

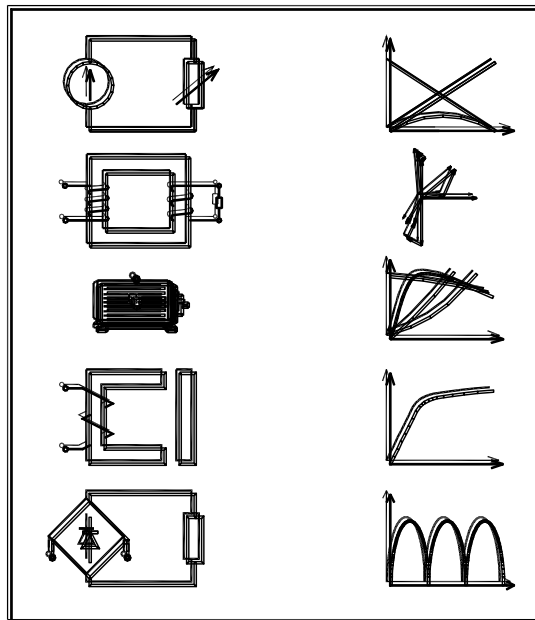
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В. А. ПАЦКЕВИЧ, В. Г. ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие для выполнения контрольных работ
студентами безотрывной формы обучения



Гомель 2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В. А. ПАЦКЕВИЧ, В. Г. ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие для выполнения
контрольных работ студентами безотрывной формы обучения

Под редакцией *В. Г. Черномашенцева*

Одобрено методической комиссией ФБО

Гомель 2009

УДК [621.3+621.38](075.8)

ББК 31.2

П21

Рецензенты: зав. кафедрой «Автоматизированный электропривод» д-р техн. наук, профессор *В. И. Луковников* (УО «ГГТУ им. П. О. Сухого»), зав. кафедрой «Электрический подвижной состав» канд. техн. наук, доцент *В. С. Могила* (УО «БелГУТ»).

Пацкевич, В. А.

П21 Электротехника и основы электроники : учеб.-метод. пособие для выполнения контрольных работ студентами безотрывной формы обучения / В. А. Пацкевич, В. Г. Черномашенцев ; под ред В. Г. Черномашенцева ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп.– Гомель : БелГУТ, 2009. – 146 с.

ISBN 978-985-468-487-1

Содержит теоретическую часть, необходимую для выполнения контрольных работ, практическую, включающую в себя задания и методические указания к их выполнению, состоит из шести разделов: электрические цепи постоянного тока, цепи однофазного и трёхфазного переменного тока, магнитные цепи, трансформаторы, асинхронные двигатели, выпрямители.

Предназначено для студентов неэлектротехнических специальностей безотрывной формы обучения.

УДК [621.3+621.38](075.8)

ББК 31.2

ISBN 978-985-468-487-1

© Пацкевич В. А., Черномашенцев В. Г., 2009

© Оформление. УО «БелГУТ», 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	7
1.1 Основные понятия об электрической цепи.....	7
1.2 Основные законы электрических цепей.....	9
1.3 Расчёт простых цепей постоянного тока.....	12
1.4 Расчет сложных цепей постоянного тока.....	15
1.4.1 Методика расчета сложной цепи с помощью непосредственного применения законов Кирхгофа	16
1.4.2 Методика расчета цепи методом контурных токов.....	17
1.4.3 Метод межузлового напряжения.....	19
1.5 Потенциальная диаграмма.....	21
2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	24
2.1 Основные понятия об однофазном переменном токе.....	24
2.2 Расчёт цепей переменного тока.....	28
2.2.1 Применение комплексных чисел для расчета цепей переменного тока..	29
2.3 Особенности трехфазных цепей.....	36
2.3.1 Расчёт трёхфазных цепей.....	38
3 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	46
3.1 Нелинейные электрические цепи постоянного тока.....	46
3.1.1 Классификация нелинейных элементов.....	47
3.1.2 Методы расчета нелинейных цепей постоянного тока.....	48
3.2 Нелинейные элементы электрической цепи переменного тока.....	53
4 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ	55
4.1 Основные понятия о магнитных цепях.....	55
4.2 Определение магнитодвижущей силы цепи.....	58
4.3 Определение магнитной индукции в заданном сечении.....	61
5 ТРАНСФОРМАТОРЫ	64
5.1 Основные понятия о трансформаторах.....	64
5.2 Приведённый трансформатор и его схема замещения.....	68
5.3 Режимы работы трансформатора.....	71
6 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ	80
6.1 Принцип действия асинхронного двигателя.....	80
6.2 Асинхронная машина при неподвижном роторе.....	82
6.3 Работа асинхронной машины при вращающемся роторе.....	85
6.4 Вращающий момент асинхронного двигателя.....	87

7 ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	95
7.1 Основные понятия о выпрямителях.....	95
7.2 Однофазная схема выпрямления с нулевой точкой.....	96
7.3 Однофазная мостовая схема выпрямления.....	100
7.4 Трёхфазная схема выпрямления с нулевой точкой.....	103
7.5 Трёхфазная мостовая схема выпрямления.....	106
7.6 Фильтрация выпрямленного напряжения.....	109
8 ЗАДАНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ.....	113
8.1 Контрольная работа № 1.....	113
8.2 Контрольная работа № 2.....	118
8.3 Контрольная работа № 3.....	123
8.4 Контрольная работа № 4.....	135
9 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ».....	140
9.1 Общие сведения о курсе и методические указания по самостоятельной работе над ним.....	140
9.2 Контрольные вопросы для подготовки к сдаче теоретического курса.....	140
9.2.1 Вопросы к зачёту по дисциплине «Электротехника и основы электроники».....	140
9.2.2 Вопросы для подготовки к экзамену по дисциплине «Электротехника и основы электроники».....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А Справочные таблицы.....	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения контрольных работ по дисциплине «Электротехника и основы электроники» студентами III курса неэлектротехнических специальностей безотрывной формы обучения Белорусского государственного университета транспорта.

Пособие включает в себя следующие разделы: электрические цепи постоянного тока, цепи однофазного переменного тока, трёхфазные и магнитные цепи, трансформаторы и асинхронные двигатели, выпрямители. Каждый раздел содержит в себе: теоретическую часть, необходимую для решения задач; практическую, в которой приведены задачи для решения и методические указания к их решению. Это позволяет студентам выполнить четыре контрольные работы.

Каждая контрольная работа оформляется в отдельной тетради и должна содержать подробное условие задачи, принципиальную схему цепи, расчетную часть и требуемые графики или диаграммы, которые следует выполнять карандашом на миллиметровой бумаге. Расчетные точки, через которые проводятся линии графика, должны быть обозначены на кривых. Для координатных осей необходимо выбирать равномерные масштабы, кратные 1; 2; 2,5; 5; 10 и т. д., во всем диапазоне изменения величины, при этом по оси абсцисс откладывается только один масштаб какой-нибудь величины, например P_2 , а по направлению оси ординат можно построить несколько масштабных осей по числу рассматриваемых зависимостей, например $I_1 = f_1(P_2)$; $\cos\varphi_1 = f_2(P_2)$; $n = f_3(P_2)$ и т. д. Все вертикальные шкалы должны быть оцифрованы равномерно на одной высоте и начинаться с нуля.

При выполнении контрольных работ необходимо применять стандартные условные обозначения электрических величин, единиц их измерения и условные графические обозначения элементов электрических цепей по ГОСТам. Расчетная часть контрольной работы пишется на одной стороне листа с обязательным оставлением полей для замечаний рецензента. Листы, рисунки и таблицы должны быть пронумерованы. Применять сокращения не следует, кроме общепринятых. В тексте должны быть приведены номера таблиц, рисунков тех источников, которые использованы в расчете.

Результаты расчетов округляются до трех значащих цифр. Ошибки, отмеченные рецензентом, должны быть исправлены аккуратно. Для исправлений можно использовать обратную (чистую) сторону предыдущего листа. При большом количестве исправлений на одной странице ее нужно переписать и вклеить рядом со страницей, содержащей замечания рецензента.

Для успешного выполнения контрольных работ необходимо изучить в учебнике по электротехнике и электронике соответствующий теоретический раздел (можно воспользоваться краткими теоретическими сведениями, приведёнными в первых разделах пособия). Без знания теории нельзя рассчитывать на решение даже сравнительно простых задач.

Номера вариантов задач выбираются по таблицам (разд. 8) согласно цифрам учебного шифра студента или выдаются преподавателем, ведущим данный вид занятия.

При разработке пособия использован материал учебников [1–9].

Для решения задач можно рекомендовать следующие общие указания:

1 Внимательно прочитайте условие задачи и при необходимости дать его наглядную схемную интерпретацию, используя условные графические обозначения элементов электрических схем и электрических машин в соответствии с ГОСТами.

2 Записать числовые данные условия задачи и их единицы измерения. Указать также те величины, числовые значения которых непосредственно не задаются, но о них можно судить по условию задачи. Например, если в условии сказано, что активным сопротивлением обмотки можно пренебречь, следует записать $R = 0$, если в задаче насыщение не учитывается, указывается $\mu = \infty$ и т. п. Устанавливаются искомые величины и единицы их измерения.

3 Подобрать нужную формулу. Если искомая величина определяется из нескольких выражений, то необходимо сличить заданные параметры с величинами, входящими в различные формулы и выбрать требуемое выражение. При необходимости выполнить преобразования для определения искомой величины.

4 Если решение задачи требует графических построений, то следует предварительно наметить последовательность графических операций.

5 Провести числовой расчет и анализ полученного результата. Получив числовой ответ, следует по возможности оценить его соответствие реальному физическому смыслу исходной величины.

6 В заключение целесообразно проанализировать расчетную формулу, последовательность графических построений, алгоритм расчета и выяснить, как изменяются искомые величины при изменении величин, функцией которых они являются.

1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1 Основные понятия об электрической цепи

Электрической цепью называют совокупность соединённых друг с другом источников электрической энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток. Графическое изображение такой цепи с помощью условных знаков, отражающее реальную взаимосвязь всех элементов между собой, называется принципиальной схемой.

В устройствах для генерирования электрической энергии (источниках электрической энергии) возбуждается электродвижущая сила (ЭДС) в процессе преобразования различных видов энергии в электрическую. Каждый источник характеризуется ЭДС и внутренним сопротивлением. Единицей измерения ЭДС является вольт (В), а сопротивления – ом (Ом).

ЭДС указывает на значение разности потенциалов между зажимами источника при отсутствии тока в нём, а внутреннее сопротивление характеризует его способность отдавать в нагрузку ту или иную мощность. При равном значении ЭДС источники с малым внутренним сопротивлением могут развивать в нагрузке мощность большую, чем те, у которых внутреннее сопротивление велико. Если в условии задачи ничего не говорится о внутреннем сопротивлении источника, то его сопротивление можно считать равным нулю. На принципиальных схемах источник питания можно изображать в виде круга диаметром 10 мм, внутри которого размещается стрелка. Остриё стрелки внутри круга направлено к положительному полюсу источника постоянного тока.

В приёмниках происходит обратное преобразование электрической энергии в другие виды энергии: тепловую, механическую, световую, химическую и т. д. Приёмник энергии можно характеризовать рабочим напряжением, током, мощностью, а также сопротивлением.

На принципиальных схемах приёмники, без раскрытия их сущности, можно изображать в виде прямоугольника размером 4x10 мм.

Источники электрической энергии соединяются с приёмниками линиями электрической связи, которые на принципиальных схемах изображаются

отрезками прямых. Сопротивление соединительных проводов в задачах считается равным нулю.

В замкнутой электрической цепи ЭДС источника создает ток. Цепь, в которой значение тока не зависит от времени, называется цепью постоянного тока. Обозначается такой ток прописной печатной буквой I .

Если сопротивление элементов электрической цепи не зависит от тока или напряжения на них, то такие элементы называются линейными. Цепь, содержащая только линейные элементы, называется линейной. При наличии в цепи даже одного нелинейного элемента, сопротивление которого зависит от тока или напряжения, вся цепь считается нелинейной. В задачах контрольных работ рассматриваются линейные электрические цепи. При решении некоторых задач используется величина, обратная сопротивлению, называемая проводимостью. Измеряется проводимость сименсами (См).

В простейшем случае, элементы цепи могут соединяться последовательно, параллельно и смешанно. Пример последовательного соединения приведен на рисунке 1.1, *а*. Во всех элементах, включённых последовательно, протекает один и тот же ток. Напряжение на элементах, включённых последовательно, прямо пропорционально их сопротивлению.

На рисунке 1.1, *б* дан пример параллельного соединения потребителей. При этом на всех элементах, включённых параллельно, действует одно напряжение, а токи в этих элементах обратно пропорциональны их сопротивлениям.

Отличительной чертой смешанного соединения является наличие в цепи участков с последовательным и параллельным соединениями. В качестве примера, на рисунке 1.1, *в* изображена цепь с пятью потребителями. Три из них (r_1, r_2, r_3) включены последовательно, а два (r_4, r_5) параллельно. Следует отметить, что, несмотря на отсутствие непосредственного соединения потребителя r_3 с потребителями r_1 и r_2 , его также можно считать соединённым последовательно с первыми двумя. Это возможно потому, что по элементам r_1, r_2, r_3 протекает один и тот же ток, а после подключения к зажимам цепи источника питания они входят в состав одной ветви. Через элементы r_1, r_2 ток входит на участок с потребителями r_4, r_5 , а выходит из него через r_3 .

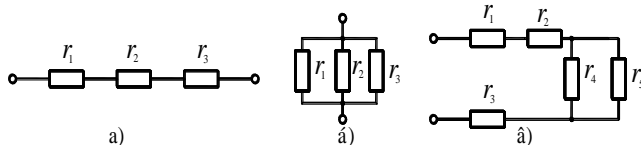


Рисунок 1.1 – Способы соединения элементов в электрической цепи

В некоторых случаях элементы цепи могут соединяться по более сложным схемам. В качестве примера на рисунке 1.2 приведена схема,

называемая мостовой.

Цепь, на всех участках которой протекает один и тот же ток, называется неразветвлённой. Если же цепь содержит участки с различными токами, она является разветвлённой. На рисунке 1.3 приведён пример разветвлённой электрической цепи.

Электрические цепи могут быть простыми и сложными. Простые характеризуются одним током (неразветвлённые цепи) или одним напряжением, когда несколько пассивных ветвей (ветви без источников питания) соединены параллельно и подключены к зажимам источника питания. В реальных условиях большинство электротехнических устройств работают в сложных электрических цепях.

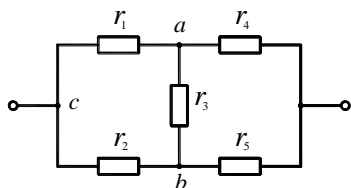


Рисунок 1.2 – Мостовая схема соединения потребителей электрической энергии

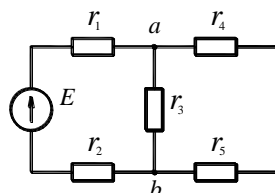


Рисунок 1.3 – Пример разветвлённой электрической цепи

В электрической цепи можно выделить узлы, ветви и контуры. Ветвь – участок цепи, состоящий из одного или нескольких последовательно соединённых элементов, заключённый между двумя узлами. По всем элементам ветви протекает одинаковый ток. Узел – точка, где сходятся три и более ветви. Контур – любой замкнутый путь, образованный одной или несколькими ветвями. Независимыми контурами являются такие, при выборе которых в каждый последующий контур входит хотя бы одна новая ветвь, не входившая в предыдущие. В любой цепи содержатся ветви и контуры, а узлы присущи только разветвлённым цепям.

Схема, изображённая на рисунке 1.3, имеет три ветви. Первая ветвь образована последовательно соединёнными элементами r_1 , E , r_2 . Вторая её ветвь состоит из резистора r_3 , а в третьей включены r_4 и r_5 . В схеме есть три контура, из них только два независимых. Первый контур образован элементами r_1 , r_3 , r_2 , E , второй – r_3 , r_4 , r_5 и третий – E , r_1 , r_4 , r_5 , r_2 . Два первых контура являются независимыми, а третий нет, так как он не содержит новых ветвей, не входивших в два первых контура.

1.2 Основные законы электрических цепей

При анализе простых и сложных цепей широко используются законы Ома, Кирхгофа, Джоуля–Ленца, Фарадея.

В соответствии с законом Ома ток участка цепи I пропорционален

напряжению на этом участке U и обратно пропорционален его сопротивлению r :

$$I = \frac{U}{r} . \quad (1.1)$$

Произведение сопротивления участка цепи на значение тока, протекающего через него, называется падением напряжения на данном участке:

$$U = Ir . \quad (1.2)$$

Если левую и правую части формулы (1.2) умножить на ток, то получим выражение для мощности на участке цепи:

$$P = UI = I^2 r . \quad (1.3)$$

В некоторых случаях можно использовать закон Ома для всей цепи, устанавливающий взаимосвязь между ЭДС источника питания E , током I и полным сопротивлением, состоящим из внутреннего сопротивления источника r_0 и внешнего сопротивления цепи r :

$$I = \frac{E}{r_0 + r} . \quad (1.4)$$

Первый закон Кирхгофа применяется для узла электрической цепи (точки, где сходятся три и более ветви). Формулируется он следующим образом: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

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

В этом уравнении можно принять токи, направленные к узлу, со знаком минус, а выходящие из узла – со знаком плюс.

