

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЯ

**ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ
по дисциплине**

"Электротехника и электроника"

для студентов специальности

**1 - 37 01 06 – "Техническая эксплуатация автомобилей"
заочной формы обучения**

Брест 2013

УДК 621.317

Методические указания и задания на выполнение контрольной работы по дисциплине "Электротехника и электроника" для студентов спец. 1 - 37 01 06 "Техническая эксплуатация автомобилей" составлены в соответствии с учебными планом и программой.

Составители: А.А. Клопоцкий, ст. преподаватель,
И.М. Панасюк, ст. преподаватель,
А.И. Пекун, ст. преподаватель

Рецензент: Н.В. Василевский, начальник энергоинспекции филиала ГУП
"Брестэнерго" Энергонадзор.

Оглавление

	стр.
Введение	4
Общие указания и требования к выполнению контрольной работы.....	5
1. Методические указания и задания к задаче 1:	
«Расчет разветвленных цепей постоянного тока».....	6
1.1. Основные понятия теории электрических цепей.....	6
1.2. Задания к задаче 1.....	11
1.3. Исходные данные к задаче 1.....	12
2. Методические указания и задания к задаче 2	
"Расчет однофазных цепей переменного тока"	13
2.1. Основные положения и методы расчета однофазных электрических цепей синусоидального тока.....	13
2.2. Задания к задаче 2.....	19
2.3. Исходные данные к задаче 2.....	20
3. Методические указания и задания к задаче 3	
"Расчет трехфазных цепей переменного тока"	21
3.1. Основные положения и особенности расчета и анализа режимов работы трехфазных цепей.....	21
3.2. Задания к задаче 3.....	25
3.3. Исходные данные к задаче 3.....	26
4. Методические указания и задания к задаче 4	
"Расчет и выбор электродвигателя привода насоса (вентилятора)"	28
4.1. Основные положения и особенности расчета и выбора Электропривода.....	28
4.2. Задания к задаче 4.....	31
4.3. Исходные данные к задаче 4.....	32
5. Методические указания и задания к задаче 5	
"Расчет вторичного источника питания"	34
5.1. Основные положения и особенности расчета вторичных источников питания.....	34
5.2. Задания к задаче 5.....	37
5.3. Исходные данные к задаче 5.....	37
Рекомендуемая литература.....	39

Введение

В методических указаниях (МУ) приведены задания и исходные данные вариантов контрольной работы (КР) по дисциплине "Электротехника и электроника" для студентов спец. 37 01 06 "Техническая эксплуатация автомобилей" заочной формы обучения.

Вышеперечисленные программные теоретические разделы являются базовыми для выполнения КР и лабораторных работ (ЛР), а также сдачи экзамена.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин: "Физика", "Высшая математика". Содержание курса согласуется с материалом, осваиваемым студентами в рамках дисциплины "Электрооборудование автомобилей".

Одним из основных видов учебной работы студента при изучении дисциплины является самостоятельная работа с литературой и закрепление теоретических знаний посредством решения конкретных задач, максимально приближенных к их будущей практической деятельности.

Курс дисциплины включает цикл обзорных лекций (I) и II, III, IV проводятся во время установочной сессии, по окончании которой студенты получают индивидуальные задания и методические указания на выполнение КР, содержащей следующие задачи:

1. Расчет разветвленных электрических цепей постоянного тока
2. Расчет однофазных цепей переменного тока.
3. Расчет трехфазных цепей переменного тока.
4. Расчет и выбор электродвигателя привода насоса (вентилятора).
5. Расчет полупроводникового выпрямителя.

КР выполняются в промежутке между сессиями. В экзаменационную сессию проводятся ЛР и экзамен. Для получения допуска к экзамену по данному курсу студенту необходимо:

- выполнить запланированные ЛР, оформить по ним отчеты и защитить их;
- выполнить КР и (если она допущена к защите) защитить ее

Пособие содержит методические указания, справочные материалы, способствующие успешному расчету и анализу электрических и электронных цепей и устройств. Решение задач КР позволяет более полно осветить вопросы, связанные с усвоением теоретического материала по разделу "Электротехника и электроника". Содержание материала, представленного в пособии, соответствует действующим программам вышеперечисленных дисциплин.

Авторы искренне признательны доценту к.т.н. А.В. Клопоцкому за большой труд и ряд ценных теоретических и практических рекомендаций, использованных в пособии и способствовавших его улучшению.

Общие указания и требования к оформлению КР

При выполнении и оформлении задач необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

- Прежде, чем приступить к выполнению задания, необходимо изучить теоретический материал соответствующего раздела дисциплины, рекомендуемый в методических указаниях (МУ) к заданию.

- После внимательного прочтения условия задачи следует записать исходные данные для своего варианта и приступить к выполнению задания в последовательности, указанной в МУ.

- КР выполняется на листах формата А4.

- Титульный лист оформляется в соответствии со стандартом университета.

- Текст решения разборчиво записывается на пронумерованных страницах с одной стороны листа. Обратные стороны предназначены для исправлений допущенных ошибок. Для замечаний преподавателя на каждой странице необходимо оставлять справа поле шириной 3 см.

- В решениях, где это требуется, необходимо приводить чертежи, графики, диаграммы и схемы, выполненные чертежными инструментами в соответствии с ГОСТ ЕСКД.

- Описания систем, устройств и аппаратов следует сопровождать ссылками на используемую литературу.

- При выполнении расчетов сначала записывается исходная формула, затем в нее подставляются значения входящих величин и приводится конечный результат. Вывод формул, имеющихся в используемой литературе, приводить не следует. Не следует также загромождать решение приведением всех алгебраических преобразований. В случае выполнения математических расчетов на персональном компьютере (ПК), в приложениях к заданию следует привести распечатку машинного решения задачи.

- Все результаты вычислений должны быть записаны с точностью до четырех значащих цифр и указанием единицы измерения величины.

- На последней странице указывается список использованной в работе литературы, ставится дата окончания работы и подпись.

- КР рекомендуется высылать на проверку и рецензирование не позднее начала экзаменационной сессии.

- КР, выполненная в полном объеме и правильно (без замечаний рецензента), считается допущенной к защите.

- На повторную рецензию не допущенные к защите КР принимаются только при наличии предыдущей рецензии и первоначального варианта работы (с замечаниями рецензента).

- Защита КР осуществляется путем личного собеседования студента с преподавателем.

1. Методические указания и задания к задаче 1:

« РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА »

1.1. Основные понятия теории электрических цепей

Электрическая цепь – совокупность различных электротехнических устройств, соединенных между собой проводниками. Простейшая электрическая цепь состоит из соединенных между собой проводниками источников и приемников электрической энергии, являющимися *основными* ее элементами. *Источники* – устройства, в которых любой вид энергии (химическая, механическая, тепловая и т.д.) преобразуется в электрическую. Источниками энергии являются аккумуляторы, генераторы, термоэлементы и т.д. *Приемники* – устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в энергию другого вида (механическую, тепловую, химическую и т.д.). Приемниками являются электродвигатели, электронагреватели, гальванические элементы и т.д.

Электрическая цепь, кроме основных элементов, может содержать также *вспомогательные* элементы:

- *коммутационные устройства* (выключатели, переключатели, рубильники, контакторы и т.п.), предназначенные для выполнения в цепи включений, выключений, переключений и т.д.;
- *защитные устройства* (предохранители, тепловые реле, разделительные трансформаторы и т.п.), предназначенные для создания безопасных условий работы электротехнических установок и обслуживающего их персонала;
- *контрольно-измерительную аппаратуру* (амперметры, вольтметры, ваттметры и т.п.), предназначенную для получения информации о тех или иных параметрах электротехнической установки.

Электрические цепи принято представлять в виде графических изображений основных и вспомогательных элементов и их соединений, называемых *электрическими схемами*. Чаще всего пользуются следующими видами схем:

- *замещения*, представляющие расчетную схему электрической цепи, на которой реальные элементы заменяются идеализированными моделями, при этом исключаются все вспомогательные элементы, не влияющие на результаты расчета;
- *принципиальные*, показывающие условные графические изображения элементов и соединения между ними. Ими пользуются при изучении и анализе работы электрических устройств;

Электрические цепи разделяют на цепи *постоянного* и *переменного* тока. Цепи, у которых электрическое сопротивление каждого участка не зависит от значений и направлений тока и напряжения, принято называть *линейными*. Процессы в этих цепях описываются линейными алгебраическими (при постоянном токе) и дифференциальными (при переменном токе) уравнениями.

Участок электрической цепи, содержащий источник электрической энергии, называют *активным*, не содержащий – *пассивным*. Участки и элементы в электрической цепи могут быть соединены различными способами (последовательно, параллельно, смешанно и т.д.). Электрические цепи, все элементы которых соединены последовательно (во всех элементах протекает один и тот

же ток), называют *неразветвленными*. Цепи, имеющие разветвления, в дальнейшем будем называть *сложными*. В электрических цепях различают следующие топологические понятия:

- *узел* – место (точка) присоединения зажимов трех и более ветвей;
- *ветвь* – часть цепи с последовательным соединением элементов, включенная между двумя узлами;
- *путь* – последовательное соединение ветвей, связывающих два заданных узла;
- *контур* – часть электрической цепи, представляющая собой замкнутый путь.

При наличии на зажимах источника энергии разности потенциалов (напряжения) в замкнутой электрической цепи протекает электрический ток.

Электрический ток – направленное движение заряженных частиц (электронов, ионов и т.д.) под действием электрического поля. Значение тока i определяется количеством электрического заряда q , переносимого через поперечное сечение проводника в единицу времени

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, \quad (1.1)$$

т.е. ток численно равен скорости изменения электрического заряда во времени. Несмотря на то, что за направление тока принимают направление перемещения положительных зарядов, в электротехнике до начала расчета и анализа цепи условное (положительное) направление тока выбирают (как правило) произвольно, указывая его на схеме стрелкой. В результате расчета, если полученное значение тока положительно, то условно выбранное направление совпадает с истинным.

Разность потенциалов или *напряжение* u – энергия W , затрачиваемая на перемещение единицы заряда q из одной точки электрической цепи (поля) в другую.

$$u = \varphi_A - \varphi_B = \frac{W}{q}. \quad (1.2)$$

Направление напряжения на пассивных элементах (приемниках) совпадает с направлением тока.

Распределение потенциала вдоль неразветвленной электрической цепи (контур) наглядно изображается графиком, называемым *потенциальной диаграммой*. Эта диаграмма представляет собой график в прямоугольной системе координат, по оси абсцисс которой откладывают сопротивления вдоль рассматриваемого контура, начиная с 7ркой-либо произвольной точки (потенциал которой принимается равным нулю), а по оси ординат – соответствующие потенциалы. Каждой точке рассматриваемого контура однозначно соответствует своя точка на потенциальной диаграмме.

Величина, характеризующая противодействие проводящей среды движению электрических зарядов (электрическому току), называется *сопротивлением* R .

Величина обратная сопротивлению $G = 1/R$ называется *проводимостью*.

Вышеперечисленные величины связывает между собой один из основных законов электротехники – закон Ома:

$$I = \frac{U}{R} \text{ или } I = U \cdot G, \quad (1.3)$$

согласно которому, сила тока в участке электрической цепи прямо пропорциональна разности потенциалов (напряжению) на его зажимах и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка. Это формулировка закона Ома для участка цепи.

Закон Ома может быть применен и для замкнутой цепи с сопротивлением R , содержащей источник Э.Д.С. E с внутренним сопротивлением R_0 :

$$I = \frac{E}{R + R_0}, \quad (1.4)$$

т.е. сила тока в замкнутой электрической цепи прямо пропорциональна Э.Д.С. источника, действующего в этой цепи, и обратно пропорциональна ее полному сопротивлению.

На основании многочисленных опытов немецким физиком Г. Кирхгофом были установлены еще два закона (иногда их называют правилами), являющихся следствием закона сохранения энергии. Эти законы полностью определяют электрическое состояние цепей и являются основными при их расчете и анализе.

