора напряжения совместно с нагрузкой и сделать заключение о допустимых режимах работы.

Задача 4.1 На рисунке 4.1 задана ВАХ стабилитрона, включенного в схему параметрического стабилизатора (рисунок 4.2).

Координаты точек «m» и «n», значение R_H , напряжение на входе стабилизатора U_1 задаются индивидуально каждому студенту и берутся из таблицы 4.1.

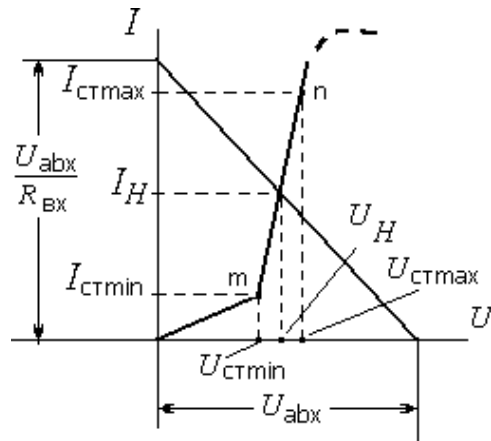


Рисунок 1.1

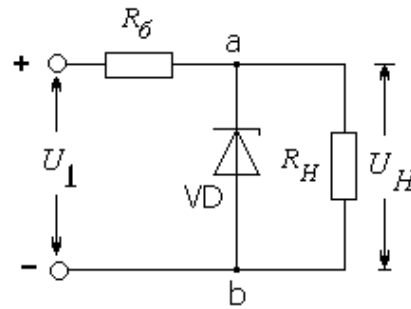


Рисунок 1.2

При условии, что номинальное напряжение на нагрузке равно $U_H = (U_{CT\ min} + U_{CT\ max})/2$, для заданного значения сопротивления нагрузки определить величину балластного сопротивления R_0 , обеспечивающего требуемый режим в точке пересечения ВАХ стабилитрона и зеркального изображения ВАХ входного сопротивления линейной части схемы по отношению к зажимам, к которым подключен стабилитрон.

Принять $U_{ab\ x} = (0,7 \dots 0,8) \cdot U_1$.

Задача 4.2 Для параметрического стабилизатора с полученным в задаче значением R_0 определить границы допустимого изменения U_1 , при котором напряжение на нагрузке будет изменяться в пределах от $U_{CT\ min}$ до $U_{CT\ max}$.

Задача 4.3 Для параметрического стабилизатора с полученным в задаче значением R_0 определить диапазон изменения сопротивления нагрузки R_H , чтобы стабилизатор мог выполнять свои функции.

Задача 4.4 Определить абсолютное $\pm \Delta U_H$ и относительное изменение $\Delta U_H \% = \pm 100 \cdot \Delta U / U_H \%$ напряжения на нагрузке R_H при условии изменения питающего напряжения на $\pm 10\%$, т.е. $\Delta U = U_1' - U_2' = 1,1 \cdot U_1 - 0,9 \cdot U_1 = 0,2 \cdot U_1$.

Изменение напряжения на нагрузочном резисторе можно определить по формуле

$$\Delta U_H = \frac{\pm \Delta U}{\left(1 + \frac{R_{\delta}}{R_H} + \frac{R_{\delta}}{R_{\delta}}\right)}.$$

Значения U_1 , R_H , R_{δ} принять по данным задачи 4.1, значение дифференциального сопротивления R_{δ} стабилитрона на рабочем участке ВАХ определяется по заданным параметрам в точках «m» и «n» (рисунок 4.1)

Таблица 4.1 – Варианты заданий к заданию 4

Примечание. Данные приведены как пример. Они могут меняться преподавателем.

Ф. И. О.	$I_{ст.мин},$ мА	$U_{ст.мин},$ В	$I_{ст.мак},$ мА	$U_{ст.мак},$ В	$U_1,$ В	$R_H,$ кОм	Подпись
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	6	5	35	5,5	20	2,0	
2.	7	6	40	6,5	15	2,5	
3	8	7	45	7,5	20	3,0	
4	5	6	45	6,5	10	4,0	
5.	6	6	35	6,5	20	2,5	
6.	7	7	40	7,5	25	3,0	
7	8	6	35	6,5	20	3,5	
8	5	5	40	5,5	15	3,0	
9.	6	7	45	7,5	25	3,0	
10.	7	6	40	6,5	20	4,0	
11.	8	7	45	7,5	30	2,5	
12.	7	5	35	5,5	20	2,5	
13.	6	5	30	5,5	15	2,0	
14.	5	5	35	5,5	25	2,5	
15.	6	6	40	6,5	25	3,0	
16.	7	7	45	7,5	30	3,0	
17.	6	5	40	5,5	25	3,0	
18.	7	6	45	6,5	25	3,0	
19.	5	6	30	6,5	20	2,5	
20.	6	7	35	7,5	30	3,5	
21.	7	6	45	6,5	25	2,0	
22.	6	5	35	5,5	25	2,5	

23.	6	7	40	7,5	30	3,5	
24.	7	5	40	6	25	2,0	
25.	5	5	45	6	20	3,0	
26.	6	6	35	6	25	3,5	
27.	8	8	40	8	35	2,5	

5 Последовательность выполнения задания

Для успешного выполнения задание рекомендуется использования конспектов лекций и рекомендуемой литературы, согласно тематике вопроса.

Выполнение контрольной работы должно производиться согласно графика календарного плана (таблица 5.1). После представления контрольной работы она защищается студентом.

Таблица 5.1 – Примерных план (график) выполнения контрольной работы

№	Наименование выполненного задания	Объем выполненной работы в %	Сроки выполнения	
			Плановый	Досрочный
1	Получение и оформление задания по варианту	5	1 неделя	-
2	Решение не менее 50% задания	40	4-5 неделя	3 неделя
3	Оформление и предоставление на проверку задания	45	8-9 неделя	7 неделя
4	Защита работы	10	10 неделя	8 неделя
ИТОГО		100		

4 ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ СТУДЕНТА ЗА ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

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

9.2 Защита контрольной работы осуществляется в форме собеседования по теме работы после ее проверки преподавателем и отметки о разрешении к защите.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

3. Немцов М.В. Электротехника и электроника (6-е изд., стер.) учебник. – М: Академия, 2013. – 480 с. – ISBN: 9785446804320.
4. 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

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