Второй закон Кирхгофа справедлив для контура электрической цепи (любого замкнутого пути, образованного двумя или более ветвями) и формулируется следующим образом: в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на участках цепи, входящих в этот контур, равна алгебраической сумме ЭДС в нем:

$$\sum Ir = \sum E . \quad (1.6)$$

В данном уравнении положительный знак для падения напряжения берётся в том случае, если направление тока, создающего это падение, совпадает с направлением обхода контура. В противном случае берётся знак минус. Аналогично, если направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то при алгебраическом суммировании эта ЭДС положительна. Направление обхода контура выбирается произвольно, по часовой или против часовой стрелке.

Рассмотрим применение законов Кирхгофа для сложной цепи, изображенной на рисунке 1.4. В данной цепи два узла (точки a и c), три

ветви и три контура, из них только два независимых. Приняв выходящие из узла токи с положительным знаком, для узла c по первому закону Кирхгофа можно записать

$$-I_3 - I_1 - I_2 = 0. \quad (1.7)$$

Аналогично для узла a

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (1.8)$$

По второму закону Кирхгофа для всех трех контуров:

$$\begin{aligned} I_1 r_1 - I_2 r_2 &= E_1 - E_2; \\ I_2 r_2 - I_3 (r_3 + r_4) &= E_2; \\ I_1 r_1 - I_3 (r_3 + r_4) &= E_1. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Закон Джоуля–Ленца позволяет определить количество тепловой энергии, которая выделяется на сопротивлении r при протекании по нему электрического тока. Математическая запись этого закона имеет вид:

$$W = I^2 r t, \quad (1.10)$$

где I – значение тока;

r – сопротивление нагрузки;

t – время протекания тока.

Для характеристики скорости превращения электрической энергии в тепловую используют мощность, выражение для которой можно получить из закона Джоуля–Ленца:

$$P = W/t = I^2 r = U^2 / r = UI. \quad (1.11)$$

Закон электромагнитной индукции устанавливает связь между индуцированием ЭДС в электрических цепях и изменением магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром цепи, или индуцированием ЭДС в проводнике при пересечении им магнитного поля. В соответствии с этим законом ЭДС, индуцируемая в цепи при изменении магнитного потока, проходящего через поверхность, ограниченную контуром, равна скорости изменения магнитного потока, взятой с отрицательным знаком,

$$e = - d\Phi/dt,$$

где Φ – магнитный поток;

t – время.

На основании этого закона можно записать выражение для ЭДС, возникающих в обмотках машин переменного тока при пересечении их синусоидальным магнитным потоком:

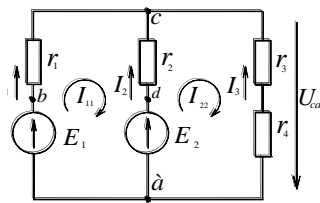


Рисунок 1.4 – Схема сложной электрической цепи

$$E = 4,44wf\Phi_m, \quad (1.12)$$

где w – число витков обмотки, в которой наводится ЭДС;

f – частота изменения магнитного потока;

Φ_m – амплитудное значение магнитного потока, пронизывающего витки обмотки.

Выражение (1.12), называемое формулой трансформаторной ЭДС, широко используется при анализе электромагнитных процессов в трансформаторах, асинхронных и синхронных машинах.

1.3 Расчет простых цепей постоянного тока

Целью расчёта электрической цепи является определение некоторых параметров на основе исходных данных, из условия задачи. На практике используют несколько методов расчёта простых цепей. Один из них базируется на применении эквивалентных преобразований, позволяющих упростить цепь. Под эквивалентными преобразованиями в электрической цепи подразумевается замена одних элементов другими таким образом, чтобы электромагнитные процессы в ней не изменились, а схема упростилась. Одним из видов таких преобразований является замена нескольких потребителей, включённых последовательно или параллельно, одним эквивалентным.

Несколько последовательно соединённых потребителей можно заменить одним, причём его эквивалентное сопротивление равно сумме сопротивлений потребителей, включённых последовательно. Для n потребителей можно записать

$$r_3 = r_1 + r_2 + \dots + r_n, \quad (1.13)$$

где r_1, r_2, \dots, r_n – сопротивления каждого из n потребителей.

При параллельном соединении n потребителей эквивалентная проводимость g_3 равна сумме проводимостей отдельных элементов, включённых параллельно,

$$g_3 = g_1 + g_2 + \dots + g_n. \quad (1.14)$$

Учитывая, что проводимость является обратной величиной по отношению к сопротивлению, можно эквивалентное сопротивление определить из выражения

$$\frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}, \quad (1.15)$$

где r_1, r_2, \dots, r_n – сопротивления каждого из n потребителей, включённых параллельно.

В частном случае, когда параллельно включены два потребителя r_1 и r_2 , эквивалентное сопротивление цепи

$$r_{\bar{y}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}, \quad (1.16)$$

Преобразования в сложных цепях, где отсутствует в явном виде последовательное и параллельное соединение элементов (рисунок 1.5), начинают с замены элементов, включённых в исходной схеме треугольником, на эквивалентные элементы, соединённые звездой.

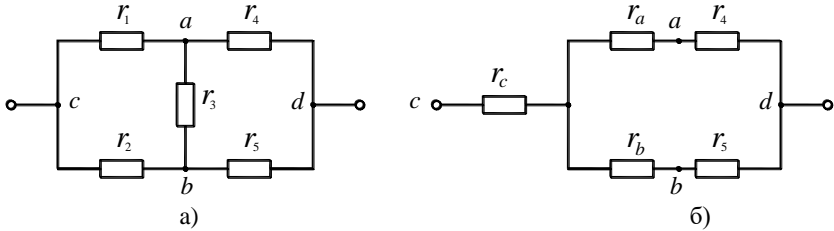


Рисунок 1.5 – Преобразование элементов цепи, соединённых треугольником, в эквивалентную звезду

На рисунке 1.5, *а* треугольник элементов образуют потребители r_1, r_2, r_3 . На рисунке 1.5, *б* этот треугольник заменён эквивалентными элементами r_a, r_b, r_c , соединёнными звездой. Чтобы не происходило изменение потенциалов в точках a, b, c схемы, сопротивления эквивалентных потребителей определяются из выражений:

$$r_a = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}, \quad r_b = \frac{r_2 r_3}{r_1 + r_2 + r_3}, \quad r_c = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2 + r_3}. \quad (1.17)$$

Упрощение исходной цепи можно также осуществить заменой элементов, соединённых звездой, схемой, в которой потребители соединены треугольником.

В схеме, изображённой на рисунке 1.6, *а*, можно выделить звезду, образованную потребителями r_1, r_3, r_4 . Эти элементы включены между точками c, b, d . На рисунке 1.6, *б* между этими точками находятся эквивалентные потребители r_{bc}, r_{cd}, r_{bd} , соединённые треугольником. Сопротивления эквивалентных потребителей определяются из выражений:

$$r_{cd} = r_1 + r_4 + \frac{r_1 r_4}{r_3}, \quad r_{bc} = r_1 + r_3 + \frac{r_1 r_3}{r_4}, \quad r_{bd} = r_3 + r_4 + \frac{r_3 r_4}{r_1}. \quad (1.18)$$

Дальнейшее упрощение схем, приведённых на рисунках 1.5, *б* и 1.6, *б*, можно осуществлять путём замены участков с последовательным и параллельным соединением элементов их эквивалентными потребителями.

При практической реализации метода расчёта простой цепи с помощью преобразований выявляются в цепи участки с параллельным и последовательным соединением потребителей, а затем рассчитываются

эквивалентные сопротивления этих участков. Если в исходной цепи в явном виде нет таких участков, то, применяя описанные ранее переходы от треугольника элементов к звезде или от звезды к треугольнику, проявляют их. Данные операции позволяют упростить цепь. Применив их несколько раз, приходят к виду с одним источником и одним эквивалентным потребителем энергии. Далее, применяя законы Ома и Кирхгофа, рассчитывают токи и напряжения на участках цепи.

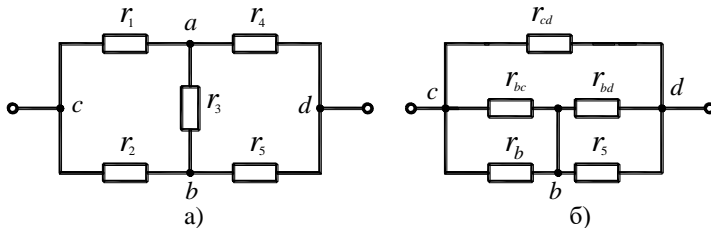


Рисунок 1.6 – Преобразование элементов цепи, соединённых звездой, в эквивалентный треугольник

Пример 1.1. Расчёт разветвлённой электрической цепи постоянного тока

В заданной цепи постоянного тока, изображённой на рисунке 1.7, определить токи ветвей.

Дано: $E = 100 \text{ В}$, $r_1 = 4 \text{ Ом}$, $r_2 = 6 \text{ Ом}$, $r_3 = 5 \text{ Ом}$, $r_4 = 1 \text{ Ом}$, $r_5 = 3 \text{ Ом}$.

Решение. Задаёмся направлением токов всех ветвей и обозначаем эти токи на схеме. При определении направления тока следует учитывать тот факт, что ток в ветви течёт от большего потенциала к меньшему. Далее выполняем эквивалентные преобразования в цепи и последовательно упрощаем схему. Начинаем с замены двух последовательно включенных резисторов r_3 и r_4 одним эквивалентным. Схема упрощается и имеет вид, изображённый на рисунке 1.8, а.

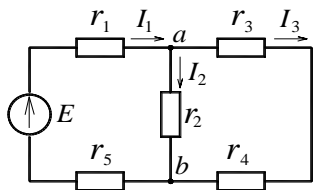


Рисунок 1.7 – Схема разветвлённой электрической цепи постоянного тока

Резистор r_{34} рассчитывают следующим образом (при последовательном соединении r_3 и r_4):

$$r_{34} = r_3 + r_4 = 5 + 1 = 6 \text{ Ом.}$$

Дальнейшее упрощение схемы происходит в результате замены параллельно включенных резисторов r_2 и r_{34} одним r_{234} (рисунок 1.8, б). Эквивалентное сопротивление двух резисторов, включенных параллельно, можно определить из выражения (1.16):

$$r_{234} = r_2 r_{34} / (r_2 + r_{34}) = 6 \cdot 6 / (6 + 6) = 3 \text{ Ом.}$$

Окончательное упрощение цепи происходит после замены трех последовательно соединенных резисторов r_1 , r_{234} , и r_5 одним эквивалентным для всей цепи (рисунок 1.8, в):

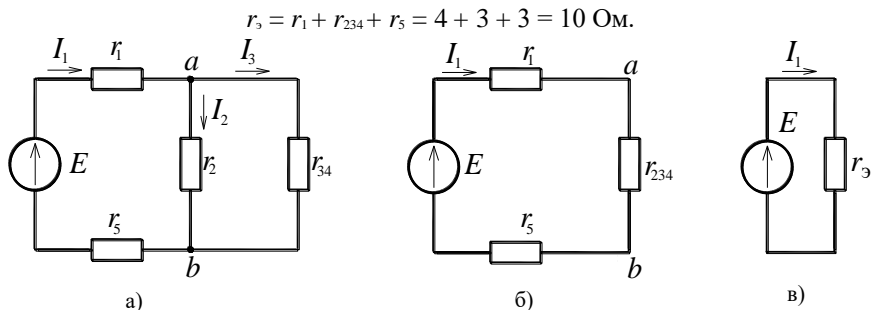


Рисунок 1.8 – Эквивалентные схемы заданной цепи

В соответствии с законом Ома

$$I_1 = E/r_3 = 100/10 = 10 \text{ А.}$$

Так как преобразования выполнялись эквивалентными, то ток I_1 будет одинаковым для всех цепей на рисунках 1.7 и 1.8.

Для определения токов I_2 и I_3 на участке после разветвления цепи необходимо найти напряжение U_{ab} между точками a и b , а затем, зная сопротивление ветвей, можно рассчитать токи в ветвях, включённых параллельно.

Междузловое напряжение U_{ab} находим из схемы, изображённой на рисунке 1.8, б. Здесь оно равно падению напряжения на резисторе r_{234} :

$$U_{ab} = I_1 r_{234} = 10 \cdot 3 = 30 \text{ В.}$$

Токи после разветвления, на основании закона Ома, находим из выражений:

$$I_2 = U_{ab}/r_2 = 30 / 6 = 5 \text{ А,} \quad I_3 = U_{ab} / r_{34} = 30 / 6 = 5 \text{ А.}$$

Если подходящий к узлу ток разветвляется только на две ветви (как в данном примере), то путь нахождения токов после разветвления по известному току до разветвления можно сократить, исключая этап нахождения напряжения U_{ab} . Для такого частного случая можно воспользоваться формулой разброса. Структура формулы разброса – ток одной из ветвей после разветвления равен току до разветвления, умноженному на дробь. В числителе этой дроби – сопротивление соседней по отношению к определяемому току параллельной ветви, а в знаменателе – сумма сопротивлений ветвей, включенных параллельно.

Для определения тока I_2 формула разброса имеет вид

$$I_2 = I_1 r_{34}/(r_2 + r_{34}) = 10 \cdot 6 / (6 + 6) = 5 \text{ А.}$$

Третий ток в соответствии с этой формулой

$$I_3 = I_1 r_2/(r_2 + r_{34}) = 10 \cdot 6 / (6 + 6) = 5 \text{ А.}$$

1.4 Расчет сложных цепей постоянного тока

В ходе расчёта сложной цепи необходимо определить некоторые электрические параметры (в первую очередь токи и напряжения на элементах) на основе исходных величин, заданных в условии задачи. На практике используются несколько методов расчёта таких цепей. Для определения токов ветвей можно использовать: метод, базирующийся на основании непосредственного применения законов Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых напряжений.

Для проверки правильности вычисления токов необходимо составить баланс мощностей. Из закона сохранения энергии следует, что алгебраическая сумма мощностей всех источников питания цепи равна арифметической сумме мощностей всех потребителей.

Мощность источника питания равна произведению его ЭДС на величину тока, протекающего через данный источник. Если направление ЭДС и тока в источнике совпадают, то мощность получается положительной. В противном случае она отрицательна.

Мощность потребителя всегда положительна и равна произведению квадрата тока в потребителе на величину его сопротивления (1.3).

Математически баланс мощностей можно записать в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 r_k, \quad (1.19)$$

где n – количество источников питания в цепи;

m – количество потребителей.

Если баланс мощностей соблюдается, то расчет токов выполнен правильно.

В процессе составления баланса мощностей можно выяснить, в каком режиме работает источник питания. Если его мощность положительна, то он отдает энергию во внешнюю цепь (например, как аккумулятор в режиме разряда). При отрицательном значении мощности источника последний потребляет энергию из цепи (аккумулятор в режиме заряда).

1.4.1 Методика расчета сложной цепи с помощью непосредственного применения законов Кирхгофа

1 Вычерчиваем принципиальную схему электрической цепи и обозначаем все её элементы.

2 Выявляем в данной цепи узлы, ветви и контуры.

3 Произвольно задаемся направлением тока в каждой ветви и обозначаем эти токи.

4 По первому закону Кирхгофа составляем узловые уравнения, число которых должно быть на единицу меньше количества всех узлов цепи. Для одного любого узла уравнение не составляется.

5 По второму закону Кирхгофа составляем уравнения, число которых равно разности между количеством неизвестных токов (числом ветвей) и количеством уравнений, составленных по первому закону. Для уравнений по второму закону Кирхгофа рекомендуется выбирать независимые контуры.

6 Решаем любым способом полученную систему относительно токов ветвей и определяем их.

Если в результате расчета некоторые токи имеют отрицательную величину, то это значит, что при произвольном выборе их направления допущена ошибка. Истинное направление отрицательных токов противоположно ранее принятому.

Пример 1.2. Расчёт сложной цепи с помощью законов Кирхгофа

В качестве примера рассмотрим расчет цепи, изображенной на рисунке 1.4, у которой $E_1 = 24$ В, $E_2 = 12$ В, $r_1 = r_2 = 4$ Ом, $r_3 = 1$ Ом, $r_4 = 3$ Ом.

Решение. При расчете с помощью непосредственного применения законов Кирхгофа по первому закону составляем одно уравнение, так как в цепи два узла. По второму закону составляем два уравнения, так как в схеме три неизвестных тока, а по первому закону было уже составлено одно уравнение. Таким образом, разница между числом неизвестных токов и числом уравнений по первому закону составляет два. Искомая система имеет вид:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0, \\ I_1 r_1 - I_2 r_2 = E_1 - E_2, \\ I_2 r_2 - I_3 (r_3 + r_4) = E_2, \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0, \\ I_1 4 - I_2 4 = 12, \\ I_2 4 - I_3 4 = 12. \end{cases}$$

После решения системы уравнений получаем: $I_1 = 3$ А, $I_2 = 0$ А, $I_3 = -3$ А.

Отрицательный знак у третьего тока указывает, что при произвольном выборе направления этого тока мы ошиблись, истинное направление его, противоположно ранее принятому.

Правильность расчёта токов определяем с помощью баланса мощностей. Для цепи на рисунке 1.4 имеем:

$$\begin{aligned} E_1 I_1 + E_2 I_2 &= I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 (r_3 + r_4), \\ 24 \cdot 3 + 12 \cdot 0 &= 3^2 \cdot 4 + 0^2 \cdot 4 + 3^2 (1 + 3), \\ 72 &= 72. \end{aligned}$$

Баланс мощностей соблюдается, значит, расчет выполнен правильно.