Первый закон Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0, \quad (1.5)$$

т.е. алгебраическая сумма мгновенных значений токов в ветвях присоединенных к рассматриваемому узлу электрической цепи равна нулю (где n – число ветвей, присоединенных к рассматриваемому узлу). Иначе в любом узле электрической цепи сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла. *Второй закон Кирхгофа:*

$$\sum_{k=1}^m e_k = \sum_{k=1}^n u_k, \quad (1.6)$$

т.е., алгебраическая сумма мгновенных значений Э.Д.С., действующих в контуре электрической цепи, равна алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на элементах этого контура (где m – число источников Э.Д.С. в рассматриваемом контуре, n – число элементов, входящих в состав этого контура).

Примечание. В уравнение (1.6) со знаком «плюс» записываются Э.Д.С. и напряжения, направления которых совпадают с выбранным условно положительным направлением обхода контура.

В замкнутой электрической цепи под действием Э.Д.С. источника непрерывно происходит движение электрических зарядов. Работа A совершаемая при перемещении положительного заряда q вдоль некоторого неразветвленного

участка электрической цепи, не содержащего источников электрической энергии, из точки А в точку В, прямо пропорциональна величине заряда q и напряжению U_{AB} между зажимами этого участка:

$$A = q \cdot U_{AB}. \quad (1.7)$$

При равномерном движении заряда в течение времени t , т.е. постоянном токе I , заряд:

$$q = I \cdot t. \quad (1.8)$$

Следовательно, произведенная при этом работа:

$$A = U_{AB} \cdot I \cdot t. \quad (1.9)$$

Для оценки энергетических условий работы электрической цепи полезно знать, насколько быстро совершается эта работа. Скорость выполнения работы определяет *мощность*:

$$P = \frac{A}{t} = U_{AB} \cdot I \quad (1.10)$$

или для резистивного элемента с сопротивлением R :

$$P = R \cdot I^2 = \frac{I^2}{G} = \frac{U^2}{R} = U^2 \cdot G. \quad (1.11)$$

Важно то обстоятельство, что одну и ту же мощность можно получить как при низком, так и при высоком напряжении. Например, для последовательной цепи передачи электрической энергии, состоящей из идеального источника с Э.Д.С., равной E , проводной линии передачи с сопротивлением $R_{л}$ и нагрузки (потребителя энергии) с сопротивлением $R_{н}$, согласно второму закону Кирхгофа:

$$R_{л} \cdot I + R_{н} \cdot I = R_{л} \cdot I + U_{н} = E = U, \quad (1.12)$$

где $U_{н}$ – напряжение на нагрузке,

U – напряжение на зажимах источника.

Умножив все слагаемые последнего уравнения на ток I , получим уравнение распределения мощности в этой цепи:

$$R_{л} \cdot I^2 + U_{н} \cdot I = U \cdot I, \quad (1.13)$$

где $R_{л} \cdot I^2$ – мощность потерь (на нагрев) в проводах линии передачи;

$U_{н} \cdot I$ – мощность нагрузки; $U \cdot I = E \cdot I$ – мощность источника.

Если, не изменяя мощности приемника, увеличить в 2 раза напряжение на приемнике, увеличив его сопротивление в 4 раза, выбрав источник с большей Э.Д.С., то ток в цепи уменьшится в 2 раза, что вызовет уменьшение мощности потерь в проводах линии передачи в 4 раза. Следовательно, для уменьшения потерь энергии в линиях передачи выгодно передавать электроэнергию по возможности при более высоком напряжении.

В любой энергетической системе должен соблюдаться закон сохранения энергии. В частности, в электрических цепях это подтверждается *балансом мощностей*:

$$\Sigma P_{ИСТ} = \Sigma P_{ПОТ}, \quad (1.14)$$

т.е., алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии равна алгебраической сумме мощностей всех потребителей энергии.

Примечание. Мощность источника следует считать положительной и записывать в уравнение баланса мощностей со знаком «плюс», если направление тока в ветви с этим источником совпадает с направлением Э.Д.С.

Общая задача анализа электрической цепи состоит в том, что в известной схеме цепи с заданными параметрами (Э.Д.С. и сопротивлениями) необходимо рассчитать токи, мощности и напряжения на отдельных участках.

Основными законами для расчета и анализа электрических цепей наряду с законом Ома являются законы Кирхгофа, пользуясь которыми, можно найти распределение токов и напряжений на всех участках сколь угодно сложной цепи. Для расчета и анализа сложных электрических цепей используют следующие методы: метод применения законов Кирхгофа; метод контурных токов; метод наложения; метод узловых потенциалов; метод узлового напряжения; метод эквивалентного генератора. Первые два из вышеперечисленных методов являются наиболее универсальными.

Метод применения законов Кирхгофа (МЗК).

Этот метод применим к расчету и анализу режима работы любой электрической цепи. Однако в практике расчетов в цепях их чаще всего применяют для определения токов в ветвях сложных цепей с несколькими источниками.

Порядок расчета:

- Выбирают (произвольно) условно положительные направления токов в ветвях рассчитываемой цепи.

- Задают условно положительные направления обхода контуров (для удобства расчета рекомендуется выбирать направление обхода во всех контурах одинаковым).

- Записывают систему уравнений по законам Кирхгофа. Общее число уравнений должно быть равно числу неизвестных токов, т.е. числу ветвей. По первому закону составляется $n - 1$ уравнений, где n – число узлов в рассчитываемой цепи. Число уравнений по второму закону, равно числу m независимых контуров в рассчитываемой цепи.

- Решая полученную систему уравнений определяют токи в ветвях.

Примечание. Если для тока получено отрицательное значение, то это означает, что действительное направление тока обратно условно выбранному в начале расчета.

Метод контурных токов (МКТ)

Это широко распространенный метод расчета сложных электрических цепей, основанный на применении законов Кирхгофа и следующих предположениях:

- В каждом контуре протекают независимые друг от друга расчетные токи, называемые контурными.

- Ток каждой ветви равен алгебраической сумме контурных токов, протекающих через эту ветвь.

Порядок расчета:

- Выбирают условно положительные направления (произвольно) токов в ветвях рассчитываемой цепи.

- Задают условно положительные направления контурных токов (для удобства расчета рекомендуется выбирать эти направления одинаковыми).

- Записывают систему уравнений по второму закону Кирхгофа для контурных токов, при этом Э.Д.С. источников принимают положительными, если их направления совпадают с направлением контурного тока в рассматриваемом контуре. Падения напряжений от основного контурного тока рассматриваемого контура записывают со знаком «+», а падения напряжений от контурных токов смежных контуров – со знаком «-», если их направление не совпадает с направлением основного контурного тока в рассматриваемой ветви. При наличии в рассчитываемой цепи источника тока, следует учитывать падение напряжения, создаваемое им на участке цепи к которому он присоединен. Причем это напряжение записывается со знаком «+», если направление основного контурного тока совпадает с направлением тока источника в рассматриваемом участке.

- Решают полученную систему уравнений и определяют значения контурных токов.

- Определяют через контурные токи значения токов, действующих в ветвях рассчитываемой цепи. При этом величины токов во внешних (не смежных) ветвях будут равны соответствующим значениям контурных токов (при совпадении их направлений). Токи в смежных ветвях равны алгебраической сумме контурных токов соседних контуров, причем со знаком «+» записывается в сумму контурный ток, направление которого совпадает с условно положительным направлением тока в смежной ветви.

1.2. Задания к задаче 1

Для выбранного варианта необходимо:

1.2.1. Начертить принципиальную схему (ветви, выключатели которых по заданию отключены, не изображать). Нумерацию потребителей и выключателей сохранить по рис. 1.1.

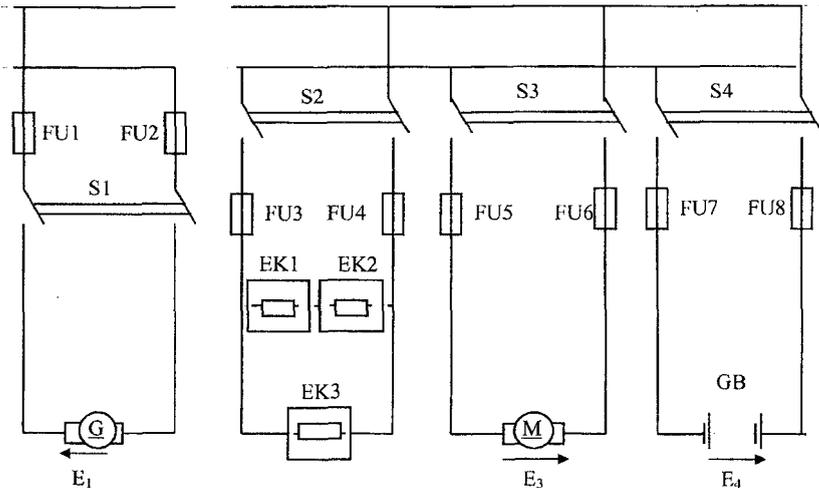


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема электрической цепи

1.2.2. Начертить схему замещения цепи, заменив последовательно и параллельно соединенные элементы, присоединенные к каждому выключателю, эквивалентными элементами.

1.2.3. Определить токи в ветвях методом уравнений Кирхгофа.

1.2.4. Определить режимы работы источников ЭДС и остальных участков цепи.

1.2.5. Составить уравнение баланса мощностей и оценить погрешность вычислений в процентах. Если величина погрешности вычислений превышает 5%, то расчет необходимо повторить.

1.2.6. Указать на схеме замещения и определить напряжения на внешних зажимах генератора и остальных потребителей, подключенных к ЛЭП, через значения их параметров.

1.2.7. Определить падение напряжения в проводах ЛЭП в рассматриваемом режиме.

1.2.8. Выбрать площади сечения проводов ЛЭП и отдельных линий, идущих от выключателей $S_2 \dots S_4$, пользуясь данными табл.1.3 допустимых токов.

1.2.9. Начертить схему замещения цепи при коротком замыкании в конце ЛЭП (при отключенных выключателях $S_2 \dots S_4$).

1.2.10. Определить ток короткого замыкания цепи в этом случае.

1.2.11. Выбрать величины токов плавких вставок предохранителей $FU_1 \dots FU_8$ для защиты линии и источника (табл. 1.4), а также предохранителей для защиты потребителей от опасных последствий токов короткого замыкания КЗ.

1.3. Исходные данные к задаче 1

К линии электропередачи (ЛЭП) постоянного тока (рис.1.1) с общим сопротивлением обоих проводов $R_n = 1 \text{ Ом}$, питаемой через выключатель S_1 от генератора G с ЭДС E_1 и внутренним сопротивлением $R_{01} = 0,1 \text{ Ом}$, присоединены через выключатели $S_2 \dots S_4$ следующие потребители электроэнергии:

1) электронагреватели ($EK_1 - EK_3$), каждый с параметрами $P_{ном}$ и $U_{ном1} = U_{ном2} = 127 \text{ В}$, $U_{ном3} = 220 \text{ В}$;

2) двигатель постоянного тока M с ЭДС E_3 и внутренним сопротивлением $R_{03} = 0,4 \text{ Ом}$ для привода грузоподъемного устройства;

3) аккумуляторная батарея GB , состоящая из n – последовательно согласно соединенных элементов с параметрами каждого элемента: ЭДС E_n и внутреннее сопротивление $R_{0n} = 0,004 \text{ Ом}$.

Примечание. Значения величин $P_{ном}$, E_1 , E_3 , E_n и номера отключенных выключателей $S_2 \dots S_4$ выбираются по двум последним цифрам номера зачетной книжки в соответствии с табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Номинальные мощности электронагревателей.

Номинальная мощность нагревателей	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$P_{ном1}, \text{Вт}$	500	600	500	400	350	300	400	500	400	2000
$P_{ном2}, \text{Вт}$	400	400	600	700	500	750	800	1200	400	800
$P_{ном3}, \text{Вт}$	2200	1500	1700	2000	1500	2000	2250	1500	1750	1000

Таблица 1.2 – Параметры источников ЭДС

Параметры ветвей	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_1, В$	230	240	220	240	235	230	225	230	230	225
$E_3, В$	200	210	180	170	200	195	190	200	180	180
$E_{11}, В$	2,1	2,15	2,05	2,2	2,18	2,2	2,1	2,1	2,2	2,0
$n, шт$	85	80	80	75	100	90	80	80	85	95
Отключены выключатели	4	3	4	4	3	4	4	3	4	4

Таблица 1.3 – Допустимые токовые нагрузки

Сечение проводящей жилы, мм ²	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
Длительно допустимый ток нагрузки $I_{доп}, А$	6	10	15	25	35	60	90	125	150	190	240	290	340

Таблица 1.4 – Номинальные токи плавких вставок

Номинальный ток плавкой вставки, А	6	10	16	20	25	32	40	63	80	100	125	160	200	250

2. Методические указания и задания к задаче 2:

«РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА»

2.1. Основные положения и методы расчета однофазных электрических цепей синусоидального тока.