1.4.2 Методика расчета цепи методом контурных токов

В данном методе за неизвестные величины принимаются расчетные (контурные) токи, которые якобы протекают в каждом из независимых контуров. Таким образом, количество неизвестных токов и уравнений в

системе равно числу независимых контуров цепи. Расчет токов ветвей выполняют в следующем порядке:

1 Вычерчиваем принципиальную схему цепи и обозначаем все элементы.

2 Определяем все независимые контуры.

3 Произвольно задаемся направлением протекания контурных токов в каждом из независимых контуров (по часовой стрелке или против). Обозначаем эти токи. Для нумерации контурных токов можно использовать арабские сдвоенные цифры (I_{11}, I_{22}, I_{33} и т. д.) или римские цифры.

4 По второму закону Кирхгофа, относительно контурных токов, составляем уравнения для всех независимых контуров. При записи равенства считать, что направление обхода контура, для которого составляется уравнение, совпадает с направлением контурного тока данного контура. Следует учитывать и тот факт, что в смежных ветвях, принадлежащих двум контурам, протекают два контурных тока. Падение напряжения на потребителях в таких ветвях надо брать от каждого тока в отдельности.

5 Решаем любым методом полученную систему относительно контурных токов и определяем их.

6 Произвольно задаемся направлением реальных токов всех ветвей и обозначаем их. Маркировать реальные токи надо таким образом, чтобы не путать с контурными. Для нумерации реальных токов можно использовать одиночные арабские цифры (I_1, I_2, I_3 и т. д.).

7 Переходим от контурных токов к реальным, считая, что реальный ток ветви равен алгебраической сумме контурных токов, протекающих по данной ветви.

При алгебраическом суммировании без изменения знака берется контурный ток, направление которого совпадает с принятым направлением реального тока ветви. В противном случае контурный ток умножается на минус единицу.

Пример 1.3. Расчёт сложной цепи методом контурных токов

В цепи, изображённой на рисунке 1.4, рассчитать все токи методом контурных токов. Параметры цепи: $E_1 = 24$ В, $E_2 = 12$ В, $r_1 = r_2 = 4$ Ом, $r_3 = 1$ Ом, $r_4 = 3$ Ом.

Решение. Для расчета сложной цепи этим методом достаточно составить два уравнения, по числу независимых контуров. Контурные токи направляем по часовой стрелке и обозначаем I_{11} и I_{22} (см. рисунок 1.4).

По второму закону Кирхгофа относительно контурных токов составляем уравнения:

$$\begin{cases} I_{11}(r_1 + r_2) - I_{22}r_2 = E_1 - E_2, \\ -I_{11}r_2 + I_{22}(r_2 + r_3 + r_4) = E_2, \end{cases} \quad \begin{cases} I_{11}8 - I_{22}4 = 12, \\ -I_{11}4 + I_{22}8 = 12. \end{cases}$$

Решаем систему и получаем контурные токи $I_{11} = I_{22} = 3 \text{ А}$.

Произвольно задаемся направлением реальных токов всех ветвей и обозначаем их. На рисунке 1.4 такими токами являются I_1, I_2, I_3 . Направление у этих токов одинаковое – вертикально вверх.

Переходим от контурных токов к реальным. В первой ветви протекает только один контурный ток I_{11} . Направление его совпадает с направлением реального тока ветви. В таком случае реальный ток

$$I_1 = I_{11} = 3 \text{ А}.$$

Реальный ток второй ветви формируется двумя контурными I_{11} , и I_{22} . Ток I_{22} совпадает по направлению с реальным, а I_{11} направлен навстречу реальному. В результате

$$I_2 = I_{22} - I_{11} = 3 - 3 = 0 \text{ А}.$$

В третьей ветви протекает только контурный ток I_{22} . Направление этого тока противоположно направлению реального, поэтому для I_3 можно записать

$$I_3 = -I_{22} = -3 \text{ А}.$$

Результаты расчёта цепи методом контурных токов совпадают с результатами, полученными при определении токов с помощью законов Кирхгофа. Следует отметить, как положительный факт, что в методе контурных токов пришлось решать систему уравнений меньшего порядка. Однако этот метод не позволяет сразу определять реальные токи ветвей.

1.4.3 Метод межузлового напряжения

Метод межузлового напряжения даёт возможность весьма просто, без решения систем уравнений, провести анализ и расчёт электрической цепи, содержащей несколько параллельно соединённых активных и пассивных ветвей, включённых между двумя узлами, например, между a и c на рисунке 1.4.

Идея метода состоит в том, что по расчётной формуле (1.20) определяют напряжение между узлами, называемое межузловым напряжением (U_{ca} на рисунке 1.4), а затем по формуле (1.21) рассчитывают токи в ветвях.

Порядок расчёта:

1 Произвольно принимаем, что потенциал узла c больше потенциала узла a ($\varphi_c > \varphi_a$). Тогда напряжение U_{ca} , общее для всех ветвей схемы, будет направлено так, как показано на рисунке 1.4.

2 Условно задаемся направлением токов всех ветвей, например, от узла a к узлу c , и обозначаем эти токи.

3 Рассчитываем проводимости g_k всех ветвей цепи, считая их обратной величиной полного сопротивления r_k соответствующих ветвей.

4 Определяем межузловое напряжение из выражения

$$U_{ca} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}, \quad (1.20)$$

где n – число ветвей, заключенных между узлами;

E_k – ЭДС, находящаяся в ветви с номером k ;

g_k – проводимость ветви с номером k .

Если ЭДС в ветви направлена к узлу с большим потенциалом, обозначенному первым индексом (c), то произведение $E_k g_k$ записывается со знаком плюс, если от этого узла – со знаком минус. При отсутствии в ветви источника ЭДС соответствующее произведение $E_k g_k = 0$.

5 Определяем токи всех n ветвей с учётом предварительно принятого направления этих токов

$$I_{\hat{e}} = \frac{(E_{\hat{e}} - U_{\hat{n}\hat{a}})}{r_{\hat{e}}} = E_{\hat{e}} g_{\hat{e}} - U_{ca} g_{\hat{e}}. \quad (1.21)$$

Пример 1.4. Расчёт сложной цепи методом межузлового напряжения

Для цепи, изображённой на рисунке 1.4, рассчитать все токи методом межузлового напряжения.

Параметры цепи: $E_1 = 24$ В, $E_2 = 12$ В, $r_1 = r_2 = 4$ Ом, $r_3 = 1$ Ом, $r_4 = 3$ Ом.

Решение. Принимаем, что потенциал узла c больше, чем потенциал узла a ($\varphi_c > \varphi_a$). Условно направляем все три тока от узла a к узлу c и обозначаем эти токи I_1, I_2, I_3 .

Рассчитываем проводимости всех ветвей:

$$g_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{4} \text{ См}, \quad g_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{4} \text{ См},$$

$$g_3 = \frac{1}{r_3 + r_4} = \frac{1}{1 + 3} = \frac{1}{4} \text{ См}.$$

Для определения межузлового напряжения используем выражение (1.20)

$$U_{\hat{n}\hat{a}} = \frac{\sum_{\hat{e}=1}^n E_{\hat{e}} g_{\hat{e}}}{\sum_{\hat{e}=1}^n g_{\hat{e}}} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{24 \frac{1}{4} + 12 \frac{1}{4}}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}} = 12 \text{ В}.$$

Токи ветвей на основании формулы (1.21):

$$I_1 = E_1 g_1 - U_{ac} g_1 = 24 \frac{1}{4} - 12 \frac{1}{4} = 3 \text{ А},$$

$$I_2 = E_2 g_2 - U_{ac} g_2 = 12 \frac{1}{4} - 12 \frac{1}{4} = 0 \text{ А},$$

$$I_3 = -U_{ac} g_3 = -12 \frac{1}{4} = -3 \text{ А}.$$

1.5 Потенциальная диаграмма

Потенциальной диаграммой называется графическое изображение распределения электрического потенциала вдоль замкнутого контура в зависимости от сопротивления участков, входящих в выбранный контур.

Для построения потенциальной диаграммы выбирают замкнутый контур. Этот контур разбивают на участки таким образом, чтобы на участке находился один потребитель или источник энергии. Пограничные точки между участками необходимо обозначить буквами или цифрами.

Произвольно заземляют одну точку контура, её потенциал условно считается нулевым. Обходя контур по часовой стрелке от точки с нулевым потенциалом, определяют потенциал каждой последующей пограничной точки как алгебраической суммы потенциала предыдущей точки и изменения потенциала между этими соседними точками.

Изменение потенциала на участке зависит от состава цепи между точками. Если на участке включен потребитель энергии (резистор), то изменение потенциала численно равно падению напряжения на этом резисторе. Знак этого изменения определяют направлением тока. При совпадении направлений тока и обхода контура знак отрицательный, в противном случае он положительный. Если на участке находится источник ЭДС, то изменение потенциала здесь численно равно величине ЭДС данного источника. При совпадении направления обхода контура и направления ЭДС изменение потенциала положительно, в противном случае оно отрицательно.

После расчета потенциалов всех точек строят в прямоугольной системе координат потенциальную диаграмму. На оси абсцисс откладывают в масштабе сопротивление участков в той последовательности, в которой они встречались при обходе контура, а по оси ординат – потенциалы соответствующих точек. Потенциальная диаграмма начинается с нулевого потенциала и заканчивается после обхода контура таковым.

Пример 1.5. Построение потенциальной диаграммы электрической цепи

В данном примере потенциальную диаграмму строим для первого контура цепи, схема которой изображена на рисунке 1.4. В рассматриваемый контур входят два источника питания E_1 и E_2 , а также два потребителя энергии r_1 , r_2 . Разбиваем данный контур на участки,

границы которых обозначаем буквами a, b, c, d . Заземляем точку a , условно считая её потенциал нулевым, и обходим контур по часовой стрелке от этой точки. Таким образом, $\varphi_a = 0$. Следующей точкой на пути обхода контура будет точка b . На участке ab находится источник ЭДС E_1 . Так как на данном участке мы идем от отрицательного полюса источника к положительному, то потенциал повышается на величину E_1 ,

$$\varphi_b = \varphi_a + E_1 = 0 + 24 = 24 \text{ В.}$$

При переходе от точки b к точке c происходит уменьшение потенциала на величину падения напряжения на резисторе r_1 (направление обхода контура совпадает с направлением тока в резисторе r_1),

$$\varphi_c = \varphi_b - I_1 r_1 = 24 - 3 \cdot 4 = 12 \text{ В.}$$

При переходе к точке d потенциал возрастает на величину падения напряжения на резисторе r_2 (на этом участке направление тока встречно направлению обхода контура),

$$\varphi_d = \varphi_c + I_2 r_2 = 12 + 0 \cdot 4 = 12 \text{ В.}$$

Потенциал точки a меньше потенциала точки d на величину ЭДС источника E_2 (направление ЭДС встречно направлению обхода контура),

$$\varphi_a = \varphi_d - E_2 = 12 - 12 = 0 \text{ В.}$$

Результаты расчета используют для построения потенциальной диаграммы. На оси абсцисс откладывают сопротивление участков в той последовательности, как они встречаются при обходе контура от точки с нулевым потенциалом. Вдоль оси ординат откладывают рассчитанные ранее потенциалы соответствующих точек (рисунок 1.9).

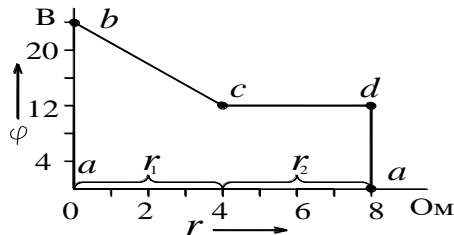


Рисунок 1.9 – Потенциальная диаграмма контура

Контрольные вопросы

- 1 Что является в электрической цепи ветвью, узлом, контуром?
- 2 Закон Ома и его разновидности. Применение этого закона на практике.
- 3 Законы Кирхгофа и применение их на практике.
- 4 Составление уравнений по первому закону Кирхгофа.
- 5 Составление уравнений по второму закону Кирхгофа.

6 От чего зависит количество энергии, выделяемой в проводнике, при протекании по нему тока?

7 Что такое электрическая цепь?

8 Из каких устройств состоит электрическая цепь?

9 Формулировка и математическая запись закона электромагнитной индукции.

10 Мощность электрического тока.

11 Падение напряжения на участке цепи.

12 Чем неразветвленная электрическая цепь отличается от разветвленной?

13 Чем простая цепь отличается от сложной?

14 Единицы измерения электрической мощности, проводимости цепи.

15 Последовательное соединение элементов цепи.

16 Эквивалентное сопротивление цепи при последовательном соединении элементов.

17 Параллельное соединение элементов цепи.

18 Эквивалентное сопротивление цепи при параллельном соединении элементов.

19 Как распределяются ток и напряжение при последовательном соединении приемников электрической энергии?

20 Как распределяются ток и напряжение при параллельном соединении приемников энергии?

21 Смешанное соединение элементов цепи.

22 Эквивалентные преобразования в цепи.

23 Расчёт цепи при последовательном соединении элементов.

24 Определение токов приемников при их параллельном соединении.

25 Определение токов и напряжений в цепи при смешанном соединении элементов.

26 Сколько и каких уравнений составляется при расчете электрических цепей путем непосредственного применения законов Кирхгофа?

27 Расчёт электрической цепи методом контурных токов.

28 Как осуществляется переход от контурных токов к реальным?

29 Расчёт сложной электрической цепи методом межузлового напряжения.

30 Что такое баланс мощностей и для чего он применяется?

31 Потенциальная диаграмма цепи.

32 Методика построения потенциальной диаграммы.

2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1 Основные понятия об однофазном переменном токе

В принципе, любой ток, изменяющийся по величине, является переменным. Но на практике под переменным током понимают такой ток, закон изменения которого во времени есть синусоидальная функция. Математическое выражение для синусоидального тока можно записать в виде

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

где i – мгновенное значение тока, показывающее величину тока в конкретный момент времени;

I_m – амплитудное (максимальное) значение тока; выражение в скобках есть фаза, которая определяет значение тока в момент времени t ;

f – частота переменного тока, это величина, обратная периоду изменения синусоидальной величины T , $f = \frac{1}{T}$;

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$;

α – начальная фаза, показывает значение фазы в момент времени $t = 0$.

Аналогичное выражение можно записать и для синусоидального переменного напряжения:

$$u = U_m \sin(2\pi f t + \gamma) = U_m \sin(\omega t + \gamma). \quad (2.2)$$

Мгновенные значения тока и напряжения условились обозначать строчными латинскими буквами i , u , а максимальные (амплитудные) значения – прописными печатными латинскими буквами I , U с индексом m .

Для измерения величины переменного тока чаще всего используют действующее (эффективное) значение, которое численно равно такому постоянному току, который за период переменного выделяет в нагрузку такое же количество тепла, что и переменный ток. Действующее значение переменного тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (2.3)$$

Для обозначения действующих значений тока и напряжения используют прописные печатные латинские буквы I , U без индекса.

В цепях синусоидального тока между амплитудным и действующим значениями существует взаимосвязь:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.4)$$

Цепи переменного тока могут обладать активным сопротивлением r , индуктивностью L и емкостью C . Активное сопротивление обуславливается химическими и физическими свойствами проводника, а индуктивность и емкость зависят как от геометрии токоведущего элемента, так и от состояния электромагнитной среды вокруг него.

Индуктивность есть коэффициент пропорциональности между потоко-сцеплением и током:

$$\psi = Li, \quad (2.5)$$

где ψ – потокосцепление, равное произведению магнитного потока на число витков, с которыми он сцеплен.

Емкость C есть коэффициент пропорциональности между величиной заряда и напряжением:

$$q = Cu, \quad (2.6)$$

где q – электрический заряд;

u – напряжение.

Индуктивное сопротивление цепи переменного тока, содержащей элемент L ,

$$x_L = 2\pi fL = \omega L. \quad (2.7)$$

Емкостное сопротивление цепи переменного тока, содержащей элемент C ,

$$x_c = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (2.8)$$

Полное сопротивление цепи переменного тока при последовательном соединении r , L и C

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_c)^2}. \quad (2.9)$$

Единицей измерения всех этих сопротивлений служит ом (Ом).

Индуктивное и емкостное сопротивления считаются реактивными. Это значит, что в них, в отличие от активных, не происходит превращение электрической энергии в другие виды энергии. Наличие тока в реактивном элементе объясняется периодическим обменом энергией между таким элементом и сетью.

Произведение мгновенных значений тока и напряжения есть мгновенная

мощность цепи переменного тока и в общем случае, при синусоидальных токах и напряжениях, она определяется выражением

$$p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi), \quad (2.10)$$

где φ – угол сдвига фаз между напряжением и током потребителя.

Формула для мгновенной мощности состоит из двух составляющих: постоянной, не зависящей от времени $UI \cos \varphi$, и переменной, изменяющейся во времени с двойной частотой $UI \cos(2\omega t - \varphi)$.

Количество электрической энергии, превращающейся в потребителе в другой вид энергии, зависит от средней мощности P за период переменного тока, которая называется активной мощностью, измеряется в ваттах (Вт) и может быть определена из выражения

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi = I^2 r. \quad (2.11)$$

Сравнивая выражения (2.10) и (2.11), можно отметить, что постоянная составляющая мгновенной мощности равна активной мощности цепи. Измеряется активная мощность с помощью ваттметров.

Для характеристики скорости обмена энергией между реактивными элементами и сетью используется понятие реактивной мощности, под которой подразумевается амплитудное значение мгновенной мощности на этих элементах. Для определения реактивной мощности можно использовать следующие выражения:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 (x_L - x_C) = U^2 / (x_L - x_C), \quad (2.12)$$

где U, I – действующие значения напряжения и тока на участке цепи, для которого рассчитывается реактивная мощность;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током на данном участке;

x_L, x_C – индуктивное и емкостное сопротивления рассматриваемого участка.

Единицей измерения реактивной мощности служит вольт-ампер реактивный (вар), а измеряется эта мощность варметрами.

Полная мощность цепи переменного тока

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI. \quad (2.13)$$

Единицей измерения полной мощности служит вольт-ампер (ВА).

Некоторые цепи, несмотря на наличие реактивных элементов, ведут себя по отношению к источнику питания как чисто активное сопротивление. Такое явление в цепи переменного тока называется резонансом. При резонансе напряжение и ток, потребляемый такой цепью, совпадают по фазе, а реактивная мощность всей цепи равна нулю. Основными видами резонанса являются резонанс напряжений при последовательном и резонанс

токов при параллельном соединении элементов с индуктивностью и емкостью.

При последовательном соединении катушки индуктивности с индуктивным сопротивлением x_L и конденсатора с емкостным сопротивлением x_C резонанс напряжений возникает при равенстве между собой индуктивного и емкостного сопротивлений, $x_L = x_C$. Поэтому при данном резонансе полное сопротивление последовательной цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r, \quad (2.14)$$

где r – активное сопротивление в рассматриваемой ветви, например, сопротивление провода, из которого намотана катушка индуктивности.

Анализируя выражение (2.14), можно отметить, что полное сопротивление последовательной цепи при резонансе достигает минимального значения, а ток максимален. С увеличением тока повышается напряжение на элементах цепи и при резонансе оно достигает максимума. Особенностью рассматриваемого резонанса является возможность появления перенапряжений на реактивных элементах цепи, когда напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе во много раз превышают напряжение источника питания. Такой случай возможен при $x_L = x_C \gg r$.

При параллельном соединении двух и более ветвей с различным типом реактивного сопротивления может возникать резонанс токов. Условием этого резонанса является равенство индуктивной и емкостной проводимостей ветвей, включённых параллельно, $b_L = b_C$.

Для двух ветвей, включённых параллельно, полная проводимость

$$y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (2.15)$$

где g_1, g_2 – активные проводимости ветвей, включённых параллельно;

b_L – реактивная проводимость ветви с индуктивным характером реактивности;

b_C – реактивная проводимость ветви с емкостным характером реактивности.

Реактивная проводимость первой ветви, в которой эквивалентная реактивность носит индуктивный характер,

$$b_L = x_L / (x_L^2 + r_1^2), \quad (2.16)$$

где x_L – эквивалентное реактивное сопротивление рассматриваемой ветви;

r_1 – эквивалентное активное сопротивление данной ветви.

Реактивная проводимость второй ветви, в которой эквивалентная реактивность носит емкостной характер,

$$b_C = x_C / (x_C^2 + r_2^2), \quad (2.17)$$

где x_c – эквивалентное реактивное сопротивление рассматриваемой ветви;
 r_2 – эквивалентное активное сопротивление данной ветви.

Активные проводимости ветвей:

$$g_1 = r_1 / (x_L^2 + r_1^2), \quad (2.18)$$

$$g_2 = r_2 / (x_C^2 + r_2^2). \quad (2.19)$$

В приведённых выше выражениях под эквивалентным реактивным сопротивлением ветви подразумевается разность между индуктивным сопротивлением катушки и емкостным сопротивлением конденсатора, которые включены последовательно в рассматриваемой ветви. Если в ветви индуктивное сопротивление больше емкостного, то её эквивалентное реактивное сопротивление носит индуктивный характер, в противном случае характер эквивалентного реактивного сопротивления меняется на емкостный.

Эквивалентное активное сопротивление ветви равно сумме активных сопротивлений элементов, включённых в неё последовательно.

Для ветвей, в которых включён только один элемент, эквивалентное сопротивление равно соответствующему сопротивлению данного элемента (активному или реактивному).

При резонансе токов полная проводимость цепи равна её активной проводимости, $y = g_1 + g_2 = g$.

Из выражения (2.15) следует, что при резонансе токов полная проводимость разветвлённой цепи минимальна и равна активной проводимости. По этой причине ток, подходящий к участку, на котором возник резонанс токов, становится минимальным. В это же время токи в параллельных ветвях могут достигать больших значений и во много раз превышать ток, подходящий к разветвлённому участку. Возникает такой режим, когда $b_L = b_C \gg g$.

2.2 Расчёт цепей переменного тока

В цепях переменного тока изменение во времени питающего напряжения влечёт за собой изменение тока, а также магнитного и электрического полей, связанных с цепью. Результатом этих изменений является возникновение ЭДС самоиндукции и взаимной индукции в цепях с катушками индуктивности, а в цепях с конденсаторами появляются зарядные и разрядные токи, которые создают сдвиг по фазе между напряжениями и токами в таких цепях. Отмеченные физические процессы учитывают введением реактивных сопротивлений, что усложняет расчёт

цепей переменного тока, так как приходится определять не только величину тока, но и его угол сдвига по отношению к напряжению.

Все основные законы цепей постоянного тока справедливы и для цепей переменного тока, но только для мгновенных значений или значений в векторной (комплексной) форме. На основе этих законов можно составить уравнения, позволяющие осуществить расчёт цепи. Как правило, целью расчёта цепи переменного тока является определение токов, напряжений, углов сдвига фаз и мощностей на отдельных участках. При составлении уравнений для расчёта таких цепей выбирают условные положительные направления ЭДС, напряжений и токов. Получаемые уравнения для мгновенных значений в установившемся режиме и синусоидальном входном напряжении будут содержать синусоидальные функции времени. Аналитический расчёт тригонометрических уравнений неудобен, требует значительных затрат времени и поэтому не находит широкого распространения в электротехнике. Упростить анализ цепи переменного тока можно, используя тот факт, что синусоидальную функцию можно условно изобразить вектором, а вектор, в свою очередь, можно записать в виде комплексного числа. Метод расчёта цепи, основанный на применении комплексных чисел, называется символическим методом. Завершают расчёт цепи переменного тока, как правило, составлением баланса активных и реактивных мощностей, который позволяет проверить правильность вычислений.

2.2.1 Применение комплексных чисел для расчета цепей переменного тока

На практике при расчете цепей переменного тока широко применяют символический метод расчета, базирующийся на использовании комплексных чисел.

Комплексным числом \underline{A} называют выражение вида

$$\underline{A} = a + jb = Ae^{j\alpha} = A\cos\alpha + jA\sin\alpha, \quad (2.20)$$

- где a – вещественная (действительная) часть комплексного числа;
 j – мнимая единица;
 b – мнимая часть;
 A – модуль;
 α – аргумент;
 e – основание натурального логарифма.

Первое выражение представляет собой алгебраическую форму записи комплексного числа, второе – показательную, а третье – тригонометрическую.

Для отличия, в комплексной форме записи подчеркивают букву, обозначающую электрический параметр. В учебниках более раннего издания ставится точка над комплексным параметром (\underline{A}, \dot{A}).

Модуль комплексного числа

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (2.21)$$

аргумент этого числа

$$\alpha = \arctg \frac{b}{a} = \arccos \frac{a}{A} = \arcsin \frac{b}{A}, \quad (2.22)$$

вещественная часть

$$a = A \cos \alpha, \quad (2.23)$$

мнимая часть

$$b = A \sin \alpha. \quad (2.24)$$

Сопряженным комплексным числом называется такое число, которое отличается от исходного противоположным знаком перед мнимой частью. Например, исходное комплексное число $\underline{A} = 5 + j5$, тогда сопряженное ему число $\underline{A}^* = 5 - j5$. Звёздочка над буквенным обозначением комплексного числа указывает на сопряжённый характер выражения.

В символическом методе расчета все реальные параметры электрической цепи заменяют символами в комплексной форме записи. После такого преобразования становится возможным применять для расчета цепей переменного тока известные методы расчета цепей постоянного тока.

Источник синусоидального напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ заменяют выражением вида

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\alpha}.$$

Полное сопротивление участка цепи, содержащего последовательно включенные активное r , индуктивное x_L и емкостное x_C сопротивления, в комплексной форме записи имеет вид:

$$\underline{z} = r + j(x_L - x_C). \quad (2.25)$$

Полная проводимость участка цепи с последовательным соединением r , L , C :

$$\underline{y} = 1/\underline{z} = g - jb_L, \text{ если } x_L > x_C \text{ или } \underline{y} = 1/\underline{z} = g + jb_C \text{ при } x_L < x_C. \quad (2.26)$$

Если на конкретном участке какой-либо элемент или сразу два отсутствуют, то в выражениях для полного сопротивления и проводимости соответствующие величины равны нулю.

После замены реальных параметров цепи на их комплексные символы дальнейший расчет выполняют методами, которые применяли для расчета

цепей постоянного тока. Отличие состоит в том, что все математические операции необходимо выполнять с комплексными числами.

Складывать эти числа необходимо в алгебраической форме записи. При этом отдельно складывают алгебраически вещественные части и получают вещественную часть результата, а затем аналогично складывают мнимые части слагаемых и получают мнимую часть результата.

Умножать, делить и возводить в степень удобнее в показательной форме. Для умножения двух комплексных чисел необходимо перемножить их модули и получить модуль результата, а затем алгебраически сложить аргументы перемножаемых комплексных чисел и получить аргумент результата.

При делении модуль делимого комплексного числа делится на модуль делителя и получается модуль результата. Далее от аргумента делимого вычитается аргумент делителя и получается аргумент результата в показательной форме записи.

Для возведения в степень комплексного числа необходимо возвысить в эту степень модуль и получить модуль результата. Аргумент результата получается как произведение показателя степени на аргумент исходного числа.

Например: даны два комплексных числа $\underline{A} = 8 + j6 = 10e^{j36,8^\circ}$ и $\underline{B} = j2 = 2e^{j90^\circ}$.

Сумма этих чисел

$$\underline{C} = \underline{A} + \underline{B} = 8 + j6 + j2 = 8 + j8 = 11,31e^{j45^\circ}.$$

Произведение двух комплексных чисел

$$\underline{D} = \underline{A}\underline{B} = 10e^{j36,8^\circ} \cdot 2e^{j90^\circ} = 20e^{j126,8^\circ}.$$

Частное от деления этих чисел

$$\underline{E} = \underline{A}/\underline{B} = 10e^{j36,8^\circ} / 2e^{j90^\circ} = 5e^{-j53,2^\circ}.$$

Квадрат комплексного числа

$$\underline{F} = \underline{A}^2 = \left(10e^{j36,8^\circ}\right)^2 = 100e^{j73,6^\circ}.$$

Для выполнения рассмотренных выше действий удобно использовать калькуляторы, способные выполнять операции с комплексными числами.

В результате расчета электрической цепи искомые токи и напряжения получаются в виде комплексных чисел. Реальные действующие значения тока или напряжения равны модулю соответствующего комплекса, а аргумент комплексного числа показывает угол поворота вектора на комплексной плоскости по отношению к положительному направлению вещественной оси. При положительном аргументе вектор поворачивается против часовой стрелки, а в случае отрицательного аргумента – по часовой.

Если необходимо от комплексного выражения тока или напряжения перейти к мгновенному значению, то умножаем соответствующий модуль показательной формы записи на $\sqrt{2}$ и получаем амплитудное значение синусоидальной величины, а аргумент является начальной фазой. Так, если $\underline{I} = 5e^{j45^\circ}$, то мгновенное значение тока $i = 5\sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ)$.

Для определения полной мощности на участке или во всей цепи используется выражение вида

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ, \quad (2.27)$$

- где \underline{S} – комплекс полной мощности;
 \underline{U} – комплекс напряжения на данном участке;
 \underline{I}^* – сопряженный комплекс тока;
 P – активная мощность;
 Q – реактивная мощность.

Комплексные токи и напряжения можно изображать в виде векторов на комплексной плоскости, у которой ось ординат является мнимой, а ось абсцисс – вещественной. Для построения вектора комплексного числа в

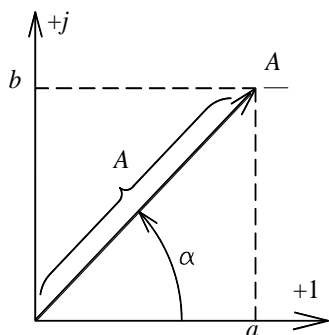


Рисунок 2.1 – Изображение вектора на комплексной плоскости

показательной форме $\underline{A} = Ae^{j\alpha}$ достаточно из начала координат под углом α (аргумент) к вещественной оси построить отрезок, в масштабе соответствующий модулю этого числа A . Если комплексное число задано в алгебраической форме, то начинается вектор из начала координат. Заканчивается он в точке, ордината которой соответствует мнимой части b , а абсцисса – вещественной части a изображаемого комплексного числа. На рисунке 2.1 показан пример изображения на комплексной плоскости в виде вектора комплексного числа $\underline{A} = Ae^{j\alpha} = a + jb$.

Пример 2.1. Расчёт разветвлённой цепи переменного тока

Разветвлённая цепь переменного тока, изображённая на рисунке 2.2, имеет напряжение питания $U = 100$ В, начальную фазу напряжения $\alpha = 30^\circ$, в первой ветви активное сопротивление $r_1 = 3$ Ом, индуктивное $x_{L1} = 10$ Ом, ёмкостное $x_{C1} = 6$ Ом, во второй ветви активное сопротивление $r_2 = 10$ Ом, а в третьей индуктивное $x_{L3} = 10$ Ом.

Требуется определить токи ветвей, показания всех приборов, составить баланс мощностей. Рассчитать параметры реактивного элемента, который надо включить в неразветвлённую часть цепи (последовательно с элементами r_1, x_{L1}, x_{C1}), чтобы в цепи возник резонанс напряжений.

Построить векторную диаграмму.

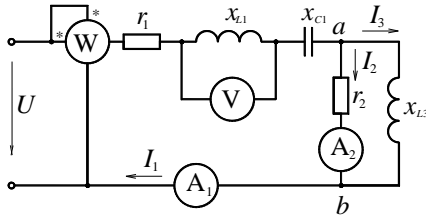


Рисунок 2.2 – Схема разветвлённой цепи переменного тока

Решение. Задачу начинаем решать с преобразования реальных параметров цепи в их символьные изображения в комплексной форме. Первым преобразуем источник питания. В примере задано действующее значение его напряжения и начальная фаза, что позволяет записать, в соответствии с выражениями (2.2) и (2.4), мгновенное значение этого напряжения в виде

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha) = 100\sqrt{2}(\omega t + 30^\circ) \text{ В.}$$

Угловая частота ω в записанном выражении для мгновенного значения напряжения определяется в зависимости от заданной частоты источника переменного тока в соответствии с формулой (2.1) и для промышленной сети

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ 1/с.}$$

Изображение напряжения на входе цепи в комплексной форме записи

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} = \frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 100 e^{j30^\circ} \text{ В.}$$

Полное сопротивление первого участка в комплексной форме

$$\underline{z}_1 = r_1 + j(x_{L1} - x_{C1}) = 3 + j(10 - 6) = 3 + j4 \text{ Ом.}$$

Если перевести изображение этого сопротивления в показательную форму по рассмотренным формулам перехода (2.21)–(2.24), то

$$\underline{z}_1 = 5e^{j53,1^\circ} \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление второй ветви

$$\underline{z}_2 = r_2 = 10 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление третьей ветви

$$\underline{z}_3 = jx_{L3} = j10 = 10e^{j90^\circ} \text{ Ом.}$$

Преобразованная цепь изображена на рисунке 2.3.

В преобразованной схеме, чтобы не загромождать рисунок, исключены измерительные приборы, которые на расчёт токов и напряжений не влияют.

По аналогии с цепью постоянного тока осуществляем эквивалентные преобразования для цепи на рисунке 2.3.

Параллельно соединенные элементы z_2 и z_3 заменяем одним эквивалентным

$$z_{23} = \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3} = \frac{10 \cdot 10e^{j90^\circ}}{10 + j10} = 5\sqrt{2}e^{j45^\circ} = 5 + j5 \text{ Ом.}$$

После преобразования схема упрощается и состоит из двух элементов, включенных последовательно, как это показано на рисунке 2.4.

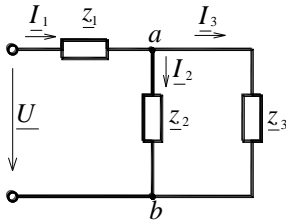


Рисунок 2.3 – Эквивалентная схема разветвлённой цепи переменного тока

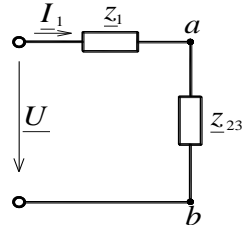


Рисунок 2.4 – Упрощённая схема цепи после преобразований

Ток в этой цепи можно определить следующим образом:

$$I_1 = \frac{U}{z_1 + z_{23}} = \frac{100e^{j30^\circ}}{3 + j4 + 5 + j5} = \frac{100e^{j30^\circ}}{12,04e^{j48,36^\circ}} = 8,3e^{-j18,36^\circ} \text{ А.}$$

Далее определяем падение напряжения на разветвленном участке:

$$U_{ab} = I_1 z_{23} = 8,3e^{-j18,36^\circ} \cdot 5\sqrt{2}e^{j45^\circ} = 58,68e^{j26,64^\circ} \text{ В.}$$

Токи в ветвях после разветвления:

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{z_2} = \frac{58,68e^{j26,64^\circ}}{10} = 5,86e^{j26,64^\circ} \text{ А,}$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{z_3} = \frac{58,68e^{j26,64^\circ}}{10e^{j90^\circ}} = 5,86e^{-j63,36^\circ} \text{ А.}$$

Если разветвленный участок имеет только две ветви, включенные параллельно, то токи в ветвях после разветвления можно определять без расчета U_{ab} , используя формулу разброса. Эта формула использовалась в примере 1.1 для расчёта цепи постоянного тока. В соответствии с этой формулой

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \frac{\underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3} = 8,3e^{-j18,36^\circ} \frac{10e^{j90^\circ}}{10+10j} = 5,86e^{j26,64^\circ} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 \frac{\underline{z}_2}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3} = 8,3e^{-j18,36^\circ} \frac{10}{10+10j} = 5,86e^{-j63,36^\circ} \text{ А.}$$

Модули показательной формы выражений для токов есть действующие значения реальных токов ветвей, которые фиксируют приборами электромагнитной системы. Следовательно, амперметр в первой ветви покажет 8,3 А, а во второй ветви – 5,86 А.