Электрические цепи могут находиться под воздействием постоянных или переменных напряжений и токов. Среди этих воздействий важнейшую роль играют гармонические колебания. Последние широко используются для передачи сигналов и электрической энергии, а также могут применяться в качестве испытательного сигнала. Исследование режима гармонических колебаний важно и с методической точки зрения, поскольку анализ электрических цепей при негармонических воздействиях можно свести к анализу цепи от совокупности гармонических воздействий. В этом смысле методику анализа и расчета цепей при гармонических воздействиях можно распространить и на цепи при периодических несинусоидальных, а также непериодических воздействиях, встречающихся в электронике и радиотехнике. Наибольшее распространение в энергетике получили электрические цепи переменного тока, изменяющегося во времени по синусоидальному закону. Это обусловлено относительной простотой получения такого тока и его преобразования. Кроме того, простота устройства, надежность работы и высокие технико-экономические показатели однофазных и трехфазных трансформаторов, генераторов и двигателей обеспечили синусоидальному току широкое применение. Исключением являются некоторые области техники, например электрохимия, электрическая тяга, металлургия, в которых применяется постоянный ток, получаемый путем выпрямления переменного.

Синусоидальные функции времени (Э.Д.С., ток, напряжение) могут быть представлены тригонометрической формой записи, линейными диаграммами изменения во времени (графиками), вращающимися векторами и комплексными числами.

Тригонометрическая форма записи синусоидально изменяющейся во времени величины в общем виде представляется выражением:

$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \psi_a) = A_m \sin \alpha, \quad (2.1)$$

где a – мгновенное значение синусоидальной функции времени;

$A_m = \sqrt{2}A$ – ее амплитудное (максимальное) значение;

$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$ – действующее (среднеквадратичное) значение за период;

$\omega = 2\pi f$ – угловая (циклическая) частота, характеризующая скорость изменения фазового угла;

$f = \frac{1}{T}$ – частота изменений синусоидальной функции, характеризующая число периодов T в секунду;

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период – наименьший интервал времени, по истечении которого

мгновенные значения периодической величины повторяются;

t – текущее значение времени;

$\alpha = \omega \cdot t + \psi_a$ – фаза или фазовый угол (аргумент синусоидальной функции); ψ_a – начальная фаза (начальный фазовый угол).

В соответствии с выражением для мгновенного значения синусоидальная функция времени может быть изображена в виде линейной диаграммы, представляющей собой график изменения соответствующей синусоидальной функции от времени.

Синусоидальная функция времени изображается также вращающимся вектором. Длина вращающегося радиус – вектора равна амплитуде A_m синусоидальной функции, угол между вращающимся вектором и осью абсцисс для момента времени $t=0$ представляет ее начальную фазу ψ_a . Проекция вращающегося радиус – вектора на ось ординат определяет мгновенное значение синусоидальной величины. За положительное направление вращения вектора принято направление против хода часовой стрелки. Совокупность векторов, изображающих токи и напряжения в цепи переменного тока, называют *векторной диаграммой*. Угол между вектором тока и напряжения $\varphi = \psi_u - \psi_i$ называют *углом сдвига фаз*, который определяется разностью начальных фаз напряжения и тока.

Синусоидальная функция времени (2.1) может быть представлена в комплексной форме. При этом на комплексной плоскости в прямоугольной системе координат из ее начала под углом ψ_a к положительному направлению оси действительных чисел (оси абсцисс) проводят вектор длиной, равной A_m , концу которого соответствует определенное комплексное число. Комплексная амплитуда синусоидальной величины определяется выражением:

$$\dot{A}_m = A_m e^{j\psi},$$

где e – основание натурального логарифма.

Для действующего значения этой величины:

$$\dot{A} = A e^{j\psi}, \quad (2.2)$$

где $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ – модуль комплексного числа \dot{A} ,

$$\psi = \arctg \frac{b}{a} \text{ – его аргумент.}$$

Представленная форма записи комплексного числа (2.2) называется *показательной* или *экспоненциальной*. Эта форма комплексных чисел более удобна при их умножении, делении, возведении в степень, извлечении корней и логарифмировании.

Комплексное число можно записать в виде суммы *действительной* $\text{Re}(\dot{A}) = a$ и *мнимой* $\text{Im}(\dot{A}) = b$ частей:

$$\dot{A} = \text{Re}(\dot{A}) + j \text{Im}(\dot{A}) = a + jb, \quad (2.3)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – *мнимая единица*, с помощью которой из комплексного числа выделяется его мнимая часть. Умножение вектора \dot{A} на множитель j соответствует повороту его на угол, равный $\frac{\pi}{2}$ в положительном направлении (против

хода часовой стрелки), а умножение на $-j$ соответствует повороту в отрицательном направлении (по ходу часовой стрелки). Представленная форма записи комплексного числа (2.3) называется *алгебраической* или *координатной*. Эта форма комплексных чисел более удобна при их сложении и вычитании.

Переход от алгебраической формы записи комплексного числа к показательной (и обратно) осуществляется при помощи формулы Эйлера:

$$\cos \psi + j \sin \psi = e^{j\psi}, \quad (2.4)$$

где $\cos \psi = \frac{a}{A}$, $\sin \psi = \frac{b}{A}$. В связи с этим комплексное значение может быть представлено в *тригонометрической* форме:

$$\dot{A} = A (\cos \psi + j \sin \psi). \quad (2.5)$$

Иногда при выполнении расчетов с комплексными числами удобно пользоваться *сопряженными* значениями \dot{A} комплексных чисел. При сопряжении комплексного числа, в его алгебраической записи, знак мнимой части меняется на противоположный, а в показательной – на противоположный меняется знак аргумента.

Расчет и анализ электрических цепей переменного тока с использованием комплексных чисел называют *символическим методом*.

Электрическая цепь синусоидального тока содержит помимо электротехнических устройств, назначение которых совпадает с назначением функционально аналогичных устройств цепи постоянного тока (источники энергии, измерительные приборы, коммутационные аппараты и т.д.), также устройства, присущие только цепям синусоидального тока (трансформаторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т.д.), которые изображают на принципиальных электрических схемах. Для расчета и анализа этих цепей от принципиальных необходимо перейти к их схеме замещения, которая является количественной

моделью для описания процессов в цепи. Элементами схем замещения цепей синусоидального тока являются: источники синусоидальных токов, Э.Д.С. и напряжений; резистивные, индуктивные и емкостные элементы.

Термин "сопротивление" для цепей синусоидального тока, в отличие от цепей постоянного тока, является недостаточно полным, поскольку сопротивление переменному току оказывают не только те элементы, в которых выделяется только энергия в виде теплоты (*активные сопротивления* r , соответственно *активная проводимость* $g = 1/r$), но и те элементы цепи, в которых энергия периодически запасается в электрическом (конденсатор) или магнитном (индуктивность) полях. Эти элементы обладают *реактивным сопротивлением* x и реактивной проводимостью $b = 1/x$. Реактивным сопротивлением обладают:

- конденсатор емкостью C – реактивным емкостным сопротивлением:

$$x_C = \frac{1}{\omega \cdot C};$$

- катушка с индуктивностью L – реактивным индуктивным сопротивлением:

$$x_L = \omega L.$$

Полное сопротивление z цепи с последовательным соединением резистора с активным сопротивлением r , конденсатора с реактивным сопротивлением x_C и катушки индуктивности с реактивным сопротивлением x_L равно:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}. \quad (2.6)$$

Полная проводимость y этой цепи:

Полная проводимость y этой цепи:

$$y = \frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + x^2}}. \quad (2.7)$$

При протекании по этим элементам синусоидального тока i на их сопротивлениях создаются синусоидальные падения напряжения:

- на активном сопротивлении r напряжение $u_r = i \cdot r$, совпадающее по фазе с током, т.е. $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$;

- на индуктивном сопротивлении x_L напряжение $u_L = L \frac{di}{dt}$, опережающее

ток по фазе на четверть периода, т.е. $\varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}$;

- на емкостном сопротивлении x_C напряжение $u_C = \frac{1}{C} \int i dt$, отстающее от

тока на четверть периода, т.е. $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2}$.

Для анализа и расчета цепей синусоидального тока можно использовать те же понятия, законы и методы расчета (для мгновенных или комплексных значений), что и для цепей постоянного тока. Однако при этом необходимо помнить, что в отличие от цепей постоянного тока токи и напряжения в цепях синусоидального тока совпадают по фазе только на участках с активным сопротивлением, т.е. следует учитывать начальные фазы токов и напряжений

или угол сдвига фаз между ними. Эти расчеты значительно упрощаются благодаря применению символического метода расчета. Символическое изображение синусоидальных величин дает возможность заменить трудоемкие операции с тригонометрическими функциями и векторами токов и напряжений на относительно простые алгебраические действия с комплексными значениями этих величин. Благодаря этому становится возможным почти во всех случаях (исключение составляют цепи, содержащие индуктивно связанные элементы) применять все методы расчета цепей постоянного тока, основанные на законах Ома и Кирхгофа.

- Закон Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{z}, \quad (2.8)$$

комплексное значение тока в неразветвленном участке электрической цепи прямо пропорционально комплексному значению напряжения на этом участке и обратно пропорционально комплексному полному сопротивлению этого участка.

- Первый закон Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0, \quad (2.9)$$

алгебраическая сумма комплексных значений токов в ветвях, присоединенных к узлу электрической цепи, равна нулю.

- Второй закон Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k = \sum_{p=1}^m \dot{E}_p, \quad (2.10)$$

алгебраическая сумма комплексных значений напряжений на отдельных участках замкнутого контура электрической цепи равна алгебраической сумме комплексных значений Э.Д.С., действующих в этом контуре.

Энергетические процессы в электрических цепях синусоидального тока достаточно сложные, так как физические процессы в различных элементах неодинаковы.

Чтобы яснее представить эти процессы, рассмотрим пассивную электрическую цепь, находящуюся под воздействием источника синусоидального напряжения $u(t) = U_m \sin \omega t$. Под воздействием этого напряжения в цепи будет протекать синусоидальный ток $i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$. Отдаваемая источником в цепь за период T средняя мощность:

$$P = P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i dt = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (2.11)$$

Согласно закону Ома:

$$U = I \cdot z \text{ или } U = \frac{R \cdot I}{\cos \varphi}.$$

Тогда уравнение (4.11) примет вид:

$$P = I^2 \cdot r = U^2 \cdot g. \quad (2.12)$$

Таким образом, средняя за период мощность P равна мощности, рассеиваемой на активном сопротивлении (проводимости) цепи. И в этой связи мощность P носит название *активной* и измеряется в ваттах (Вт).

Кроме активной мощности, в цепях синусоидального тока используют понятие *реактивной мощности*, имеющей единицу измерения вольт-ампер реактивный (В Ар):

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = I^2 \cdot x = U^2 \cdot b, \quad (2.13)$$

и *полной мощности*, измеряемой в вольт-амперах (В А):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}. \quad (2.14)$$

Полная мощность – величина комплексная:

$$\tilde{S} = P + j \cdot Q = U \cdot I \cdot \cos \varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = \dot{U} \cdot \dot{I}^*, \quad (2.15)$$

где \dot{I}^* – значение комплексно-сопряженного тока.

Т.е. активная мощность – действительная $P = \text{Re}[\tilde{S}]$, а реактивная – мнимая часть $Q = \text{Im}[\tilde{S}]$ комплексного значения полной мощности.