Вольтметр, включенный параллельно катушке, покажет падение напряжения на ней. Так как падение напряжения на участке есть произведение тока участка на значение его сопротивления, то получаем:

$$\underline{U}_V = \underline{I}_1 \underline{z}_V,$$

где \underline{z}_V – полное сопротивление участка, на котором определяется падение напряжения.

Так как в примере находится падение напряжения на катушке индуктивности с сопротивлением x_{L1} , то на основании выражения (2.25) полное сопротивление участка

$$\underline{z}_V = jx_{L1} = j10 = 10e^{j90^\circ} \text{ Ом.}$$

Падение напряжения на катушке

$$\underline{U}_V = 8,3e^{-j18,36^\circ} \cdot 10e^{j90^\circ} = 83e^{j71,64^\circ} \text{ В.}$$

Показание вольтметра есть модуль выражения \underline{U}_V , т. е. $U_V = 83 \text{ В}$.

Ваттметр, включенный на входе цепи, показывает активную мощность, потребляемую всей схемой. Эта мощность будет действительной частью выражения комплекса полной мощности \underline{S} на входе, которое имеет вид

$$\underline{S} = \underline{U}^* \underline{I}_1 = 100e^{j30^\circ} \cdot 8,3e^{j18,36^\circ} = 830e^{j48,36^\circ} = 551 + j620 \text{ ВА.}$$

Активная мощность $P = 551 \text{ Вт}$, реактивная мощность $Q = 620 \text{ вар}$.

Для проверки результатов расчета необходимо составить баланс активных и реактивных мощностей. Эти балансы показывают, что активные и реактивные мощности на входе должны быть равны сумме соответственно активных и реактивных мощностей всех потребителей.

Активная мощность на входе определена, а активные мощности отдельных потребителей рассчитывают как произведение активного сопротивления участка на квадрат действующего значения тока этого участка. В рассматриваемой схеме только два активных потребителя r_1 и r_2 . Суммарная мощность этих потребителей

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = 8,3^2 \cdot 3 + 5,86^2 \cdot 10 = 550 \text{ Вт.}$$

Разница в мощностях получилась в 1 Вт, что составляет несколько десятых долей процента. Ошибка менее одного процента допускается. Она возникает из-за округления числовых данных при расчете.

Реактивную мощность потребителей определяют как произведение квадрата тока реактивного элемента на его сопротивление. Причем мощность катушки индуктивности положительна, а конденсатора отрицательна.

Суммарная реактивная мощность всех потребителей

$$Q_{i\infty} = I_1^2 x_{L1} - I_2^2 x_{C1} + I_3^2 x_{L3} = 8,3^2 \cdot 10 - 8,3^2 \cdot 6 + 5,86^2 \cdot 10 = 619 \text{ вад}.$$

Разница в реактивных мощностях также составляет одну единицу, ошибка меньше одного процента. Таким образом, баланс активных и реактивных мощностей соблюдается. Токи определены правильно.

Для возникновения в цепи резонанса напряжений необходимо, чтобы полное сопротивление всей цепи было активным. Полное сопротивление

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_{23} = 3 + j4 + 5 + j5 = 8 + j9 \text{ Ом}.$$

Из выражения для полного сопротивления видно, что эквивалентное реактивное сопротивление исходной цепи равно +9 Ом. Знак плюс указывает на индуктивный характер эквивалентной реактивности. Устранить эту реактивность можно включением в первую ветвь конденсатора с емкостным сопротивлением -9 Ом (минус подчёркивает емкостный характер реактивности). После такого включения реактивные сопротивления взаимно компенсируются, а полное сопротивление становится активным и равно 8 Ом. В цепи наступает резонанс напряжений.

На рисунке 2.5 приведена векторная диаграмма, на которой относительно осей координат комплексной плоскости +j и +1 в масштабе

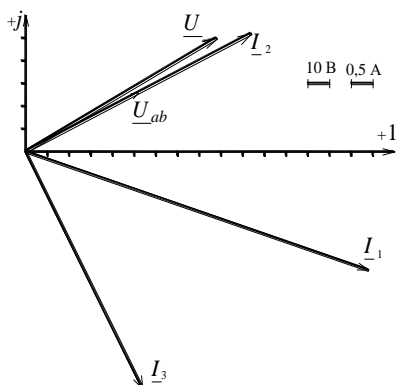


Рисунок 2.5 – Векторная диаграмма разветвлённой цепи переменного тока

построены векторы напряжений и токов. Вектор строится под углом к вещественной оси комплексной плоскости +1. Значение этого угла равно аргументу показательной формы комплексного выражения. При положительном значении аргумента угол откладывается от вещественной оси против часовой стрелки, а при отрицательном – по часовой.

Длина вектора должна в масштабе соответствовать модулю показательной формы комплексного выражения. Например, вектор входного напряжения ($\underline{U} = 100 e^{j30^\circ}$) должен иметь длину в десять масштабных

отрезков ($U = 100$ В, в масштабном отрезке – 10 В). Угол между этим вектором и вещественной осью равен 30 градусам и откладывается против часовой стрелки. Аналогично строятся и другие векторы.

2.3 Особенности трехфазных цепей

Трехфазная цепь переменного тока состоит из трехфазного источника питания, трехфазного потребителя и проводников линии связи между ними.

Симметричный трехфазный источник питания можно представить в виде трех однофазных источников, работающих на одной частоте с одинаковым напряжением и имеющих временной угол сдвига фаз 120° . Эти источники могут соединяться звездой или треугольником. При соединении звездой условные начала фаз используют для подключения трех линейных проводников A, B, C , а концы фаз объединяют в одну точку, называемую нейтральной точкой источника питания (трехфазного генератора или трансформатора). К этой точке может подключаться нейтральный провод N . Схема соединения фаз источника питания звездой приведена на рисунке 2.6, а.

Напряжение между линейным и нейтральным проводами называется фазным, а между линейными проводами – линейным.

В комплексной форме записи выражения для фазных напряжений имеют вид:

$$\underline{U}_A = U_\phi \text{ В}, \quad \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ} \text{ В}, \quad \underline{U}_C = U_\phi e^{-j240^\circ} \text{ В}. \quad (2.28)$$

Соответствующие им линейные напряжения при соединении звездой:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_\phi e^{j30^\circ} \text{ В}, & \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_\phi e^{-j90^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_\phi e^{j150^\circ} \text{ В}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Здесь U_ϕ – модуль фазного напряжения источника питания, а U_Δ – модуль линейного напряжения. В симметричной трёхфазной системе, при соединении фаз источника звездой, между этими напряжениями есть взаимосвязь:

$$U_\Delta = \sqrt{3} U_\phi. \quad (2.30)$$

При включении фаз треугольником фазные источники питания соединяют последовательно в замкнутый контур (рисунок 2.6, б).

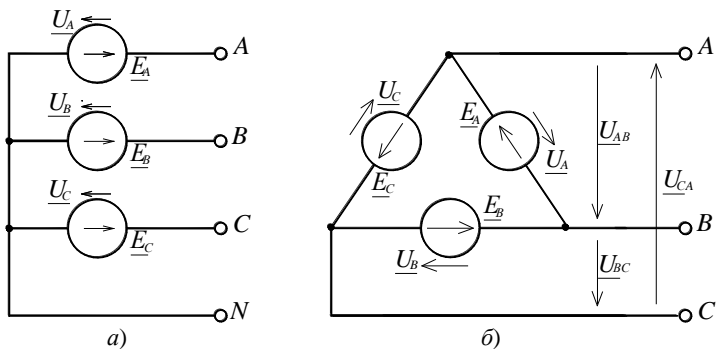


Рисунок 2.6 – Схемы соединения фаз источника питания:
a – звездой; *б* – треугольником

Из точек объединения источников между собой выводятся три линейных провода *A*, *B*, *C*, идущие к нагрузке. Из рисунка 2.6, *б* видно, что выводы фазных источников подключены к линейным проводникам, а следовательно, при соединении фаз источника треугольником фазные напряжения равны линейным. Нейтральный провод в этом случае отсутствует.

К трёхфазному источнику может подключаться нагрузка. По величине и характеру трёхфазная нагрузка бывает симметричной и несимметричной. В случае симметричной нагрузки комплексные сопротивления всех трёх фаз одинаковы, а если эти сопротивления различны, то нагрузка несимметричная. Фазы нагрузки могут соединяться между собой звездой или треугольником (рисунок 2.7), независимо от схемы соединения источника.

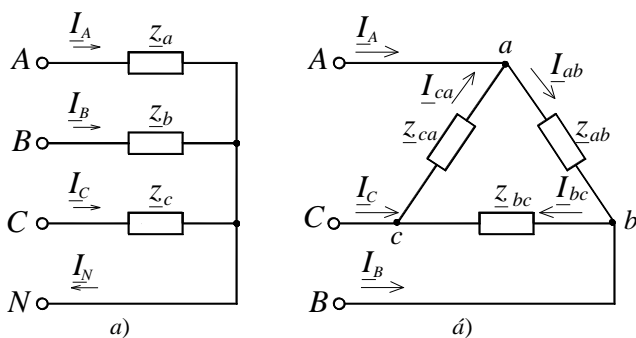


Рисунок 2.7 – Схемы соединения фаз нагрузки

Соединение звездой может быть с нейтральным проводом (см. рисунок 2.7, *a*) и без него. Отсутствие нейтрального провода устраняет жёсткую

привязку напряжения на нагрузке к напряжению источника питания, и в случае несимметричной нагрузки по фазам эти напряжения не равны между собой. Чтобы их отличить, условились в индексах буквенных обозначений напряжений и токов источника питания применять прописные буквы, а в параметрах, присущих нагрузке, – строчные.

2.3.1 Расчёт трёхфазных цепей

Алгоритм анализа трёхфазной цепи зависит от схемы соединения нагрузки, исходных параметров и цели расчёта.

Для определения фазных напряжений при несимметричной нагрузке, соединённой звездой без нейтрального провода, используют метод двух узлов. В соответствии с этим методом расчёт начинают с определения напряжения \underline{U}_N между нейтральными точками источника питания и нагрузки, называемого напряжением смещения нейтрали:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A y_a + \underline{U}_B y_b + \underline{U}_C y_c}{y_a + y_b + y_c}, \quad (2.31)$$

где y_a , y_b , y_c – полные проводимости соответствующих фаз нагрузки в комплексной форме,

$$\underline{y}_a = 1/\underline{z}_a, \quad \underline{y}_b = 1/\underline{z}_b, \quad \underline{y}_c = 1/\underline{z}_c.$$

Напряжения на фазах несимметричной нагрузки находят из выражений:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N. \quad (2.32)$$

В частном случае несимметрии нагрузки, когда при отсутствии нейтрального провода происходит короткое замыкание одной из фаз нагрузки, напряжение смещения нейтрали равно фазному напряжению источника питания той фазы, в которой произошло короткое замыкание. Тогда, на основании выражений (2.32), напряжение на замкнутой фазе нагрузки равно нулю, а на двух других оно численно равно линейному напряжению. Например, пусть произошло короткое замыкание в фазе B . Напряжение смещения нейтрали для этого случая $\underline{U}_N = \underline{U}_B$. В соответствии с формулами (2.32) фазные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_B = \underline{U}_{AB}, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_B = 0, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_B = \underline{U}_{CB} = -\underline{U}_{BC}.$$

Фазные токи в нагрузке, они же и токи линейных проводов при любом характере нагрузки:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a y_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b y_b = \underline{U}_b / \underline{z}_b, \\ \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c y_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c. \quad (2.33)$$

В задачах контрольной работы рассматривают три варианта соединения трёхфазных потребителей звездой: соединение с нейтральным проводом

при наличии потребителей в трёх фазах, соединение с нейтральным проводом при отсутствии потребителей в одной из фаз и соединение без нейтрального провода с коротким замыканием в одной из фаз нагрузки.

В первом и втором вариантах на фазах нагрузки находят соответствующие фазные напряжения источника питания, определяемые формулами (2.28). Фазные токи в нагрузке определяют с помощью выражений (2.33).

В третьем варианте напряжение на фазах нагрузки не равно фазному напряжению источника питания и определяется с помощью зависимостей (2.32). Токи, в двух незакороченных фазах, определяют по закону Ома, как частное от деления фазного напряжения на полное сопротивление соответствующей фазы. Ток в закороченной фазе определяют с помощью уравнения на основании первого закона Кирхгофа, составленного для нейтральной точки нагрузки. Для рассмотренного выше примера с коротким замыканием

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{z}_a, \quad \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{z}_c, \quad \underline{I}_b = -\underline{I}_a - \underline{I}_c.$$

При любом характере нагрузки трёхфазная активная и реактивная мощности равны соответственно сумме активных и реактивных мощностей отдельных фаз. Для определения этих мощностей фаз можно воспользоваться выражением (2.27), на основании которого

$$\underline{S}_\delta = \underline{U}_\delta \overset{*}{\underline{I}}_\delta = P_\delta + jQ_\delta, \quad (2.34)$$

где \underline{U}_δ , $\overset{*}{\underline{I}}_\delta$ – комплекс напряжения и сопряжённый комплекс тока на фазе нагрузки;

P_δ , Q_δ – активная и реактивная мощности в фазе нагрузки.

Трёхфазная активная мощность

$$P = P_a + P_b + P_c. \quad (2.35)$$

Трёхфазная реактивная мощность

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c. \quad (2.36)$$

Трёхфазная полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.37)$$

При подключении потребителей треугольником схема приобретает вид, изображённый на рисунке 2.7, б. В этом режиме схема соединения фаз симметричного источника питания не играет роли. На фазах нагрузки находят линейные напряжения источника питания, определяемые формулами (2.29). Фазные токи в нагрузке (\underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} , \underline{I}_{ca}) определяют с помощью закона Ома для участка цепи $\underline{I}_\delta = \underline{U}_\delta / \underline{z}_\delta$, где \underline{U}_δ – фазное

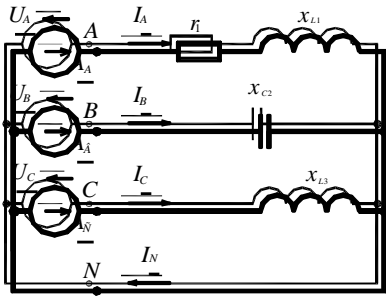
напряжение на нагрузке (соответствующее линейное напряжение источника питания); \underline{z}_δ – полное сопротивление соответствующей фазы нагрузки.

Токи в линейных проводах определяют через фазные на основании первого закона Кирхгофа для каждого узла (точки a, b, c) схемы, изображённой на рисунке 2.7, б):

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \quad (2.38)$$

Для определения мощностей трёхфазных потребителей можно использовать выражения (2.34)–(2.37).

Пример 2.2. Расчет трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой



Рассмотрим трёхфазную цепь с линейным напряжением U_L и нагрузкой, соединённой звездой с нейтральным проводом. Схема такой цепи приведена на рисунке 2.8. Параметры цепи: $U_L = 380$ В, $r_1 = 6$ Ом, $x_{L1} = 8$ Ом, $x_{C2} = 10$ Ом, $x_{L3} = 10$ Ом.

Решение. Так как в схеме есть нейтральный провод, то напряжение на фазах нагрузки равно соответствующему фазному

напряжению источника питания:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = \frac{U_L}{\sqrt{3}},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B = \frac{U_L}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C = \frac{U_L}{\sqrt{3}} e^{-j240^\circ},$$

в числовом виде:

$$\underline{U}_a = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}, \quad \underline{U}_b = 220 e^{-j120^\circ} \text{ В}, \quad \underline{U}_c = 220 e^{-j240^\circ} \text{ В}.$$

В общем случае полное сопротивление фазы в комплексной форме определяют с помощью выражения, которое использовалось в однофазных цепях,

Рисунок 2.8 — Схема трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой

$$\underline{z}_\phi = r + j(x_L - x_C).$$

Применяем эту формулу для нашего конкретного случая и

получаем полные сопротивления фаз в следующем виде:

$$\underline{z}_a = r_1 + jx_{L1} = 6 + j8 = 10e^{j53,1^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_b = -jx_{C2} = -j10 = 10e^{-j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_c = jx_{L3} = j10 = 10e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексные сопротивления фаз различны, следовательно, нагрузка несимметричная.