Расчеты неразветвленных цепей переменного тока можно свести либо к тригонометрической задаче с построением векторных диаграмм этих цепей, либо выполнять расчет символическим методом. Расчет смешанного соединения при переменном токе в общем такой же, как и при постоянном токе: сначала рассчитывается эквивалентное сопротивление разветвления, а затем рассчитывается сопротивление цепи в целом, после чего рассчитывается ток на входе цепи и остальные напряжения и токи в цепи. Для параллельных ветвей в цепи переменного тока закон Ома можно записать в виде:

$$I = U \sqrt{(\sum g)^2 + (\sum b_L - \sum b_C)^2},$$

где $\sum g$ – сумма активных проводимостей параллельных ветвей,

$\sum b_L$ – сумма индуктивных проводимостей параллельных ветвей,

$\sum b_C$ – сумма емкостных проводимостей параллельных ветвей.

В случае неразветвленной цепи переменного тока с резистором, катушкой индуктивности и конденсатором при $x_L = x_C$, т.е., когда $x = x_L - x_C = 0$ и $z = r$, наступает *резонанс*, при котором напряжение и ток на входе рассматриваемой цепи совпадают по фазе $\varphi = 0$. Резонанс в неразветвленной цепи переменного тока называют *резонансом напряжений*, условием наступления которого является равенство реактивных сопротивлений конденсатора и катушки индуктивности. Ряд особенностей состояния цепи во время наступления резонанса обусловили его широкое использование в радиотехнике, электротехнике, измерительной технике и других областях.

В разветвленной цепи может преобладать емкостная или индуктивная проводимость, но возможен и частный случай, когда суммарная индуктивная проводимость $\sum b_{iL}$ в i -й ветви равна суммарной емкостной проводимости

$\sum b_{jC}$ в j -й ветви, т.е. $\sum b_{iL} = \sum b_{jC}$. Это условие *резонанса токов* – состояния подобного резонансу в неразветвленной цепи переменного тока, при котором ток и напряжение на входе цепи также совпадают по фазе, т.е. $\varphi = 0$.

2.2. Задания к задаче 2

Для выбранного варианта необходимо:

2.2.1. Начертить принципиальную схему (ветви, выключатели которых по заданию отключены, не изображать; нумерацию оставшихся сохранить по рис.2.1).

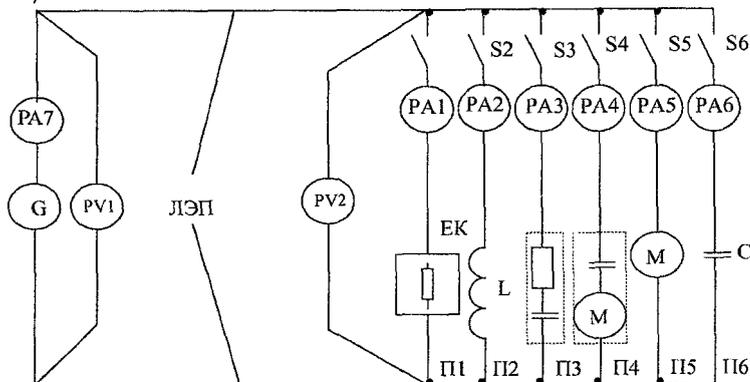


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема подключения приемников.

2.2.2. Начертить схему замещения цепи. Нанести на схеме условно-положительные направления ЭДС источника, напряжений и токов, а также падений напряжения на сопротивлениях ЛЭП.

2.2.3. Определить ток каждого приемника (показания амперметров PA1...PA6).

2.2.4. Определить ток в ЛЭП (показания амперметра PA7).

2.2.5. По току в ЛЭП и напряжению в конце ЛЭП U_2 заменить группу приемников эквивалентным приемником.

2.2.6. Определить падение напряжения в ЛЭП U_L .

2.2.7. Определить напряжение на зажимах генератора U_1 (показания вольтметра PV1).

2.2.8. Построить для заданной схемы (в масштабе) векторную диаграмму с указанием всех токов и напряжений. Выполнить анализ диаграммы: определить угол сдвига фаз между напряжениями U_1 , U_2 и общим током (в ЛЭП) I , а также потерю напряжения в ЛЭП (алгебраическую разность напряжений $U_1 - U_2$).

2.2.9. Указать ветвь схемы, в которой имеет место резонанс напряжений. Определить напряжения на ее элементах.

2.2.10. Указать группу ветвей, в которых имеет место резонанс токов.

2.2.11. Определить активную, реактивную и полную мощности на каждом приемнике и эквивалентном приемнике.

2.2.12. Составить баланс активных и реактивных мощностей приемников. Оценить относительную погрешность расчета.

Примечание. Расчет задания № 2 выполнить символическим методом.

2.3. Исходные данные

К двухпроводной линии передачи (ЛЭП), питаемой от однофазного генератора G частотой 50 Гц (рис.2.1.), подключаются параллельно через выключатели $S1...S6$ приемники $P1...P6$ (табл.2.1.) Напряжение на зажимах генератора U_1 (в начале ЛЭП) измеряется вольтметром PV_1 , а на зажимах приемников U_2 (в конце ЛЭП) – вольтметром PV_2 . Для измерения тока каждого приемника включены амперметры $PA1...PA6$, а для измерения тока генератора – $PA7$. Варианты заданных значений напряжения U_2 , сопротивлений проводов ЛЭП R_L и X_L , номеров включенных выключателей и параметров приемников выбираются в соответствии с табл.2.1 и 2.2.

Примечание. Генератор считать идеальным, т.е. его внутреннее сопротивление принять равным нулю.

Таблица 2.1 – Параметры приемников электроэнергии

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Тип приемника и параметры его последовательной схемы замещения, Ом											
	П1 нагревательная печь		П2 Реактор		П3 активно-емкостной фильтр		П4 однофазный конденсаторный электродвигатель			П5 однофазный электродвигатель		П6 батарея конденсаторов
	R1	X_{L2}	R3	X_{C3}	R4	X_{L4}	X_{C4}	R5	X_{L5}	X_{C6}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
0	100	100	80	60	100	100	100	80	60	100		
1	60	80	40	30	40	40	70	40	30	83.3		
2	50	50	40	30	40	40	10	30	40	100		
3	100	70	70.7	70.7	50	50	50	60	80	125		
4	100	80	60	80	80	40	100	70.7	70.7	100		
5	40	100	80	60	80	100	100	32	24	66.6		
6	40	40	24	32	24	40	72	80	60	20		
7	40	40	32	24	24	72	40	60	80	125		
8	50	30	32	24	12	16	32	16	24	30		
9	20	20	15	20	16	48	48	32	24	66.6		

Таблица 2.2 – Параметры схемы по рис.2.1.

	Последняя цифра № зачетной книжки										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	n
Номера включенных выключателей	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	2
Напряжение $U_2, В$	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	4
	3	4	5	6	4	5	6	5	6	6	6
Активное сопротивление проводов линии, $R_p, Ом$	127	220	380	660	127	220	380	660	127	380	220
Индуктивное сопротивление проводов линии, $X_p, Ом$	1	5	3	2	1	5	3	2	1	3	6
	3	15	9	6	3	15	9	6	3	9	18

3. Методические указания и задания к задаче 3:

« РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА »

3.1. Основные положения и особенности расчета и анализа режимов работы трехфазных цепей

В технике, кроме однофазных электрических цепей, широкое распространение находят многофазные цепи. Под многофазной электрической цепью понимают совокупность электрических цепей, в которых действуют несколько Э.Д.С. с одинаковыми амплитудами и частотами, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенные равные углы.

Практическое применение нашли симметричные двенадцати- и шести-фазные системы – в выпрямителях (в которых угол сдвига фаз между Э.Д.С. составляет 30° и 60° соответственно), двухфазные – в автоматике (в которых угол сдвига фаз между Э.Д.С. – 90°). Однако преимущественное распространение получила трехфазная система (в которой угол сдвига фаз между Э.Д.С. равен 120°), которая повсеместно используется в промышленности, сельском хозяйстве, при производстве и передаче электроэнергии. Это обусловлено следующими ее преимуществами по сравнению с однофазной системой: более высокие технико-экономические показатели при производстве и передаче электроэнергии; возможность получения вращающегося магнитного поля; значительно меньшие пульсации выпрямленного напряжения; возможность создания и эксплуатации относительно простых, надежных и экономичных генераторов, двигателей и трансформаторов.

Трехфазная система Э.Д.С. состоит из трех сдвинутых относительно друг друга по фазе на угол 120° синусоидальных Э.Д.С. равной частоты и амплитуды:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \cdot \sin \omega \cdot t; \\ e_B &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Глобальными источниками этой системы служат трехфазные синхронные генераторы электростанций (тепловых, гидро-, атомных и т.д.). В качестве локальных (местных) источников трехфазной сети, как правило, рассматриваются трехфазные трансформаторы, входящие в систему ЛЭП.

Практическое применение нашли только связанные трехфазные системы, в которых отдельные фазы (участки трехфазной цепи, по которым протекают одни и те же токи) электрически соединены друг с другом. Для получения связанной трехфазной системы фазные обмотки источника и приемники соединяют по схеме «треугольник» (в которой условный конец первой фазы соединяется с условным началом второй фазы, условный конец второй – с условным началом третьей, конец третьей – с началом первой, а к началам фаз присоединяют линейные провода и обозначают – Δ) или «звезда» (в которой условные концы фаз соединяют в одной точке, называемой нулевой (нейтральной)), а к условным началам присоединяют линейные провода и обозначают – Y). При этом существуют две схемы соединения «звезда» – *трехпроводная* (Y) и *четырёхпроводная* (Y_0) с нулевым (нейтральным) проводом, соединяющим нулевые точки источника и потребителя. Условные начала обмоток источника на

схемах обозначают прописными буквами A, B, C , а концы – X, Y, Z . Для обозначения начал и концов фаз нагрузок используют соответственно эти же, но уже строчные буквы (a, b, c и x, y, z).

За условно положительное направление Э.Д.С. в каждой фазе принимают направление от конца к началу обмотки. Положительное направление тока в обмотках источника совпадает с направлением соответствующей Э.Д.С. Согласно закону Ома, фазные напряжения (разность потенциалов между началом и концом фазной обмотки) источника направляются от начала к концу фазы, а линейные напряжения (разность потенциалов между линейными проводниками) – от начала одной фазы к концу другой. Положительным направлением линейных токов (токов, текущих в линейных проводниках, соединяющих начала соответствующих фаз источника и приемника) считают направление от генератора к потребителю. В этом случае независимо от способа соединения фаз нагрузок положительным направлением фазных токов (токов, текущих в фазах нагрузки) в нагрузке будет направление от начала к концу. Очевидно, положительное направление фазных напряжений потребителя будет совпадать с направлением фазных токов в его фазах.

Комплексные значения Э.Д.С. можно представить в виде (считая начальную фазу Э.Д.С. фазы A источника равной 0):

$$\dot{E}_A = E; \dot{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ}; \dot{E}_C = E \cdot e^{j120^\circ}. \quad (3.2)$$

Если пренебречь внутренним сопротивлением фаз источника, то фазные напряжения источника будут равны соответствующим фазным Э.Д.С.:

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A; \dot{E}_B = \dot{U}_B; \dot{E}_C = \dot{U}_C. \quad (3.3)$$

Тогда, согласно второму закону Кирхгофа, линейные напряжения системы:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (3.4)$$

Для трехфазных цепей применимы все методы расчета цепей переменного тока, в том числе символический метод и метод векторных диаграмм. Причем векторные диаграммы можно строить как для напряжений и токов источника, так и для напряжений и токов приемников.

При соединении фаз источника и потребителей по схеме «звезда» в трехпроводной цепи с симметричной ($Z_a = Z_b = Z_c$) нагрузкой и в четырехпроводной – с любой нагрузкой, фазные напряжения приемников можно считать (пренебрегая сопротивлением линейных проводов) равными соответственным фазным напряжениям источника. Причем их действующие значения (модули комплексов) будут одинаковы и меньше в $\sqrt{3}$ раз линейного напряжения:

$$U_a = U_b = U_c = U_{\phi Y} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}. \quad (3.5)$$

Аналогичное утверждение справедливо в случае соединения фаз источника и потребителей по схеме «треугольник», причем независимо от характера нагрузки, но при этом фазные напряжения нагрузки будут равны фазным напряжениям источника, которые равны линейным:

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{\phi\Delta} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L. \quad (3.6)$$

Для схемы трехпроводной звезды фазные напряжения при несимметричной нагрузке не равны между собой и определяются соответствующей векторной разностью фазного напряжения источника и *напряжения смещения нейтрали* \underline{U}_{nN} (разности потенциалов между нулевыми точками источника и потребителя):

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}, \quad (3.7)$$

где

$$\dot{U}_{nN} = \frac{Y_a \dot{U}_a + Y_b \dot{U}_b + Y_c \dot{U}_c}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (3.8)$$

здесь Y_a, Y_b, Y_c – комплексные значения проводимостей фаз нагрузки.

В соответствии с законом Ома ток в любой фазе:

$$\dot{I}_\phi = \frac{\dot{U}_\phi}{Z_\phi}, \quad (3.9)$$

где Z_ϕ – комплексное значение полного сопротивления данной фазы. Для схем соединения Y фазные и линейные токи равны:

$$I_{\phi Y} = I_n. \quad (3.10)$$

При этом для нулевых точек источника и приемника справедлив первый закон Кирхгофа:

– для схемы Y :

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0, \quad (3.11)$$

– для схемы Y_0 :

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{nN}. \quad (3.12)$$

Для соединения приемников Δ линейные токи определяются также в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Векторные диаграммы трехфазной цепи для Э.Д.С., токов и напряжений строят обычно (если в исходных данных не указаны начальные фазовые углы Э.Д.С.), придерживаясь следующих правил. Один из векторов фазного напряжения источника (как правило, фазы A), направляют вертикально вверх или горизонтально вправо. Векторы напряжений в фазах B и C строят с учетом их фазовых сдвигов по отношению к построенному вектору напряжения фазы A . Векторы линейных напряжений строят геометрически в соответствии с уравнениями (3.4). При этом следует помнить, что эти векторы должны образовать равносторонний треугольник, и их сумма всегда равна нулю.

При соединении фаз Y нейтральная точка N источника на векторной диаграмме всегда сохраняют свое геометрическое положение, являющееся центром окружности, вписанной в равносторонний треугольник линейных напряжений. Геометрическое местоположение нейтральной точки приемника n определяют по напряжению смещения нейтрали U_{nN} . При наличии нейтрального провода, а также для симметричной нагрузки, соединенной трехпроводной звездой, $U_{nN} = 0$ и на диаграмме нейтральные точки источника и нагрузки совпадают.

Трехфазную цепь можно рассматривать как совокупность трех однофазных цепей, поэтому активная и реактивная мощности в ней равны суммам мощностей отдельных фаз:

– для схемы Y :

– активная мощность:

$$P_Y = P_a + P_b + P_c;$$

– реактивная мощность:

$$Q_Y = Q_a + Q_b + Q_c.$$

– для схемы Δ :

– активная мощность:

$$P_\Delta = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca};$$

– реактивная мощность:

$$Q_\Delta = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca};$$

Фазная активная мощность рассчитывается так же, как и для однофазного приемника:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \phi_\phi = r_\phi I_\phi^2.$$

Фазная реактивная мощность рассчитывается аналогично, как и для однофазного приемника:

$$Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \phi_\phi = x_\phi I_\phi^2.$$

Полная мощность трехфазной цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ при этом } S \neq S_a + S_b + S_c \text{ (для схемы } Y)$$

и $S \neq S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}$ (для схемы Δ).

Мощности трехфазной цепи могут быть определены в комплексной форме:

– для схемы Y :

$$\begin{aligned} \tilde{S}_Y &= P + j \cdot Q = \tilde{S}_a + \tilde{S}_b + \tilde{S}_c = \dot{U}_a^* \cdot I_a + \dot{U}_b^* \cdot I_b + \dot{U}_c^* \cdot I_c = \\ &= (P_a + P_b + P_c) + j \cdot (Q_a + Q_b + Q_c); \end{aligned}$$

– для схемы Δ :

$$\begin{aligned} \tilde{S}_\Delta &= P + j \cdot Q = \tilde{S}_{ab} + \tilde{S}_{bc} + \tilde{S}_{ca} = \dot{U}_{ab}^* \cdot I_{ab} + \dot{U}_{bc}^* \cdot I_{bc} + \dot{U}_{ca}^* \cdot I_{ca} = \\ &= (P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}) + j \cdot (Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}). \end{aligned}$$

При симметричной нагрузке мощности всех фаз одинаковы, поэтому мощность трехфазной цепи равна утроенной мощности одной фазы:

$$P = 3 \cdot P_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \phi_\phi;$$

$$Q = 3 \cdot Q_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \phi_\phi; \quad (3.14)$$

$$S = 3 \cdot S_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi.$$

Мощности при симметричной нагрузке могут быть выражены и через линейные напряжения и токи:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \phi_\phi;$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \sin \phi_\phi; \quad (3.15)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n.$$

При этом формулы мощности одинаковы независимо от схемы соединения приемников.

3.2. Задания к задаче 3

Для выбранного варианта необходимо:

3.2.1. Начертить схему замещения заданной цепи с учетом параметров приемников согласно варианту.

3.2.2. Определить фазные токи приемников, включенных по схеме «треугольник», построить векторную диаграмму и определить по ней величину линейных токов.

3.2.3. Определить токи приемников, включенных по схеме «звезда» с нейтральным проводом, построить векторную диаграмму и по ней определить величину тока в нейтральном проводе.

3.2.4. Определить графическим методом (по совмещенной векторной диаграмме) суммарные токи, потребляемые приемниками из питающей линии.

3.2.5. Вычислить активные мощности фаз приемников, включенных по схемам «звезда» и «треугольник», суммарную активную мощность всей цепи.

3.2.6. Вычислить реактивные мощности фаз приемников включенных по схемам «звезда» и «треугольник».

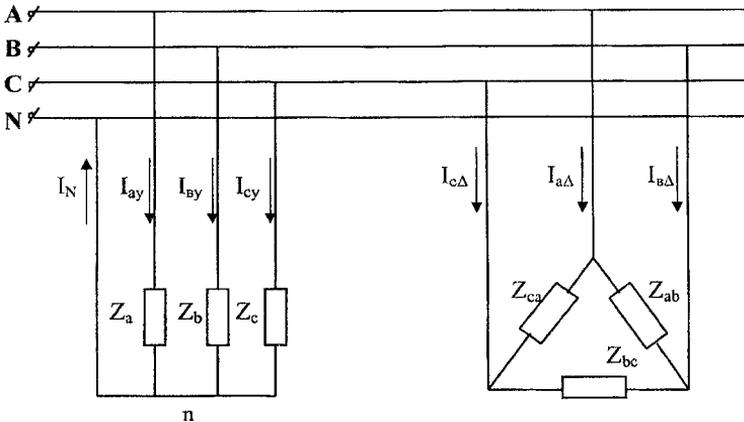


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема подключения потребителей к трехфазной цепи

3.2.7. Начертить схему замещения приемников, включенных по схеме «треугольник», при обрыве линейного провода, соединяющего точку в приемника с линией В (рис. 3.1), и определить для этого случая токи в фазах этих приемников и в линейных проводах. Построить векторную диаграмму для этого случая.

Примечание. Сопротивления проводов линии электропередачи намного меньше сопротивлений приемников. ими при составлении схемы замещения пренебречь.

Расчет задания № 3 выполнить методом разложения токов и напряжений приемников на активно-реактивные составляющие.

3.3. Исходные данные к задаче 3

В трехфазной линии переменного тока с линейным напряжением U_L подключены приемники по схеме (рис.3.1). Варианты значений U_L и параметры приемников выбираются из табл.3.1. (емкостные сопротивления указаны со знаком «-»).

Таблица 3.1 – Параметры приемников электроэнергии

№ варианта	Соединение фаз нагрузки												U_L	
	«Треугольником»						«Звездой»							
	$R_{a\Delta}$ OM	$X_{a\Delta}$ OM	$R_{b\Delta}$ OM	$X_{b\Delta}$ OM	$R_{c\Delta}$ OM	$X_{c\Delta}$ OM	R_a OM	X_a OM	R_b OM	X_b OM	R_c OM	X_c OM		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
01	5	0	5	0	5	0	6	8	10	0	10	0	380	
02	6	8	10	0	8	6	0	-5	5	0	5	0	660	
03	0	-5	5	0	5	0	6	8	6	8	6	8	220	
04	3	4	5	0	0	5	0	10	0	10	0	10	220	
05	10	0	10	0	0	10	4	3	4	-3	0	0	-5	660
06	3	4	5	0	0	5	0	10	0	10	0	10	220	
07	0	-10	10	0	0	10	3	4	3	4	3	4	380	
08	20	0	20	0	12	16	0	20	0	20	0	20	660	
09	0	-20	20	0	16	12	20	0	20	0	20	0	1140	
10	6	8	10	0	8	-6	4	0	4	0	4	0	220	
11	40	0	40	0	24	-32	6	8	6	8	6	8	220	
12	0	-5	5	0	3	4	8	6	8	6	8	6	380	
13	8	6	8	-6	8	6	0	-5	0	-5	0	-5	660	
14	5	0	5	0	0	-5	0	10	0	10	0	10	220	
15	0	10	10	0	0	-10	5	0	5	0	5	0	380	
16	12	16	20	0	0	-20	10	0	10	0	10	0	1140	
17	10	0	0	10	10	0	12	16	12	16	12	16	660	
18	16	12	16	-12	16	-12	20	0	20	0	20	0	1140	
19	20	0	0	20	0	20	16	12	16	12	16	12	660	
20	24	32	0	40	40	0	40	0	40	0	40	0	1140	
21	40	0	0	40	24	32	24	32	0	40	40	0	660	
22	4	3	0	5	5	0	5	0	5	0	5	0	220	
23	5	0	0	5	4	-3	4	3	4	3	4	-3	380	
24	8	6	0	10	0	-10	10	0	10	0	10	0	660	
25	10	10	0	10	10	-10	8	6	0	10	0	10	220	
26	16	12	0	20	16	-12	20	0	20	0	20	0	660	
27	20	0	16	12	20	0	16	12	16	12	16	12	1140	
28	24	32	0	40	0	-40	12	16	12	16	12	16	660	
29	5	0	3	4	0	5	6	-8	6	-8	6	-8	220	
30	12	16	12	16	20	0	10	0	10	0	10	0	380	
31	10	0	6	8	6	8	12	16	12	16	12	16	1140	
32	24	-32	24	-32	0	40	12	16	12	16	12	16	1140	
33	3	7	0	-5	5	0	5	0	5	0	5	0	220	
34	20	0	12	16	12	-16	10	0	10	0	0	-10	380	
35	6	8	0	-10	0	10	10	0	10	0	0	10	220	
36	40	0	24	32	0	-40	20	0	0	-20	0	-20	1140	
37	12	16	0	-20	12	16	10	0	0	10	0	10	660	
38	5	0	0	-5	3	-4	4	-3	4	-3	4	3	220	
39	24	36	0	-40	24	-36	20	0	0	-20	0	-20	1140	
40	10	0	6	-8	0	10	6	-8	6	8	6	8	660	
41	4	3	0	-5	0	-5	4	-3	4	3	4	3	220	
42	20	0	16	-12	16	12	6	8	6	-8	6	-8	380	
43	10	0	0	-10	3	-10	10	0	10	0	0	10	660	
44	8	6	8	6	10	0	8	-6	8	6	8	6	220	
45	40	0	32	-24	32	-24	24	32	24	-32	24	32	1140	