Токи в линейных проводах (фазные токи нагрузки) определяем с помощью закона Ома:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{z}_a} = \frac{220}{10e^{j53,1^\circ}} = 22e^{-j53,1^\circ} = 13,2 - j17,6 \text{ А},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 22e^{-j30^\circ} = 19,05 - j11 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{z}_c} = \frac{220e^{-j240^\circ}}{10e^{j90^\circ}} = 22e^{j-330^\circ} = 22e^{j30^\circ} = 19,05 + j11 \text{ А}.$$

Ток в нейтральном проводе находим по первому закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} \underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C &= 13,2 - j17,6 + 19,05 - j11 + 19,05 + j11 = \\ &= 51,3 - j17,6 = 54,2e^{-j19^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Полные мощности фаз:

$$\underline{S}_a = \underline{U}_a^* \underline{I}_A = 220 \cdot 22e^{j53,1^\circ} = 4840e^{j53,1^\circ} = 2904 + j3872 \text{ ВА},$$

$$\underline{S}_b = \underline{U}_b^* \underline{I}_B = 220e^{-j120^\circ} \cdot 22e^{j30^\circ} = 4840e^{-j90^\circ} = -j4840 \text{ ВА},$$

$$\underline{S}_c = \underline{U}_c^* \underline{I}_c = 220e^{-j240^\circ} \cdot 22e^{j30^\circ} = 4840e^{-j270^\circ} = 4840e^{j90^\circ} = j4840 \text{ ВА}.$$

Так как вещественная часть полной мощности есть активная мощность цепи, а мнимая часть – реактивная, то, просуммировав отдельно вещественные, а затем мнимые части мощностей трех фаз, определяем трехфазную активную и реактивную мощности.

Активная трехфазная мощность

$$P = P_a + P_b + P_c = 2904 + 0 + 0 = 2904 \text{ Вт}.$$

Реактивная трехфазная мощность

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 3872 - 4840 + 4840 = 3872 \text{ вар}.$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2904^2 + 3872^2} = 4840 \text{ ВА}.$$

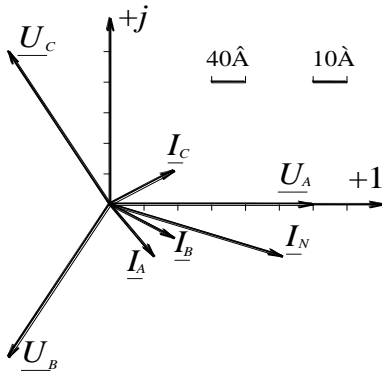


Рисунок 2.9 – Векторная диаграмма при соединении потребителей звездой с нейтральным проводом

Векторную диаграмму размещаем на комплексной плоскости с осями $+1$ и $+j$, рисунок 2.9. Выбираем масштаб векторов тока равным 10 A/деление , а векторов напряжения – 40 В/деление . Сначала строим векторы фазных напряжений, а затем векторы токов. Длина вектора соответствует в масштабе модулю показательной формы соответствующего выражения тока или напряжения, а угол, под которым этот вектор строится к вещественной оси, равен аргументу комплексной величины.

Пример 2.3. Расчёт трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником

Дано: $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, $r_1 = 6 \text{ Ом}$, $x_{L1} = 8 \text{ Ом}$, $x_{C2} = 10 \text{ Ом}$, $x_{L3} = 10 \text{ Ом}$.

Требуется определить для цепи, изображённой на рисунке 2.10, линейные и фазные токи, а также активную, реактивную и полную мощности. Построить векторную диаграмму.

Решение. В комплексной форме записи фазные напряжения на нагрузке:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} = \underline{U}_{a\hat{b}} &= U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 380 e^{j30^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{\hat{b}c} &= U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 380 e^{-j90^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{c\hat{a}} &= U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 380 e^{j150^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

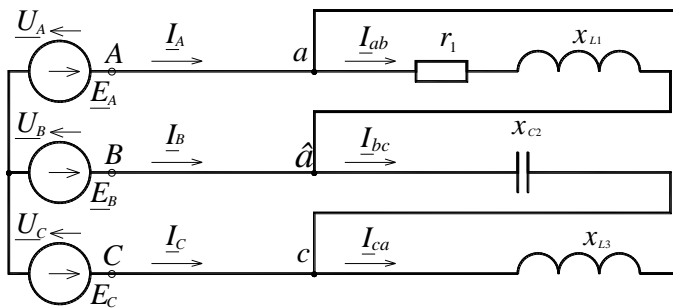


Рисунок 2.10 – Схема трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником

Сопrotивления фаз нагрузки в комплексной форме:

$$\underline{z}_{ab} = r_1 + jx_{L1} = 6 + j8 = 10e^{j53,1^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_{bc} = -jx_{C2} = -j10 = 10e^{-j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_{ca} = jx_{L3} = j10 = 10e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Фазные токи определяем по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{U_{AB}}{\underline{z}_{ab}} = \frac{380e^{j30^\circ}}{10e^{j53,1^\circ}} = 38e^{-j23,1^\circ} = 35 - j14,9 \text{ А},$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{U_{BC}}{\underline{z}_{bc}} = \frac{380e^{-j90^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 38 \text{ А},$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{U_{CA}}{\underline{z}_{ca}} = \frac{380e^{j150^\circ}}{10e^{j90^\circ}} = 38e^{j60^\circ} = 19 + j33 \text{ А}.$$

Для определения линейных токов используем первый закон Кирхгофа для точек a , b , c схемы на рисунке 2.10:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 35 - j14,9 - 19 - j33 = 16 - j47,9 = 50,5e^{-j71,5^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 38 - 35 + j14,9 = 3 + j14,9 = 15,1e^{j78,6^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 19 + j33 - 38 = -19 + j33 = 38e^{j120^\circ} \text{ А}.$$

Полные мощности фаз:

$$\underline{S}_{a\hat{a}} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{a\hat{a}}^* = 380e^{j30^\circ} \cdot 38e^{j23,1^\circ} = 14400e^{j53,1^\circ} = 8666 + j11500 \text{ ВА},$$

$$\underline{S}_{\hat{a}c} = \underline{U}_{bc} \underline{I}_{\hat{a}c}^* = 380e^{-j90^\circ} \cdot 38 = 14400e^{-j90^\circ} = -j14400 \text{ ВА},$$

$$\underline{S}_{ca} = \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = 380e^{j150^\circ} \cdot 38e^{-j60^\circ} = 14400e^{j90^\circ} = j14400 \text{ ВА}.$$

Трехфазная активная мощность

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 8666 + 0 + 0 = 8666 \text{ Вт}.$$

Трехфазная реактивная мощность

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = 11500 - 14400 + 14400 = 11500 \text{ вар}.$$

Трехфазная полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{8666^2 + 11500^2} = 14400 \text{ ВА}.$$

Векторную диаграмму строим в масштабе на комплексной плоскости относительно осей $+1$ и $+j$ (рисунок 2.11).

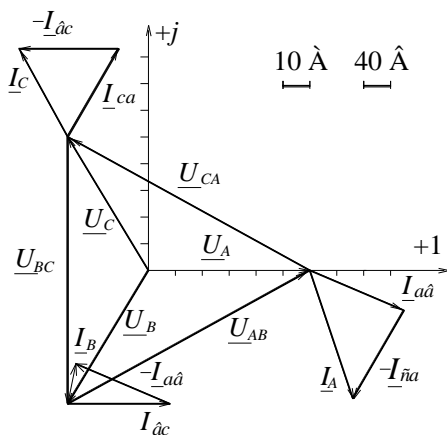


Рисунок 2.11 – Векторная диаграмма для нагрузки, соединённой треугольником

Контрольные вопросы

- 1 Что называется амплитудным, мгновенным и действующим значениями переменного тока?
- 2 Какой ток называется переменным?
- 3 Дайте определение периода, частоты и фазы переменного тока?
- 4 Как можно изобразить синусоидальные величины при помощи векторов?
- 5 Какими параметрами характеризуется цепь переменного тока?
- 6 Что влияет на величину активного сопротивления цепи?
- 7 От каких факторов зависит величина реактивных сопротивлений цепи переменного тока?
- 8 По какому признаку можно разделить элементы цепи переменного тока на активные и реактивные?
- 9 Полное сопротивление цепи переменного тока.
- 10 Закон Ома для цепи переменного тока.
- 11 Как изображают на принципиальных схемах элементы с активным и реактивным сопротивлениями?
- 12 Из чего состоит треугольник сопротивлений?
- 13 Какие мощности рассматривают в цепях переменного тока и в каких единицах их измеряют?
- 14 Что подразумевается под реактивной мощностью цепи?
- 15 Из чего состоит треугольник мощностей?
- 16 Как изображают в комплексной форме записи напряжения, токи и сопротивления участков цепи?
- 17 Комплексная мощность цепи переменного тока.
- 18 Условие возникновения в цепи резонанса напряжений.
- 19 Условие возникновения в цепи резонанса токов.
- 20 Особенности резонанса напряжений.

- 21 Особенности резонанса токов.
- 22 В каком случае ток отстает от напряжения на некоторый угол?
- 23 Когда ток опережает вызывающее его напряжение?
- 24 Напишите соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении симметричной нагрузки звездой.
- 25 Как определяют фазные напряжения на несимметричной нагрузке, соединенной звездой?
- 26 Трехфазная полная, активная и реактивная мощности при симметричной и несимметричной нагрузке.
- 27 Как рассчитывают линейные токи для нагрузки, соединенной треугольником?
- 28 Как определяют напряжение смещения нейтрали?
- 29 Симметричная и несимметричная нагрузка в трехфазной цепи.
- 30 Каково назначение нейтрального провода в трехфазной системе?

3 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

3.1 Нелинейные электрические цепи постоянного тока

Электрическая цепь считается нелинейной, если хотя бы один из ее элементов является нелинейным. У нелинейного элемента зависимость тока от приложенного напряжения (вольт-амперная характеристика) отлична от прямой линии.

Нелинейными элементами могут быть сопротивления, индуктивности и емкости. Все элементы электрических цепей в силу физических процессов, происходящих в них, обладают некоторой нелинейностью. В линейной электротехнике применяют идеализацию электрических элементов, которая допустима только тогда, когда в рассматриваемых случаях учет нелинейности существенно не влияет на исследование явлений.

Однако встречаются случаи, при которых нелинейность между двумя величинами и является причиной появления принципиально новых явлений, которые невозможны в линейной цепи.

В нелинейных электрических цепях постоянного тока с изменением приложенного напряжения сопротивление нелинейного элемента также меняется. Имея вольт-амперную характеристику (ВАХ) нелинейного элемента, можно определить его сопротивление при любых значениях напряжения или тока. Различают два вида сопротивления нелинейного элемента: статическое и дифференциальное.

Статическим сопротивлением нелинейного элемента в данной точке ВАХ называется отношение напряжения к соответствующему значению тока:


$$r_c = \frac{U}{I},$$

где U – напряжение в точке ВАХ, для которой находится статическое сопротивление;

I – ток в этой точке.

Дифференциальным сопротивлением нелинейного элемента в некоторой точке ВАХ называется предел бесконечного малого приращения напряжения в этой точке к соответствующему приращению тока,

$$r_g = \frac{dU}{dI}.$$

Условное графическое обозначение нелинейного сопротивления на принципиальных схемах имеет вид .

3.1.1 Классификация нелинейных элементов

Нелинейные элементы можно разделить:

- на элементы, нелинейность которых основана на температурной зависимости сопротивления (терморезисторы). К ним относятся устройства, изготовленные из металла (вольфрам, железо в атмосфере водорода) и различных полупроводников;

- на элементы, нелинейность сопротивления которых не определяется температурой (варисторы).

Основной причиной нелинейности ВАХ терморезисторов является изменение удельного сопротивления под действием нагрева при прохождении по элементу тока. Так как величина такого сопротивления зависит от температуры, то при экспериментальном определении ВАХ необходимо указывать состояние окружающей среды (например, окружающая температура 20 °С).

Представителем металлических терморезисторов является лампа накаливания с металлической нитью, характеристика которой показана на рисунке 3.1, а. Ценные свойства имеет бареттер, состоящий из железной спирали, помещенной в стеклянную колбу. Стеклянная колба наполнена водородом при давлении от 50 до 200 мм рт. ст. Вольт-амперная характеристика бареттера изображена на рисунке 3.1, б. Особенностью этой характеристики является наличие относительно большого почти горизонтального участка. Кривая имеет симметричную форму.

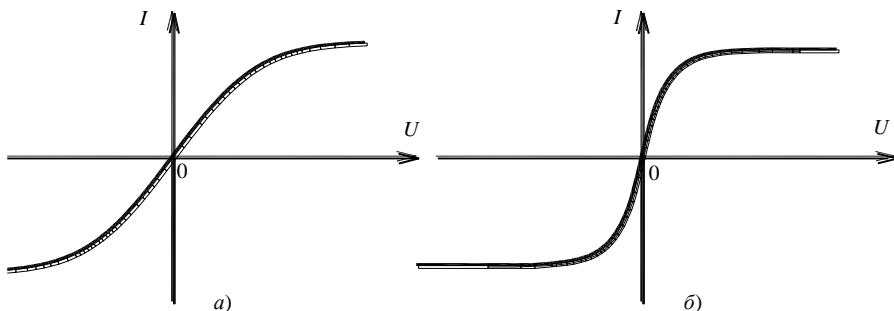
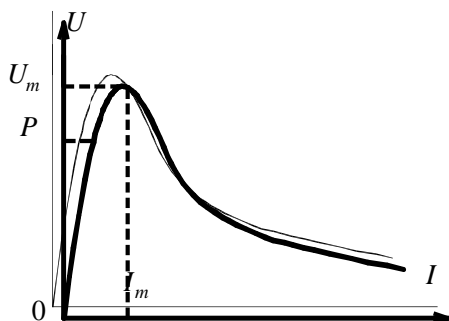


Рисунок 3.1 – Вольт-амперные характеристики:
а – лампы накаливания; б – бареттера

В последнее время находят широкое применение температурно-зависимые полупроводниковые элементы – термисторы. Величина их сопротивления очень сильно зависит от температуры. Основной причиной

нелинейности ВАХ термисторов является увеличение числа носителей зарядов в полупроводнике при повышении температуры. При малом токе, практически не вызывающем нагрева термистора, температура термистора равна температуре окружающей среды и, если последняя неизменна, сопротивление его почти постоянно, что соответствует линейному участку



характеристики от нуля до точки P на рисунке 3.2. При дальнейшем увеличении тока начинается заметное уменьшение сопротивления и крутизна характеристики падает. При определенном токе I_m падение напряжения достигает максимальной величины U_m , с дальнейшим ростом тока падение напряжения уменьшается, что соответствует резкому уменьшению статического

сопротивления и отрицательного дифференциального. Вид всей характеристики существенно зависит от температуры окружающей среды и способности среды отводить тепло, выделяющееся в термисторе. Вид ВАХ также зависит и от состава полупроводника.

3.1.2 Методы расчета нелинейных цепей постоянного тока

В нелинейных цепях постоянного тока справедливы законы Ома и Кирхгофа. Однако применять их для расчета затруднительно. Это объясняется зависимостью сопротивления нелинейных элементов от величины тока. Отмеченная зависимость приводит к тому, что в уравнениях для расчета цепей кроме неизвестных токов имеются и неизвестные сопротивления нелинейных элементов. Решить систему уравнений для нелинейной цепи можно лишь в том случае, если имеются аналитические зависимости сопротивления нелинейных элементов от протекающего через них тока.

На практике чаще имеется экспериментально снятая ВАХ нелинейного элемента. В таком случае для расчета можно применять графический метод. Таким образом, для расчета нелинейных цепей могут применяться графические, итерационные и аналитические методы.

Графические методы отличаются своей наглядностью. При этом достигаемый результат имеет точность, которая в большинстве случаев удовлетворяет предъявленным требованиям.

Решение нелинейных задач с помощью последовательных приближений состоит в разумном выборе предположительного решения и последовательного исправления результата. Правда, этот метод достаточно трудоемок и в большинстве случаев не нагляден.

Аналитические методы также мало наглядны. Они основаны на более или менее точной аппроксимации нелинейной зависимости и отличаются большой трудоемкостью, а точность в большинстве случаев может быть не выше, чем при графических методах. При расчетах аналитическим методом используют величины статических и дифференциальных сопротивлений нелинейного элемента.

Анализ различных методов расчета нелинейных цепей постоянного тока показывает, что графический метод для практики является более предпочтительным.

Графический метод расчета неразветвлённой цепи с нелинейными элементами

На рисунке 3.3 приведена схема нелинейной цепи, состоящей из двух последовательно соединенных нелинейных элементов r_1 и r_2 с заданными на рисунке 3.4 вольт-амперными характеристиками $I = f(U_1)$ и $I = f(U_2)$. Требуется определить ток I и напряжения U_1 и U_2 на элементах при заданном на зажимах цепи напряжении U .

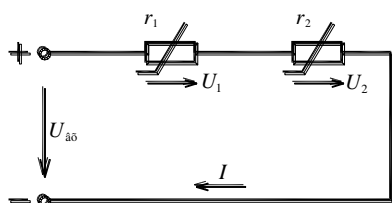


Рисунок 3.3 – Нелинейная цепь постоянного тока с последовательным соединением двух элементов

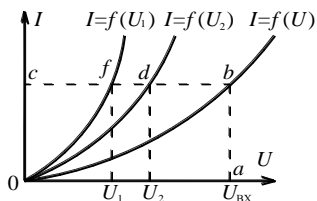


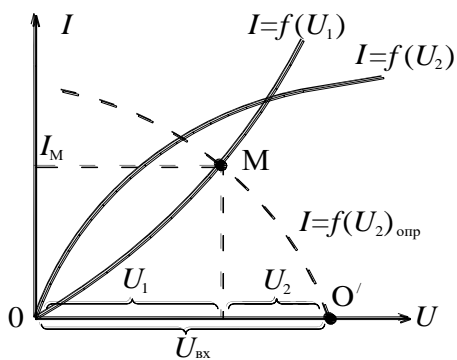
Рисунок 3.4 – Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов $I=f(U_1)$, $I=f(U_2)$ и для всей цепи $I=f(U)$

Для вычисления тока I и напряжений U_1 и U_2 построим вспомогательную характеристику: зависимость тока I от суммарного напряжения U ($U = U_1 + U_2$). Так как в неразветвленной цепи ток в обоих нелинейных элементах один и тот же, т. е. $I_1 = I_2 = I$, то для построения характеристики $I = f(U)$ необходимо суммировать напряжения U_1 и U_2 при одинаковых значениях тока I (см. рисунок 3.4).

Отложим на оси абсцисс напряжение $U_{вх}$ на зажимах цепи (точка a на рисунке 3.4) и из этой точки проведем прямую ab , параллельную оси ординат, до пересечения с кривой $I = f(U)$; полученный отрезок ab равен в

масштабе m_i току I . Затем из точки b проведем прямую bc , параллельную оси абсцисс. В результате получим отрезки cd и cf , соответственно равные U_1 и U_2 в масштабе m_U .

Можно применить другой метод решения задачи с построением так называемой опрокинутой характеристики одного из элементов цепи. Для этого рассмотрим зависимость изменения тока I цепи, во-первых, от напряжения U_1 и, во-вторых, от разности напряжений $U - U_2$. В первом случае эта зависимость определяется собственной характеристикой $I = f(U_1)$, во втором случае при построении характеристики $I = f(U - U_2)$ для



каждого значения тока I необходимо из постоянной абсциссы U вычесть абсциссу характеристики $I = f(U_2)$ второго элемента. Это равносильно построению опрокинутой (зеркально отражённой) характеристики элемента $I = f(U_2)_{\text{опр}}$ от точки O' , соответствующей напряжению $U_{\text{вх}}$ на рисунке 3.5.

должен определяться точкой M

Рабочий режим первого элемента должен удовлетворять обеим характеристикам, т. е. он должен определяться точкой M пересечения этих характеристик. Перпендикуляры, опущенные на оси координат из точки пересечения, определяют значения напряжений U_1 и U_2 отдельных элементов и общий ток I_M .

Рисунок 3.5 – Определение напряжений U_1 и U_2 нелинейных элементов цепи по заданному напряжению $U_{\text{вх}}$ методом построения опрокинутой характеристики первого элемента

Графический метод расчёта цепи с параллельным соединением нелинейных элементов

Расчет отмеченной нелинейной цепи рассмотрим на конкретном примере.

Пример 3.1. Расчёт нелинейной цепи при параллельном соединении элементов

Необходимо определить, какие токи проходят в параллельных ветвях, содержащих нелинейные элементы r_1 и r_2 (рисунок 3.6, а), если ток $I_{\text{вх}} = 0,92$ А.

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов показаны на рисунке 3.6, б.

Решение. На основании первого закона Кирхгофа для данной схемы

$$I_{\text{вх}} = I_1 + I_2.$$

По вольт-амперным характеристикам для значений напряжения U , равных 0; 20; 40; 60 В, определим соответствующие им величины токов I_1 и I_2 . Сложим для каждого из выбранных значений напряжения эти токи и построим результирующую ВАХ всей цепи.

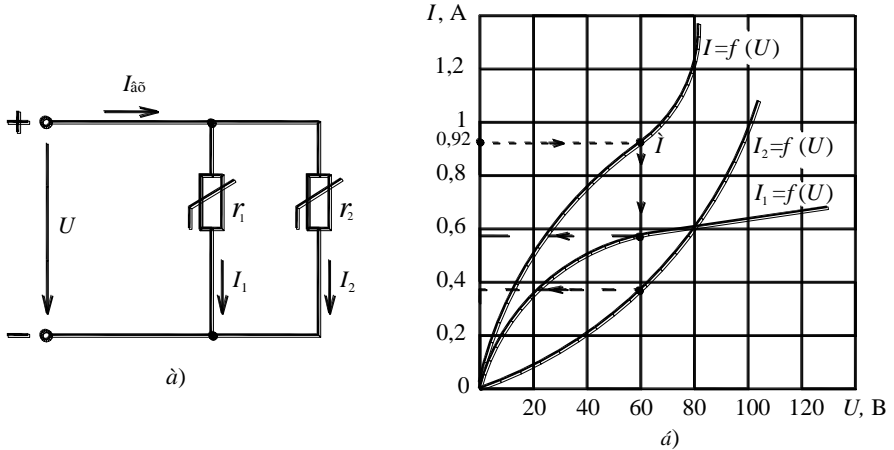


Рисунок 3.6 – Схема нелинейной цепи постоянного тока (а) и её вольт-амперные характеристики (б)

На этой характеристике найдем точку M , ордината которой $I_{\text{вх}} = 0,92$ А, а абсцисса $U = 60$ В. Таким образом, напряжение на обеих параллельных ветвях, содержащих нелинейные элементы, равно 60 В.

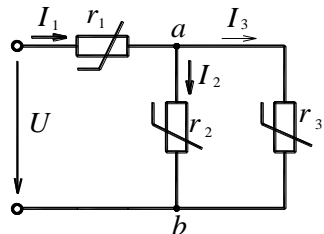
При этом напряжении токи $I_1 = 0,56$ А и $I_2 = 0,36$ А.

Графический метод расчета цепи со смешанным соединением нелинейных элементов

Аналогично предыдущему пункту рассмотрим расчет нелинейной цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов на конкретном примере.

Пример 3.2. Расчёт нелинейной цепи со смешанным соединением элементов

В цепи, изображённой на рисунке 3.7, известно входное напряжение U и заданы вольт-амперные характеристики нелинейных элементов r_1 , r_2 , r_3 .



Требуется определить токи во всех ветвях, если $U = U_{\text{вх}} = 9 \text{ В}$.

Решение. Начинаем расчет с построения на рисунке 3.8 в одной системе координат ВАХ всех элементов цепи (r_1, r_2, r_3).

Далее строим эквивалентную ВАХ резисторов r_2 и r_3 , включенных параллельно. Для этого на оси напряжений выбираем точки (удобно выбрать все оцифрованные). Из каждой точки мысленно проводим перпендикуляр к оси напряжений. В качестве примера на рисунке перпендикуляр восстановлен из точки (7 В). На перпендикуляре суммируем два отрезка. Один из них заключен между осью U и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ $I_2 = f(U_2)$ (отрезок 1). Второй заключен между осью U и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ $I_3 = f(U_3)$ (отрезок 2). Точка A , получаемая в результате суммирования на данном перпендикуляре отрезков 1 и 2, находится на эквивалентной ВАХ $(I_2 + I_3) = f(U_{ab})$ резисторов r_2 и r_3 . Выполнив рассмотренную операцию суммирования отрезков для каждого перпендикуляра, мы имеем ряд точек. Соединив эти точки линией, получаем эквивалентную ВАХ резисторов r_2 и r_3 $(I_2 + I_3) = f(U_{ab})$.

Затем выбираем точки на оси токов и мысленно проводим из них перпендикуляры к этой оси. На рисунке в качестве примера восстановлен перпендикуляр из точки $4,6 \text{ mA}$. На перпендикуляре суммируем два отрезка. Один заключен между осью токов и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ $(I_2 + I_3) = f(U_{ab})$ (отрезок 3), а второй находится между осью токов и точкой пересечения перпендикуляра с ВАХ $I_1 = f(U_1)$ (отрезок 4). После суммирования получаем на этом перпендикуляре точку B . Выполнив суммирование отрезков на всех перпендикулярах к оси токов, имеем ряд точек. Соединяем эти точки линией и получаем эквивалентную ВАХ всей цепи $I_1 = f(U)$.

Рисунок 3.7 – Схема нелинейной цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов

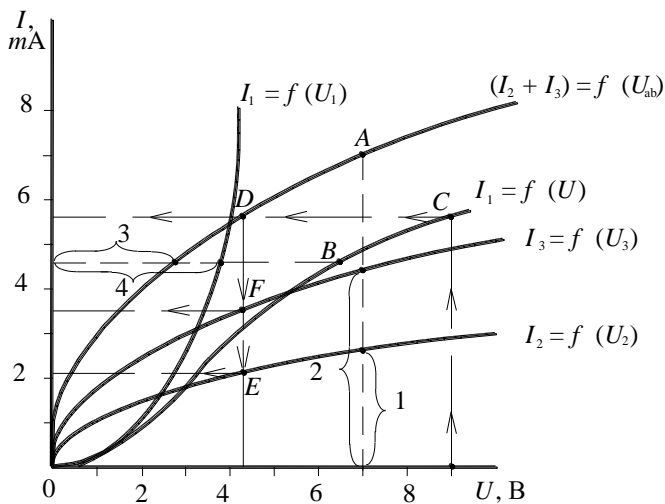


Рисунок 3.8 – Графический метод расчета нелинейной цепи со смешанным соединением элементов

Для определения токов ветвей из точки на оси напряжений, соответствующей заданному входному напряжению (в нашем примере $U_{вх} = 9$ В), строим перпендикуляр к этой оси. Находим место пересечения перпендикуляра с ВАХ $I_1 = f(U)$ всей цепи (точка C). Ордината этой точки есть ток I_1 , протекающий в первой ветви через резистор r_1 (в нашем примере $I_1 = 5,7$ мА). Опускаем из точки C на ось токов перпендикуляр. Место пересечения его с ВАХ $(I_2 + I_3) = f(U_{ab})$ резисторов r_2 и r_3 дает нам точку D . Абсцисса этой точки есть напряжение на разветвленном участке цепи (в нашем примере $U_{ab} = 4,3$ В). Из точки D проводим перпендикуляр на ось напряжений. В местах пересечения его с ВАХ $I_2 = f(U_2)$ и ВАХ $I_3 = f(U_3)$ ставим точки E и F . Ординаты этих точек есть токи I_2 и I_3 (в нашем примере $I_2 = 2,1$ мА, $I_3 = 3,6$ мА). Таким образом, $I_1 = 5,7$ мА, $I_2 = 2,1$ мА, $I_3 = 3,6$ мА. На рисунке путь от заданного напряжения до искомого тока обозначен стрелками.

В данном примере рассмотрен наиболее общий случай, когда все элементы цепи нелинейные. Если в задаче один или два элемента линейные, то ход решения не меняется, отличие будет лишь в том, что при первоначальном вычерчивании соответствующие ВАХ будут прямолинейными. Для их вычерчивания необходимо произвольно (в пределах напряжений, используемых для построения ВАХ нелинейных резисторов) задать значение напряжения. Разделив это напряжение на величину сопротивления линейного резистора, получаем ток. Используем выбранное значение напряжения и рассчитанную величину тока в качестве координат для

нахождения точки на плоскости. Через полученную точку и начало координат проводим прямую, которая и будет ВАХ линейного резистора с заданным в условии задачи сопротивлением.

3.2 Нелинейные элементы электрической цепи переменного тока

Нелинейные сопротивления для переменного тока можно подразделить на три группы: активные, индуктивные и ёмкостные. Каждая из этих групп, в свою очередь, делится на управляемые и неуправляемые.

Управляемые нелинейные сопротивления обычно имеют один или несколько управляющих электродов или управляющих обмоток, включаемых в управляющую цепь или цепи, воздействуя на ток или напряжение которых, можно управлять величиной сопротивления в главной цепи.


Наиболее широкое распространение в качестве управляемых нелинейных активных сопротивлений получили полупроводниковые триоды (транзисторы) и тиристоры.

Неуправляемыми нелинейными активными сопротивлениями являются полупроводниковые диоды, термисторы и другие элементы.


К нелинейным элементам в цепях переменного тока также относятся: индуктивные катушки с ферромагнитными сердечниками, работающие в условиях магнитного насыщения; электронные приборы; конденсаторы с сегнетоэлектриками, у которых диэлектрическая проницаемость зависит от величины приложенного напряжения.

Вышеотмеченные нелинейные элементы используются в устройствах, предназначенных для преобразования переменного тока в постоянный, постоянного в переменный, стабилизации напряжения и тока, усиления мощности электрических сигналов, деления и умножения частоты и т. д.

Под нелинейной индуктивностью понимают катушку индуктивности, намотанную на замкнутый сердечник из ферромагнитного материала (например, электротехническая сталь), для которого зависимость магнитного потока в сердечнике от протекающего по обмотке тока нелинейная. Индуктивное сопротивление такой катушки переменному току непостоянно; оно зависит от величины переменного тока.

Катушку индуктивности со стальным сердечником в литературе называют иногда дросселем со стальным сердечником. Обозначение её на принципиальной схеме имеет вид .

В обычных конденсаторах обкладки разделены веществом, диэлектрическая проницаемость которого не является функцией напряжённости электрического поля, поэтому ёмкость таких конденсаторов не зависит от напряжения.

У нелинейных конденсаторов ёмкость C зависит от напряжения U , на электрических принципиальных схемах они имеют обозначение , на зываются они ещё варикондами.

Контрольные вопросы

- 1 В чем различие между линейным и нелинейным элементами?
- 2 Какая электрическая цепь является нелинейной?
- 3 Статическое сопротивление нелинейного элемента и методика определения его величины из ВАХ.
- 4 Дифференциальное сопротивление нелинейного элемента и методика определения его величины из ВАХ.
- 5 Почему затруднено использование законов Ома и Кирхгофа для расчета нелинейной цепи?
- 6 Какие существуют методы расчета нелинейной цепи?
- 7 Область применения нелинейных элементов.
- 8 Как определяется эквивалентная ВАХ нелинейных резисторов, включенных последовательно?
- 9 Методика определения эквивалентной ВАХ нелинейных элементов, включенных параллельно.
- 10 Приведите примеры нелинейных элементов и их графических изображений на принципиальных схемах.
- 11 Особенности нелинейных элементов в цепи переменного тока.
- 12 Как рассчитывается нелинейная электрическая цепь, содержащая последовательно соединенные элементы?
- 13 Методика определения токов в нелинейной электрической цепи при параллельном соединении элементов.

4 МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

4.1 Основные понятия о магнитных цепях

Магнитной цепью называется контур, по которому замыкается магнитный поток и который включает в себя источник магнитодвижущей силы (МДС) и ферромагнитные или иные тела, в которых могут находиться воздушные зазоры.

Важнейшей величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является магнитная индукция, обозначаемая буквой B . Магнитная индукция – векторная величина. Её направление в каждой точке поля совпадает с касательной к магнитной силовой линии и может быть определено с помощью магнитной стрелки. За направление вектора магнитной индукции принимается направление, показываемое северным полюсом магнитной стрелки, помещённой в данную точку поля. Единицей измерения магнитной индукции служит тесла (Тл).

Второй величиной, характеризующей магнитное поле, является магнитный поток, обозначаемый буквой Φ . Величину магнитного потока, пронизывающего площадку сечением S , расположенную перпендикулярно к магнитным силовым линиям, можно определить из выражения

$$\Phi = B S. \quad (4.1)$$

Единицей измерения магнитного потока является вебер (Вб).

При расчёте магнитных цепей пользуются напряжённостью магнитного поля H , определяемой из выражения

$$H = B / \mu_a, \quad (4.2)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, равная произведению магнитной постоянной μ_0 на относительную магнитную проницаемость μ_r .

В системе СИ магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. У ферромагнитных материалов $\mu_r \gg 1$. Неферромагнитные материалы, в том числе и воздух, имеют $\mu_r \approx 1$ и тогда $\mu_a \approx \mu_0$. Единицей измерения напряжённости магнитного поля в системе СИ является ампер на метр (А/м).

Произведение напряжённости магнитного поля H на длину участка цепи l называется падением магнитного напряжения или магнитным напряжением на данном участке,

$$U_M = Hl = R_M \Phi, \quad (4.3)$$

где R_M – магнитное сопротивление участка.

Измеряется магнитное напряжение амперами (А).

Магнитное сопротивление зависит от геометрических размеров участка и величины магнитной проницаемости μ_a . Его можно определить из выражения

$$R_l = \frac{l}{\mu_a S}, \quad (4.4)$$

где l – длина однородного участка магнитной цепи;

S – площадь его поперечного сечения.

Единицей измерения магнитного сопротивления является 1/Гн. Так как магнитная проницаемость μ_a ферромагнитных материалов зависит от магнитного потока, то их сопротивление R_M является нелинейным.

По виду магнитные цепи делятся на неразветвлённые и разветвлённые, а по структуре – на однородные и неоднородные.

Неразветвлённой называют такую цепь, через элементы которой проходит один и тот же магнитный поток. В разветвлённой цепи содержатся участки (ветви), в которых поток различен.

В однородной цепи поток проходит по участкам с одинаковыми магнитными свойствами. Неоднородной называют магнитную цепь, состоящую из участков, имеющих разные сечения, воздушные зазоры, ферромагнитные тела с различными свойствами, немагнитные вставки.

Если в разветвлённой цепи есть точка, в которой сходятся участки с различными потоками, то для такой точки (узла цепи) справедлив первый закон Кирхгофа для магнитной цепи, утверждающий что алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum \Phi = 0. \quad (4.5)$$

Для замкнутого контура магнитной цепи можно применять второй закон Кирхгофа, по которому алгебраическая сумма падений магнитных напряжений равна алгебраической сумме МДС,

$$\sum U_M = \sum Iw, \quad (4.6)$$

где Iw – МДС, равная произведению намагничивающего тока I на число витков катушки w , обозначать МДС можно буквой F .