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
46	16	12	16	12	0	20	10	0	0	-10	0	10	380
47	5	0	3	-4	0	5	4	3	4	-3	4	3	660
48	32	24	32	24	32	24	24	20	0	-20	0	20	1140
49	10	10	20	-20	30	0	24	0	0	-20	0	30	660
50	5	0	4	-3	3	4	3	4	3	4	3	4	220
51	5	0	5	0	5	0	6	8	10	0	10	0	220
52	6	8	10	0	10	0	5	0	5	0	5	0	380
53	0	-5	5	0	5	0	6	8	10	0	8	6	660
54	7	8	7	8	6	8	0	-5	5	0	5	0	220
55	10	0	10	0	10	0	4	3	4	-3	0	-5	380
56	4	3	4	-3	0	-5	10	0	10	0	0	10	660
57	0	10	0	10	0	10	3	4	5	0	0	5	220
58	3	4	3	4	3	4	0	-10	10	0	0	10	380
59	0	20	0	20	0	20	20	0	20	0	12	16	660
60	20	0	20	0	20	0	0	20	20	0	16	12	1140
61	4	0	4	0	4	0	6	8	10	0	8	-6	220
62	6	8	6	8	6	8	40	0	40	0	24	-36	1140
63	8	6	8	6	8	6	0	-5	5	0	3	-4	220
64	0	-5	0	-5	0	-5	8	6	8	-6	8	6	380
65	0	10	0	10	0	10	5	0	5	0	0	-5	660
66	5	0	5	0	5	0	0	-10	10	0	0	-10	220
67	10	0	10	0	10	0	12	16	20	0	0	-20	380
68	12	16	12	16	12	16	10	0	10	10	10	0	660
69	20	0	20	0	20	0	16	12	16	-12	16	-12	1140
70	16	12	16	-12	16	-12	20	0	0	20	0	20	660
71	40	0	40	0	40	0	24	4	36	0	40	0	1140
72	24	36	0	40	40	0	40	0	0	40	24	35	1140
73	5	0	5	0	5	0	4	3	0	5	5	0	220
74	4	-3	4	3	4	-3	5	0	0	5	4	-3	380
75	10	0	10	0	10	0	8	6	0	10	0	-10	660
76	8	6	20	10	20	10	10	0	0	10	0	-10	220
77	20	0	20	0	20	0	16	12	0	20	16	-12	380
78	16	12	16	12	16	12	20	0	16	12	20	0	660
79	12	16	12	16	12	16	24	32	0	40	0	-40	1140
80	6	-8	6	-8	6	-8	5	0	3	4	0	5	220
81	10	0	10	0	10	0	12	16	20	16	20	0	380
82	12	16	12	16	12	16	10	0	6	8	6	8	660
83	12	16	12	16	12	16	24	-36	24	-36	0	40	1140
84	5	0	5	0	5	0	3	4	0	-5	5	0	220
85	10	0	10	0	0	-10	20	0	12	16	12	-16	380
86	10	0	10	0	0	10	6	88	0	-10	0	10	660
87	20	0	0	-20	0	-20	40	0	24	36	0	40	1140
88	10	0	0	10	0	10	12	16	0	-20	12	16	1140
89	4	-3	4	-3	4	3	5	0	0	-5	3	-4	220
90	20	0	0	-20	0	-20	24	36	0	-40	24	-36	380
91	6	-8	6	8	6	8	10	0	6	-8	0	10	660
92	4	-3	4	3	4	3	4	3	0	-5	0	-5	220
93	6	8	6	-8	6	-8	20	0	16	-12	16	12	380
94	10	0	10	0	0	10	10	0	0	-10	0	-10	660
95	8	-6	8	6	8	6	8	6	8	6	10	0	220
96	24	36	24	-36	24	36	40	0	36	-24	36	-24	1140
97	10	0	0	-10	0	10	16	12	16	12	0	20	220
98	4	3	4	-3	4	-3	5	0	3	-4	0	5	380
99	16	12	12	16	20	0	3	4	5	0	3	-4	660
100	6	8	10	0	10	0	5	0	5	0	5	0	220

Примечание. Вариант задания выбирается в соответствии с порядковым номером, указанным преподавателем.

4. Методические указания и задания к задаче 4:

«РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА НАСОСА (ВЕНТИЛЯТОРА)»

4.1. Основные положения и особенности расчета и выбора электропривода

Технологические машины и агрегаты приводятся в действие различными типами приводов, из которых наиболее распространенным является электропривод. От правильного выбора параметров и характеристик привода зависит эффективность работы технологической установки, поэтому его расчет и проектирование представляет собой важную инженерную задачу.

Электропривод содержит большое число компонентов, основным из которых является электрическая машина.

Наиболее широко применяются в промышленности для привода различных механизмов трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Они отличаются простотой конструкции и, как следствие, малыми габаритами, массой и высокой надежностью. Данные двигатели используются в подавляющем большинстве нерегулируемых приводов, а в последнее время и в регулируемых приводах в сочетании с преобразователями частоты.

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором имеет трехфазную обмотку, выполненную медным проводом и уложенную в пазах на статоре, а также короткозамкнутую обмотку типа «беличья клетка» на роторе.

При подключении обмотки статора к сети трехфазного напряжения она создает магнитный поток, вращающийся в пространстве с синхронной частотой:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (4.1)$$

где f_1 – частота подводимого к двигателю напряжения,

p – число пар полюсов.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки неподвижного ротора. Вследствие этого в обмотке ротора индуцируется Э.Д.С. E_{2n} , под действием которой по обмотке ротора протекает пусковой ток I_{2n} . В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с проводниками обмотки ротора, по которым протекает ток, на ротор действует пусковой вращающий момент M_n , направленный в сторону вращения магнитного поля. Под действием пускового момента ротор начинает вращаться с частотой:

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s), \quad (4.2)$$

где $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ – величина, характеризующая разность частот вращения магнитного поля и ротора, называемая *скольжением*.

В момент запуска двигателя $s = 1$, а частота Э.Д.С. и тока в обмотке ротора равна частоте напряжения питающей сети f_1 . По мере разгона ротора скольжение, а также частота Э.Д.С. и тока в обмотке ротора $f_2 = f_1 \cdot s$ снижаются. При номинальной нагрузке на валу номинальная величина скольжения составляет 0,02 – 0,06 (в зависимости от типа двигателя), ротор вращается с частотой $n_{2н}$ и двигатель развивает номинальную мощность $P_{2н}$. Вращающий момент при номинальной нагрузке

$$M_n = 9550 \cdot \frac{P_{2н}}{n_{2н}} \quad (4.3)$$

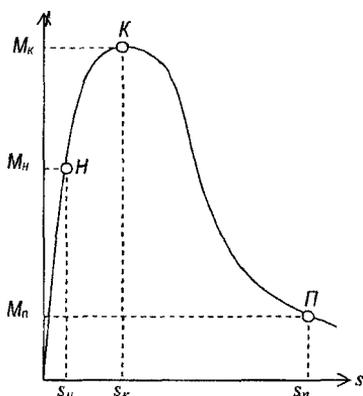


Рисунок – 4.1

Механическая характеристика $M(n)$ или $M(s)$ асинхронного двигателя выражается громоздкой и неудобной для анализа функцией. На практике для построения механической характеристики обычно используют приближенную формулу

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (4.4)$$

где $s_K = s_n \cdot (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$ – критическое значение скольжения, соответствующее максимальному (критическому) значению момента $M_K = M_{max}$. Отношение

$$\frac{M_K}{M_n} = k_m \quad (4.5)$$

называется *кратностью максимального момента*. Она характеризует перегрузочную способность асинхронного двигателя.

Примерный вид механической характеристики показан на рис. 4.1. Участок OH , на котором зависимость (4.4) практически линейна называется *рабочим*. На этом участке механической характеристики асинхронный двигатель может работать длительно, не перегреваясь выше допустимой температуры.

Участок HK соответствует механической перегрузке двигателя. На данном участке двигатель может работать кратковременно, после чего нагрузка должна быть снижена.

Участок OK характеристики – *участок статически устойчивой работы* двигателя, при которой он может автоматически компенсировать увеличение нагрузки на валу. Т.е. при возрастании по какой-либо причине момента сопротивления M_c последует переходный процесс, в ходе которого частота вращения ротора уменьшится, скольжение увеличится, а вращающий момент M возрастет. Вследствие этого двигатель выйдет на новый установившийся режим, характеризующийся более низкой частотой вращения $n_2' < n_2$ и равенством моментов $M = M_c$.

Участок $KП$ соответствует неустойчивой работе двигателя. По данному участку изменяется момент и частота вращения при пуске. Если по какой-либо причине M_c станет больше M_K , двигатель перейдет в так называемый режим «опрокидывания». При этом момент и частота вращения также изменятся по участку $KП$ характеристики, но в сторону уменьшения, вплоть до полной остановки двигателя.

Точка $П$ характеристики, имеющая координаты ($M = M_n; s_n = 1$), соответствует режиму пуска двигателя. Величина $k_n = \frac{M_n}{M_n}$, называемая *кратностью пускового момента*, характеризует его пусковую способность.

Точка $О$ характеристики соответствует режиму холостого хода, при котором момент сопротивления очень мал (определяется только трением в опорах). Поэтому скольжение составляет тысячные доли и частота вращения ротора близка к синхронной.

При расчете приводов иногда удобнее использовать механическую характеристику в виде зависимости $n(M)$, которую несложно получить из выражения (4.4), с учетом (4.2).

Расчетная мощность насоса $P_{рн}$ (вентилятора $P_{рв}$), (кВт), определяется по формуле:

$$P_{рн} = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta_n \cdot \eta_{п}} \cdot 10^{-3} \quad (P_{рв} = \frac{Q \cdot H}{\eta_v \cdot \eta_{п}} \cdot 10^{-3}), \quad (4.6)$$

где Q – производительность насоса (вентилятора), m^3/c ;

H – полный напор (расчетная высота подачи) м, а для вентилятора – давление газа, Па;

γ – удельный вес перекачиваемой жидкости (для воды 9880 Н/м^3);

η_n – КПД насоса:

- 0,8 – 0,9 – для поршневых насосов;
- 0,5 – 0,85 – для центробежных насосов высокого давления;
- 0,4 – 0,6 – для центробежных низкого давления;

η_v – КПД вентилятора:

- 0,2 – 0,5 – для малых вентиляторов;
- 0,4 – 0,75 – для больших;

$\eta_{п}$ – КПД передачи:

- 0,85 – 0,9 – ременной;
- 0,97 – 0,98 – клиноременной;
- 0,98 – 1 – зубчатой
- 1 – при непосредственном соединении при помощи муфты.

Для исключения возможной перегрузки электродвигателя при меняющихся условиях работы агрегата расчетную мощность увеличивают с учетом рекомендуемого для данной мощности коэффициента запаса k_3 :

$$P_{н(в)} = k_3 \cdot P_{рн(рв)}. \quad (4.7)$$

Коэффициент запаса для двигателей насоса при:

$$P_{рн} \leq 1 \text{ кВт}, \quad k_3 = 2$$

$$1 \text{ кВт} \leq P_{рн} \leq 2 \text{ кВт}, \quad k_3 = 1,5$$

$$2 \text{ кВт} \leq P_{рн} \leq 5 \text{ кВт}, \quad k_3 = 1,25$$

$$5 \text{ кВт} \leq P_{рн} \leq 50 \text{ кВт}, \quad k_3 = 1,1$$

$$50 \text{ кВт} \leq P_{рн}, \quad k_3 = 1,05$$

Коэффициент запаса для двигателей вентиляторов при:

$$P_{рв} \leq 1 \text{ кВт}, \quad \kappa_3 = 2$$

$$1 \text{ кВт} \leq P_{рв} \leq 2 \text{ кВт}, \quad \kappa_3 = 1,5$$

$$2 \text{ кВт} \leq P_{рв} \leq 5 \text{ кВт}, \quad \kappa_3 = 1,25$$

$$5 \text{ кВт} \leq P_{рв}, \quad \kappa_3 = 1,1 \div 1,25$$

4.2. Задания к задаче 4

4.2.1. Определить расчетную мощность P_p электродвигателя общепромышленного применения защищенного исполнения, предназначенного для привода насоса (вентилятора), который характеризуется производительностью – Q (м³/с), напором – H (м), частотой вращения – n (об/мин) и η – КПД. Насос предназначен для перекачки жидкости с удельным весом – γ (Н/м³).

Варианты заданий приведены в табл. 4.1.

4.2.2. Выбрать по каталогу (справочной литературе) асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором для привода насоса (вентилятора), характеризующегося заданными параметрами.

4.2.3. Для выбранного двигателя рассчитать по приближенным формулам и построить механические характеристики $n=f(M)$ при $U=U_{ном}$ и $U=0,9 U_{ном}$.

4.2.4. Определить ток, потребляемый электродвигателем из промышленной сети при номинальном режиме работы.

4.2.5. Составить схему дистанционного управления электродвигателем насоса (вентилятора) посредством магнитного пускателя, предусмотрев защиту электродвигателя от перегрузок. Пояснить работу схемы.

4.2.6. Разработать мероприятия по обеспечению электробезопасности персонала, обслуживающего электроустановку.

4.2.7. Привести краткое описание технологического процесса в системах обеспечения (насосные станции, очистные сооружения, вытяжная вентиляция и т.д.) на автотракторных предприятиях с использованием заданного насоса (вентилятора).

Примечание. Для приводов насосов и вентиляторов используют преимущественно асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, как наиболее надежные в эксплуатации, имеющие простую схему управления и защиты, а также как более дешевые.

4.3. Исходные данные к задаче 4

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения задания № 4

№ Варианта	Тип привода		Q, м³/ч	H, м	H, Па	γ, Н/м³	η п				Частота вращения, n об/мин
	насос	вентилятор					ременная	клиноременная	зубчатая	муфта	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01	-	+	1600	-	730	-	-	-	-	+	980
02	+	-	22	30	-	9870	-	-	+	-	2900
03	+	-	20	120	-	9890	-	-	-	+	2900
04	-	+	30000	-	1200	-	-	+	-	-	980
05	+	-	35	200	-	9880	-	-	-	+	2930
06	-	+	40000	-	1200	-	-	+	-	-	1450
07	+	-	45	30	-	9900	-	+	-	-	2900
08	-	+	32100	-	600	-	-	-	+	-	980
09	+	-	39	172	-	9980	+	-	-	-	980
10	-	+	1500	-	725	-	-	-	+	-	980
11	+	-	80	103	-	9760	+	-	-	-	1450
12	+	-	125	52	-	9990	-	-	+	-	1450
13	+	-	96	35	-	9890	-	+	-	-	1450
14	+	-	15	26	-	9250	-	-	-	+	2990
15	-	+	6800	-	360	-	-	-	+	-	980
16	+	-	122	36	-	9320	-	-	+	-	1450
17	-	+	52300	-	380	-	-	-	-	+	980
18	-	+	7250	-	675	-	-	-	+	-	980
19	-	+	6320	-	820	-	+	-	-	-	1450
20	+	-	42	27	-	9600	+	-	-	-	2930
21	+	-	15	18	-	9980	+	-	-	-	1450
22	-	+	32100	-	600	-	-	-	+	-	980
23	+	-	36	183	-	10000	-	-	-	+	2900
24	-	+	15000	-	680	-	-	-	+	-	980
25	+	-	39	172	-	9980	+	-	-	-	980
26	-	+	20000	-	765	-	-	+	-	-	1450
27	+	-	17	28	-	9990	-	-	-	+	2930
28	-	+	19000	-	725	-	-	-	+	-	980
29	+	-	80	103	-	9760	+	-	-	-	1450
30	-	+	75000	-	500	-	-	+	-	-	980
31	+	-	125	55	-	10000	-	-	+	-	1450
32	-	+	63000	-	820	-	+	-	-	-	1450
33	+	-	97	32	-	9880	-	+	-	-	1450
34	-	+	31200	-	630	-	-	-	-	+	1450
35	+	-	62	28	-	9900	+	-	-	-	1450
36	-	+	96800	-	525	-	-	-	+	-	980
37	+	-	17	23	-	9250	-	-	-	+	2990
38	-	+	13000	-	1100	-	-	+	-	-	1450
39	+	-	133	41	-	9800	+	-	-	-	980
40	-	+	69000	-	355	-	-	-	+	-	980
41	+	-	38	11	-	9810	-	-	-	+	2930
42	-	+	91000	-	325	-	-	+	-	-	1450
43	+	-	43	26	-	9600	+	-	-	-	2930
44	-	+	5550	-	440	-	-	-	-	+	980
45	+	-	124	32	-	9320	-	-	+	-	1450
46	-	+	90000	-	320	-	-	+	-	-	1450
47	+	-	28	63	-	9980	+	-	-	-	980

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
48	-	+	52300	-	383	-	-	-	-	+	980
49	+	-	20	26	-	9880	-	-	+	-	1450
50	-	+	72500	-	675	-	-	-	+	-	980
51	+	-	98	32	-	9880	-	+	-	-	1450
52	-	+	64000	-	730	-	+	-	-	-	2950
53	+	-	74	42	-	9980	-	+	-	-	975
54	-	+	45900	-	380	-	-	-	+	-	1475
55	+	-	47	38	-	9990	-	-	-	+	2980
56	-	+	62500	-	450	-	+	-	-	-	985
57	-	-	61	29	-	9890	-	+	-	-	1490
58	-	+	80100	-	265	-	-	-	+	-	2960
59	+	-	57	34	-	9870	-	-	-	+	960
60	-	+	39500	-	535	-	+	-	-	-	1465
61	+	-	95	31	-	9970	-	+	-	-	2970
62	-	+	75500	-	355	-	-	-	+	-	965
63	+	-	86	47	-	9985	-	-	-	+	1480
64	-	+	37500	-	540	-	+	-	-	-	2945
65	+	-	38	57	-	9875	-	+	-	-	985
66	-	+	29500	-	290	-	-	-	+	-	1475
67	+	-	29	43	-	9995	-	-	-	+	2965
68	-	+	19000	-	860	-	+	-	-	-	970
69	+	-	81	22	-	10000	-	+	-	-	1480
70	-	+	53000	-	620	-	-	-	+	-	2955
71	+	-	69	60	-	9900	-	-	-	+	980
72	-	+	22500	-	740	-	+	-	-	-	1480
73	+	-	54	24	-	9975	-	+	-	-	2965
74	-	+	37500	-	680	-	-	-	+	-	965
75	+	-	91	18	-	9885	-	-	-	+	1470
76	-	+	89000	-	460	-	+	-	-	-	2955
77	+	-	77	23	-	9995	-	+	-	-	955
78	-	+	67000	-	555	-	-	-	+	-	1480
79	+	-	59	30	-	11000	-	-	-	+	2975
80	-	+	52000	-	290	-	+	-	-	-	960
81	+	-	89	28	-	10100	-	+	-	-	1470
82	-	+	41000	-	680	-	-	-	+	-	2980
83	+	-	55	20	-	9995	-	-	-	+	970
84	-	+	26500	-	455	-	+	-	-	-	1450
85	+	-	39	23	-	9975	-	+	-	-	2950
86	-	+	46500	-	645	-	-	-	+	-	975
87	+	-	123	24	-	9880	-	-	-	+	1480
88	-	+	51500	-	420	-	+	-	-	-	2975
89	+	-	71	32	-	9890	-	+	-	-	985
90	-	+	43500	-	635	-	-	-	+	-	1485
91	+	-	38	27	-	9885	-	-	-	+	2960
92	-	+	39500	-	545	-	+	-	-	-	960
93	+	-	69	34	-	9875	-	+	-	-	1460
94	-	+	63500	-	369	-	-	-	+	-	2955
95	+	-	51	26	-	10010	-	-	-	+	945
96	-	+	46500	-	284	-	+	-	-	-	1445
97	+	-	68	36	-	9995	-	+	-	-	2980
98	-	+	39650	-	651	-	-	-	+	-	980
99	+	-	53	18	-	9885	-	-	-	+	1460
100	-	+	67550	-	344	-	+	-	-	-	2970

Примечание. Вариант задания выбирается в соответствии с порядковым номером, указанным преподавателем.

5. Методические указания и задания к задаче 5:

«РАСЧЕТ ВТОРИЧНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ»

5.1. Основные положения и особенности расчета вторичных источников питания

Вторичный источник электропитания (ВИП) – это устройство, предназначенное для обеспечения питания электроприбора электрической энергией, при соответствии требованиям её параметров (напряжения, тока и т.д.) путём преобразования энергии других источников питания.

ВИП может быть интегрированным в общую схему (обычно в простых устройствах либо когда недопустимо даже незначительное падение напряжения на подводящих проводах – например материнская плата компьютера имеет встроенные преобразователи напряжения для питания процессора), выполненным в виде модуля (блока питания, стойки электропитания и т.д.) или даже расположенным в отдельном помещении (цехе электропитания).

Задачи ВИП:

- Обеспечение передачи мощности – источник питания должен обеспечивать передачу заданной мощности с наименьшими потерями и соблюдением заданных характеристик на выходе без вреда для себя. Обычно мощность источника питания берут с некоторым запасом.

- Преобразование формы напряжения – преобразование переменного напряжения в постоянное, и наоборот, а также преобразование частоты, формирование импульсов напряжения и т. д. Чаще всего необходимо преобразование переменного напряжения промышленной частоты в постоянное.

- Преобразование величины напряжения – как повышение, так и понижение. Нередко необходим набор из нескольких напряжений различной величины для питания различных цепей.

- Стабилизация – напряжение, ток и другие параметры на выходе источника питания должны лежать в определённых пределах, в зависимости от его назначения при влиянии большого количества дестабилизирующих факторов: изменения напряжения на входе, тока нагрузки и т. д. Чаще всего необходима стабилизация напряжения на нагрузке, однако иногда (например, для зарядки аккумуляторов) необходима стабилизация тока.

- Защита – напряжение, или ток нагрузки, в случае неисправности (например, короткого замыкания) каких-либо цепей может превысить допустимые пределы и вывести электроприбор или сам источник питания из строя. Также во многих случаях требуется защита от прохождения тока по неправильному пути: например прохождение тока через землю при прикосновении человека или постороннего предмета к токоведущим частям.

- Гальваническая развязка цепей – одна из мер защиты от протекания тока по неверному пути.

- Регулировка – в процессе эксплуатации может потребоваться изменение каких-либо параметров для обеспечения правильной работы электроприбора.

- Управление – может включать регулировку, включение/отключение каких-либо цепей или источника питания в целом. Может быть как непосредственным (с помощью органов управления на корпусе устройства), так и дистанционным, а также программным (обеспечение включения/выключения, регулировка в заданное время или с наступлением каких-либо событий).

- Контроль – отображение параметров на входе и на выходе источника питания, включения/выключения цепей, срабатывания защит. Также может быть непосредственным или дистанционным.

Две наиболее типичные конструкции ВИП – это трансформаторные и импульсные источники питания.

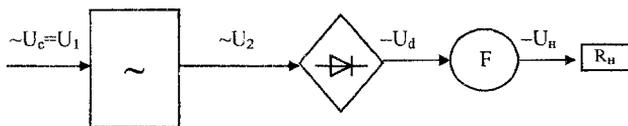
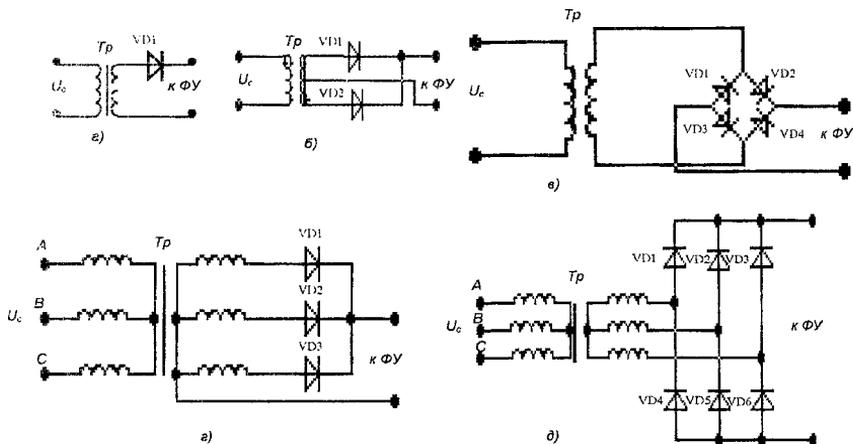


Рисунок 5.1

Классическим источником питания является трансформаторный блок питания (БП) (рис. 5.1). В общем случае он состоит из понижающего трансформатора или автотрансформатора, у которого первичная обмотка рассчитана на сетевое напряжение. Затем устанавливается выпрямитель, преобразующий переменное напряжение в постоянное (пульсирующее однонаправленное). В большинстве случаев выпрямитель состоит из одного диода (однополупериодный выпрямитель), двух диодов (двухполупериодный мостовой выпрямитель) или четырех диодов, образующих диодный мост (двухполупериодный выпрямитель). Трехфазный выпрямитель состоит из трех диодов (однополупериодный выпрямитель с нейтральным проводом) или шести диодов (двухполупериодный мостовой выпрямитель Ларионова).

На рис. 5.2 приведены схемы полупроводниковых выпрямителей.



а) – однофазная однополупериодная

б) – однофазная двухполупериодная со средней точкой (с нулевым выводом);

в) – однофазная мостовая; г) – трехфазная с отводом от нулевой точки;

д) – трехфазная мостовая (схема Ларионова). ФУ – фильтрующее устройство

Рисунок 5.2 – Схемы выпрямителей

В таблице 5.1 приведены справочные данные для выбора диодов выпрямителя и расчета параметров трансформатора. В таблице 5.1: U_n, I_n – средние значения выпрямленного напряжения и тока на нагрузке; f_c – частота питающей сети; $U_{обр\ max}$ – максимальное обратное напряжение на диодах; $I_{пр\ ср}$ – среднее значение прямого тока на диодах; $S_{тр}$ – полная мощность трансформатора; U_2 – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора; P_n – номинальная мощность нагрузки; f_n – частота и K_n – коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя (на входе фильтра).

Таблица 5.1.

Схема выпрямителя	Режим работы диодов		Параметры трансформатора		$k_{п.вх}, \%$	f_n
	$U_{обр\ max}$	$I_{пр\ ср}$	U_2	$S_{тр}$		
Рис. 5.1 а	πU_H	I_H	$\frac{U_H}{0,45}$	$2,23P_H$	157	f_c
Рис. 5.1 б	πU_H	$0,5I_H$	$\frac{U_H}{0,9}$	$1,48P_H$	67	$2f_c$
Рис. 5.1 в	$\frac{\pi}{2} U_H$	$0,5I_H$	$\frac{U_H}{0,9}$	$1,23P_H$	67	$2f_c$
Рис. 5.1 г	$2,09U_H$	$0,33I_H$	$\frac{U_H}{1,17}$	$1,34P_H$	25	$3f_c$
Рис. 5.1 д	$1,05U_H$	$0,33I_H$	$\frac{U_H}{2,34}$	$1,05P_H$	5,7	$6f_c$

Основным параметром фильтра является коэффициент сглаживания:

$$q = \frac{k_{п.вх}}{k_{п.ф}}, \quad (5.1)$$

где $k_{п.вх}$ – коэффициент пульсаций на входе фильтра (см. табл. 5.1),

$k_{п.ф}$ – коэффициент пульсаций на выходе фильтра.

1. Индуктивный фильтр (рис. 5.3)

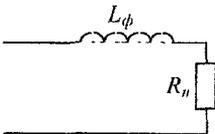


Рисунок 5.3

Коэффициент сглаживания

$$q \approx \frac{p 2\pi f_c L_\phi}{R_H}, \quad (5.2)$$

где p – число импульсов выпрямленного напряжения (числовой коэффициент при f_n в табл. 5.1). Отсюда

$$L_\phi = \frac{q R_H}{p 2\pi f_c} \quad (5.3)$$

2. Резистивно-емкостной фильтр (рис. 5.4)

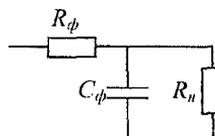


Рисунок 5.4

Коэффициент сглаживания

$$q \approx \frac{p 2\pi f_c L_\phi R_\phi R_H}{R_\phi + R_H} \quad (5.4)$$

Отсюда

$$C_\phi = \frac{q(R_\phi + R_H)}{p 2\pi f_c R_\phi R_H} \quad (5.5)$$

Сопротивление фильтра необходимо выбирать в интервале $0,25R_H \leq R_\phi \leq 65R_H$.

Рекомендуемое значение сопротивления фильтра $R_\phi = 0,25R_H$.

3. Индуктивно-емкостной фильтр (рис. 5.5)

Коэффициент сглаживания:

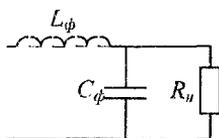


Рисунок 5.5

$$a. \quad q \approx (p2\pi f_c)^2 L_\phi C_\phi - 1 \quad (5.6)$$

Для обеспечения индуктивной реакции необходимо,

$$\text{чтобы } L_\phi \geq \frac{2R_n}{(p^2 - 1)p2\pi f_c} (\Gamma_n). \quad (5.7)$$

$$\text{Отсюда } C_\phi = \frac{q-1}{(p2\pi f_c)^2 L_\phi}. \quad (5.8)$$

5.2. Задания к задаче 5

5.2.1. Рассчитать необходимые параметры и выбрать по справочнику тип полупроводниковых диодов для выпрямителя.

5.2.2. Определить расчетную мощность и коэффициент трансформации трансформатора. При расчете диоды считать идеальными.

5.2.3. Выбрать тип фильтра и рассчитать его параметры таким образом, чтобы обеспечивался допустимый коэффициент пульсации напряжения на нагрузке.

5.2.4. Начертить рассчитанную схему блока питания, указав на схеме тип вентилей, параметры фильтра, мощность и коэффициент трансформации трансформатора, полярность выходных клемм.

5.3. Исходные данные к задаче 5

Полупроводниковый выпрямитель, питающий электротехническую установку, работает на активную нагрузку. Питание выпрямителя осуществляется через трансформатор от сети переменного тока, для сглаживания выходного пульсирующего напряжения выпрямителя используется фильтр. Напряжение и частота сети, схема выпрямления, мощность и номинальное напряжение нагрузки, а также допустимый коэффициент пульсации напряжения на нагрузке приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исходные данные к задаче 5

Вариант	Схема выпрямления	Напряжение сети $U_{сети}, В$	Частота сети $f_{сети}, Гц$	Номинальное напряжение нагрузки $U_n, В$	Номинальная мощность нагрузки $P_n, Вт$	Допустимый коэффициент пульсаций $k_n, \%$
1	2	3	4	5	6	7
00	А	127	50	600	40	5,0
01	Б	80	400	1500	30	0,5
02	В	220	50	12	20	2,0
03	Г	110	400	110	300	1,0
04	Д	380	50	220	1500	2,5
05	А	200	400	3000	10	2,0
06	Б	127	50	600	100	2,0
07	В	80	400	24	120	0,5
08	Г	220	50	100	500	3,0
09	Д	110	400	200	1000	1,0
10	А	380	50	1000	20	4,0
11	Б	200	400	250	25	2,0
12	В	127	50	48	100	4,0
13	Г	80	400	150	1500	2,0
14	Д	220	50	250	1200	3,0
15	А	110	400	600	100	2,0
16	Б	380	50	200	50	2,0

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4	5	6	7
17	В	200	400	60	600	0,5
18	Г	127	50	200	300	2,0
19	Д	80	400	150	1500	1,0
20	А	220	50	1000	30	3,0
21	Б	110	400	150	100	3,0
22	В	380	50	12	150	1,0
23	Г	200	400	250	750	2,0
24	Д	127	50	200	20	1,0
25	А	80	400	2500	300	3,0
26	Б	220	50	150	150	2,0
27	В	110	400	24	160	1,0
28	Г	380	50	80	50	1,0
29	Д	200	400	48	1000	1,0
30	А	220	50	100	200	3,0
31	Б	220	400	80	400	1,0
32	В	200	50	48	500	1,5
33	Г	127	400	6	100	2,0
34	Д	110	50	15	300	2,5
35	А	380	400	9	50	3,0
36	Б	200	50	100	100	2,5
37	В	127	400	12	100	2,0
38	Г	220	50	24	80	2,5
39	Д	240	400	48	500	0,5
40	А	380	400	150	300	0,5
41	Б	80	400	110	70	1,0
42	В	110	50	9	20	1,0
43	Г	220	400	127	200	1,5
44	Д	380	50	220	30	0,5
45	А	220	400	36	40	1,5
46	Б	127	50	15	75	0,75
47	В	240	400	20	10	0,5
48	Г	380	50	50	100	1,5
49	Д	110	400	24	50	0,5
50	А	127	50	3000	30	2,0
51	А	127	50	48	100	5,0
52	Б	220	400	24	50	3,0
53	В	380	50	15	150	2,0
54	Г	220	400	12	100	1,5
55	Д	380	50	36	150	1,0
56	А	127	400	9	50	4,0
57	Б	220	50	5	50	3,0
58	В	127	400	110	500	2,5
59	Г	380	50	220	1000	2,0
60	Д	660	400	48	500	2,0
61	А	127	50	36	100	3,0
62	Б	220	400	24	50	2,0
63	В	127	50	12	100	4,0
64	Г	660	400	9	50	3,0
65	Д	380	50	5	100	4,0
66	А	127	400	9	50	2,0
67	Б	220	50	12	80	1,5
68	В	127	400	24	100	2,5
69	Г	380	50	36	100	1,0
70	Д	660	400	48	500	3,0
71	А	127	50	110	800	5,0
72	Б	220	400	48	200	1,0
73	В	127	50	24	100	2,0

Окончание таблицы 5.2

1	2	3	4	5	6	7
74	Г	220	400	36	50	1,5
75	Д	380	50	12	100	1,0
76	А	220	400	5	80	2,0
77	Б	127	50	24	60	3,0
78	В	220	400	48	100	2,0
79	Г	380	50	110	1000	3,0
80	Д	127	400	24	200	1,0
81	А	660	50	110	600	5,0
82	Б	127	400	48	100	4,0
83	В	220	50	24	60	2,0
84	Г	380	400	12	50	1,0
85	Д	660	50	110	600	5,0
86	А	380	400	110	500	5,0
87	Б	220	50	48	200	2,0
88	В	127	400	36	100	1,0
89	Г	220	50	24	60	1,5
90	Д	380	400	120	50	1,0
91	А	220	50	9	50	4,0
92	Б	127	400	5	50	2,0
93	В	220	50	9	100	3,0
94	Г	380	400	12	80	2,0
95	Д	380	50	24	100	2,5
96	А	220	400	36	50	4,0
97	Б	127	50	110	1000	3,0
98	В	220	400	36	80	2,0
99	Г	380	50	24	100	1,0

Примечание А – однофазная однополупериодная схема выпрямления;

Б – однофазная с нулевым выводом;

В – однофазная мостовая;

Г – трехфазная с нулевым выводом;

Д – трехфазная мостовая

Вариант модели выбирается в соответствии с порядковым номером, указанным преподавателем.

Рекомендуемая литература.

1. Бессонов, П.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1996.
2. Борисов, Ю.М. Электротехника / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Брускин, Д.Э. Электрические машины: в 2-х ч. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зохорович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1979.
4. Вольнский, В.А. Электротехника / В.А. Вольнский, Е.И. Зейн. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Зенске, Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Иванов, И.И. Электротехника / И.И. Иванов, В.С. Равдоник. – М.: Высш.шк., 1984.
7. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, Н.В. Немцов. – М.: Высш. шк., 2000.
8. Коровкин, Н.В. Теоретические основы электротехники: Сборник задач / Н.В. Коровкин, Г.И. Селина, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2004.
9. Москаленко, В.В. Справочник электромонтера. – М.: ПрофОбрИздат, 2002.
10. Рекус, Г.Г. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: учебное пособие для неэлектротехн. спец. вузов / Г.Г. Рекус, А.И. Белоусов. – М.: Высш. шк., 1991.
11. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / М.Ю. Анфельт, В.Г. Герасимов, В.П. Данильченко [и др.]; под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высш.шк., 1979.
12. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники / под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высш. школа, 1986.
13. Панасюк, И.М. Электрические цепи. Методические рекомендации по выполнению электротехнических расчётов с примерами решения типовых задач для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения / И.М. Панасюк, А.И. Пекун. – Брест: БрГТУ, 2006. – Часть 1.

Составители:
Клопоцкий Александр Анатольевич
Панасюк Игорь Михайлович
Пекун Александр Иванович

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЯ

для выполнения контрольной работы
по дисциплине

"Электротехника и электроника"

для студентов специальности

1 - 37 01 06 – "Техническая эксплуатация автомобилей"
заочной формы обучения

Ответственный за выпуск: Панасюк И.М.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная верстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 30.10.2013 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Снегурочка».
Усл. печ. л. 2,3. Уч. изд. л. 2,5. Заказ № *1169*. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.