Сравнивая выражения, описывающие законы Кирхгофа для электрических и магнитных цепей, можно отметить аналогию между ними. При этом току, напряжению, ЭДС и сопротивлению в электрических цепях соответствуют магнитный поток, магнитное напряжение, МДС и магнитное сопротивление в магнитных цепях. Отмеченная аналогия позволяет при расчётах изображать магнитные цепи в виде, напоминающем электрические принципиальные схемы. Такие схемы называются эквивалентными. На них источник ЭДС заменяется источником МДС, а вместо потребителей энергии

изображаются прямоугольниками участки магнитной цепи с различным магнитным сопротивлением. Участки, образованные воздушными зазорами и немагнитными вставками, изображаются линейными элементами, а выполненные из ферромагнитного материала рисуются как нелинейные элементы. Пример эквивалентной схемы приведён на рисунке 4.1. Эта схема соответствует неразветвлённой магнитной цепи, состоящей из двух последовательных участков. Первый выполнен из ферромагнитного материала, а второй содержит воздушный зазор.

Магнитное поле может возбуждаться постоянным магнитом или проводником с током, который чаще всего навивается в виде катушки из изолированного провода (соленоида). Направление магнитного потока, создаваемого такой катушкой, можно определить правилом правого винта. Если такой винт расположить на оси катушки и начать вращать его по направлению протекания тока в обмотке соленоида, то направление перемещения винта совпадёт с направлением магнитного потока.

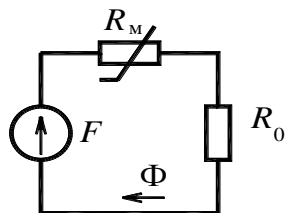


Рисунок 4.1 – Эквивалентная расчётная схема магнитной цепи

Закон электромагнитной силы Ампера устанавливает взаимосвязь между током в проводнике и силой, действующей на этот проводник, если последний находится в равномерном магнитном поле. В соответствии с этим законом на прямолинейный проводник с электрическим током, помещённый в равномерное магнитное поле, действует сила

$$F_{эм} = BIl \sin \alpha, \quad (4.7)$$

где B – магнитная индукция;

I – сила тока в проводнике;

l – длина проводника;

α – угол между током и магнитной индукцией.

Направление силы Ампера, действующей на проводник с током, определяется правилом левой руки. В соответствии с этим правилом силовые магнитные линии должны входить в ладонь левой руки, четыре вытянутых пальца необходимо направить по направлению тока в проводнике, тогда отведённый в сторону большой палец укажет направление действия силы.

Задачей расчета магнитной цепи является определение значения магнитодвижущей силы F , необходимой для создания магнитного потока Φ или индукции B заданной величины в рабочем пространстве (прямая задача). Иногда приходится решать и обратную задачу, когда по заданному значению магнитодвижущей силы требуется определить величину магнитного потока или индукции на участке магнитной цепи

(например, в воздушном зазоре).

Так как магнитная цепь является нелинейным устройством, то для её расчёта не всегда можно непосредственно применять законы Ома и Кирхгофа. В этом случае для расчёта таких устройств можно использовать методы анализа нелинейных цепей.

4.2 Определение магнитодвижущей силы цепи

Для определения магнитодвижущей силы цепи при заданном значении индукции (решение прямой задачи) широко применяется метод, базирующийся на законе полного тока. В этом методе магнитная цепь так разбивается на участки, чтобы в пределах каждого магнитная проницаемость и индукция были неизменны. На каждом из участков определяется индукция и напряженность магнитного поля.

При определении индукции на участках в контрольной работе можно считать, что по всей цепи проходит одинаковый поток (неразветвлённая цепь), а в воздушном зазоре отсутствует выпучивание магнитных силовых линий за пределы ферромагнитной части, образующей воздушный зазор. Данные допущения позволяют определять индукцию на участке цепи из следующего выражения

$$B_i = B_0 S_0 / S_i, \quad (4.8)$$

где B_i – искомая индукция на i -том участке;

B_0 – известное значение индукции на одном из участков (например, в воздушном зазоре);

S_0 – площадь сечения участка с заданной индукцией;

S_i – площадь поперечного сечения i -того участка.

Напряженность поля в ферромагнитном магнитопроводе находится с помощью кривой намагничивания материала, из которого он выполнен, а в воздушном зазоре по формуле

$$H_0 = \frac{\hat{A}_0}{\mu_0}, \quad (4.9)$$

где H_0 – напряженность магнитного поля;

B_0 – индукция в зазоре;

μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Магнитодвижущая сила F , необходимая для создания требуемой магнитной индукции в рабочем объёме, равна сумме магнитных напряжений на всех участках цепи:

$$F = \sum_{i=1}^n H_i l_i, \quad (4.10)$$

где n – количество участков, на которые разбита магнитная цепь.

H_i – напряжённость магнитного поля i -того участка;

l_i – длина i -того участка;

Пример 4.1 Определение магнитодвижущей силы цепи по заданной индукции в сечении магнитопровода

На рисунке 4.2 изображен чертёж магнитной цепи, магнитный поток в которой создаётся намагничивающей обмоткой w . Для заданной магнитной цепи, имеющей $a = 120$ мм, $b = 200$ мм, $c = 40$ мм, $l_0 = 2$ мм, $B_0 = 1,2$ Тл, определить магнитодвижущую силу катушки. Рассчитать величину электромагнитной силы, действующей на проводник с током, находящийся в воздушном зазоре, если по этому проводнику протекает ток $I=10$ А. Направление тока в проводнике указано на рисунке. Показать на чертеже направление этой силы. Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, кривая намагничивания которой приведена в виде таблицы А.1.

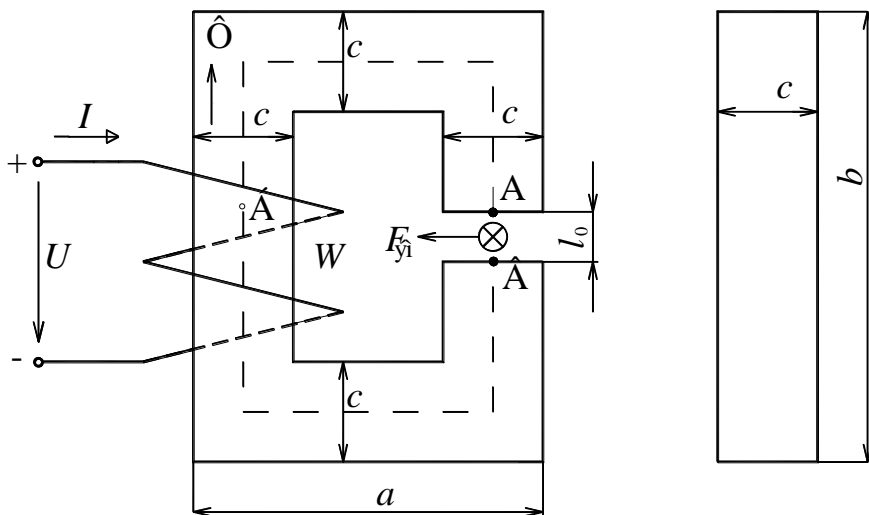


Рисунок 4.2 – Чертёж магнитной цепи

Решение. Проводим на чертеже магнитопровода среднюю магнитную силовую линию (на рисунке она изображена пунктиром) и разбиваем цепь на участки, на которых индукция и магнитная проницаемость неизменны. Таких участков в заданной цепи два. Первым может быть воздушный зазор, а вторым – магнитопровод. При переходе от воздушной среды к ферромагнитному материалу магнитопровода происходит изменение магнитной проницаемости, поэтому эти две части магнитной цепи должны принадлежать различным участкам. В рассматриваемом примере магнитопровод выполнен из одного материала, имеет одинаковое сечение, а

следовательно, одинаковую магнитную проницаемость и индукцию. Данный факт позволяет оформить магнитопровод одним участком. Длина первого участка l_1 (воздушного зазора), измеренная по средней магнитной линии (АВ), равна l_0 . Второй участок (АВВ) проходит по магнитопроводу и его длина

$$l_2 = 2(a - c) + 2(b - c) - l_0 = 2(120 - 40) + 2(200 - 40) - 2 = 478 \text{ мм} = 0,478 \text{ м.}$$

Эквивалентная расчётная схема заданной магнитной цепи изображена на рисунке 4.1.

На расчётной схеме с помощью элементов R_M и R_0 учитывается магнитное сопротивление магнитопровода и воздушного зазора. Источник питания соответствует искомой намагничивающей силе F , создающей в цепи магнитный поток Φ . Так как магнитное сопротивление ферромагнитных материалов нелинейно, то на схеме замещения оно должно изображаться в виде нелинейного элемента.

По второму закону для магнитной цепи можно составить уравнение

$$F = U_{M1} + U_{M2} = H_1 l_1 + H_2 l_2,$$

где U_{M1} – магнитное напряжение на первом участке;

U_{M2} – магнитное напряжение на втором участке;

H_1 – напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре;

l_1 – длина первого участка;

H_2 – напряжённость магнитного поля в ферромагнитном материале;

l_2 – длина второго участка.

Так как первым участком является воздушный зазор, то напряжённость поля на нём определяем из выражения

$$H_1 = B_0 / \mu_0 = 1,2 / 4\pi \cdot 10^{-7} = 9,55 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Напряжённость магнитного поля на втором участке находим из таблицы А.1. В соответствии с этой таблицей для стали марки 1211 при индукции $B_2 = 1,2$ Тл напряжённость поля $H_2 = 8,43$ А/см = 843 А/м.

Магнитодвижущая сила F катушки

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 = 9,55 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 843 \cdot 0,478 = 2313 \text{ А.}$$

Величина электромагнитной силы $F_{ЭМ}$, действующей на проводник с током в воздушном зазоре,

$$F_{ЭМ} = B_0 I = B_0 c I = 1,2 \cdot 0,04 \cdot 10 = 0,48 \text{ Н.}$$

В выражении для определения силы считается, что длина провода l равна толщине магнитопровода c .

Направление магнитного потока в магнитопроводe определяем по правилу буравчика, которое надо применять для намагничивающей катушки

и. В соответствии с этим правилом совмещаем буравчик с осью катушки. Если рукоятку буравчика вращать по направлению тока в намагничивающей катушке, то он будет перемещаться вверх. Так как это перемещение совпадает с направлением магнитного потока Φ в катушке и, то магнитный поток в магнитопроводе замыкается по часовой стрелке. В воздушном зазоре магнитные силовые линии направлены сверху вниз.

Направление силы, действующей на проводник с током в воздушном зазоре, определяем по правилу левой руки. Для этого мысленно размещаем левую руку в воздушном зазоре так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, четыре вытянутых пальца направляем по направлению тока в проводнике, тогда большой палец укажет направление силы. Направление тока указывается условным знаком, проставляемым на торце проводника. Если в круге, обозначающем вид проводника с торца, размещается крестик, то в таком случае ток в проводнике направлен от нас. На рисунке 4.2 изображён именно такой случай. Если же ток в проводнике направлен к нам, то в центре круга проставляется точка. В рассматриваемом примере сила $F_{\text{ЭМ}}$ направлена влево.

4.3 Определение магнитной индукции в заданном сечении

Из-за нелинейности магнитной цепи выражения (4.1)–(4.6) нельзя использовать для непосредственного определения магнитной индукции на участке по заданной величине магнитодвижущей силы (обратная задача). Для решения этой задачи разработаны специальные методы расчёта, одним из которых является графоаналитический метод. В соответствии с этим методом необходимо произвольно задать ряд значений индукции в воздушном зазоре, и по методике расчета прямой задачи (см. пример 4.1) для каждого из них определить соответствующее значение намагничивающей силы. Затем строится зависимость индукции в зазоре от намагничивающей силы и по ней для заданного значения МДС находится искомая величина B .

Пример 4.2. Определение магнитной индукции в сечении магнитной цепи по заданной намагничивающей силе

Для заданной МДС, которая получается удвоением значения F , рассчитанного в примере 4.1 ($F' = 2F = 4626$ А), требуется определить индукцию в воздушном зазоре.

Задачу решаем графоаналитическим методом. Задаемся рядом значений индукции в зазоре (рекомендуемый диапазон изменения индукции от B_0 до $2B_0$).

По методике решения прямой задачи определяем для каждого из выбранных значений индукции соответствующую величину магнитодвижущей силы.

Результаты расчета заносим в таблицу 4.1.

По расчётным данным строим кривую зависимости $B_0 = f(F)$ и по ней для значения F' определяем индукцию в зазоре B_0' .

Таблица 4.1 – Результаты расчёта намагничивающей силы катушки в зависимости от индукции в зазоре

B_0 , Тл	H_1 ,	H_2 ,	$H_1 l_1$,	$H_2 l_2$,	F ,
	А/м		А		
1,2	$9,55 \cdot 10^5$	843	1910	403	2313
1,5	$11,93 \cdot 10^5$	2500	2386	1195	3581
1,6	$12,73 \cdot 10^5$	4370	2546	2089	4635
1,7	$13,52 \cdot 10^5$	7780	2704	3719	6423

Из построенной на рисунке 4.3 зависимости $B_0 = f(F)$ видно, что при намагничивающей силе $F' = 4626$ А индукция в зазоре $B_0' = 1,6$ Тл.

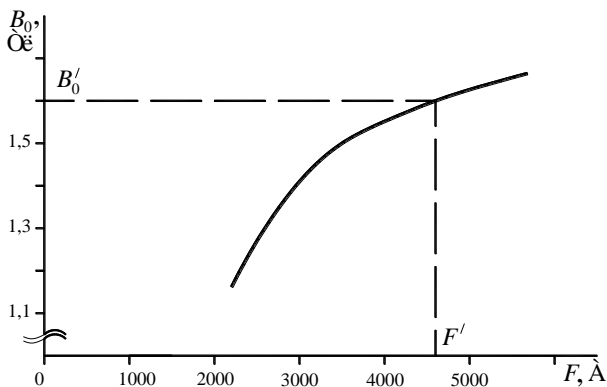


Рисунок 4.3 – Зависимость магнитной индукции в зазоре от намагничивающей силы для заданной цепи

Контрольные вопросы

- 1 Из чего состоит магнитная цепь?
- 2 Основные величины, характеризующие магнитное поле.
- 3 Какие параметры используются для характеристики магнитных свойств материалов?
- 4 Разновидности магнитных цепей.
- 5 Законы Кирхгофа для магнитных цепей.
- 6 Определение направления магнитного потока, создаваемого намагничивающей катушкой.
- 7 Факторы, влияющие на величину силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле.

8 Определение направления электромагнитной силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.

9 Как по известной индукции определяется напряженность поля в воздушной среде?

10 Как по известной индукции определяется напряженность поля в ферромагнитном материале?

11 От чего зависит величина магнитного сопротивления участка магнитопровода?

12 Почему сердечники различных электромагнитных аппаратов выполняются из ферромагнитных материалов?

13 Единицы измерения магнитного потока, напряженности магнитного поля и магнитной индукции.

14 От чего зависит величина магнитной индукции в сечении магнитопровода?

5 ТРАНСФОРМАТОРЫ

5.1 Основные понятия о трансформаторах

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной системы переменного тока в другую. Для усиления магнитного потока и увеличения магнитной связи между обмотками последние размещаются на ферромагнитном сердечнике. Основное назначение трансформаторов – изменять напряжение переменного тока. Однако они могут применяться также для преобразования числа фаз и частоты.

Трансформатор характеризуется номинальными данными, которые указаны на его заводском щитке.

Номинальная мощность трансформатора S_n – полная мощность на зажимах вторичной обмотки, указываемая на щитке и выраженная в вольт–амперах (ВА) или киловольт–амперах (кВА).

Номинальное первичное напряжение $U_{1н}$ – напряжение сети, на которое рассчитан трансформатор.

Номинальное вторичное напряжение $U_{2н}$ – напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и номинальном первичном напряжении.

Номинальные токи обмоток – первичный $I_{1н}$ и вторичный $I_{2н}$ – токи, соответствующие номинальным значениям напряжений и мощности. Так как КПД трансформаторов сравнительно высок, то принимают, что у двухобмоточного трансформатора номинальные мощности обеих обмоток равны.

В цепях трехфазного тока трансформирование электрической энергии осуществляется с помощью трехфазных трансформаторов. При этом принято начала фаз обмотки высшего напряжения обозначать A, B, C , а их концы – X, Y, Z ; начала фаз обмотки низшего напряжения соответственно – a, b, c , а концы – x, y, z . Для трехфазных трансформаторов в качестве номинальных значений напряжений и токов указывают линейные величины.

Как первичные, так и вторичные обмотки трехфазных трансформаторов могут соединяться звездой (символ Υ , а при выведенной нейтральной

точке – Υ) или треугольником (символ Δ). Обычно применяются схемы соединения Υ/Υ , Υ/Δ , Υ/Δ , которые являются основными. Символ способа соединения обмотки высшего напряжения принято указывать в числителе.

Первичную обмотку трансформатора присоединяют к питающей сети переменного тока. Ток первичной обмотки I_1 имеет активную и индуктивную составляющие. При разомкнутой вторичной обмотке (холостой ход), вследствие действия индуктивной составляющей тока I_0 , возникает магнитный поток, намагничивающий сердечник. Активная составляющая тока I_{0a} определяется потерями, возникающими в листах стали при перемагничивании сердечника. Большая часть потока Φ_1 , созданного первичной обмоткой, сцеплена также со вторичной обмоткой фазы и является потоком взаимной индукции между обмотками или основным рабочим потоком Φ . Другая часть полного потока Φ_1 сцеплена только с витками первичной обмотки. Её называют потоком рассеяния. На рисунке 5.1 поток рассеяния первичной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ условно показан линиями магнитной индукции, сцеплёнными только с витками первичной обмотки. Поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ создаётся только током I_1 и не зависит от наличия тока I_2 во вторичной обмотке.

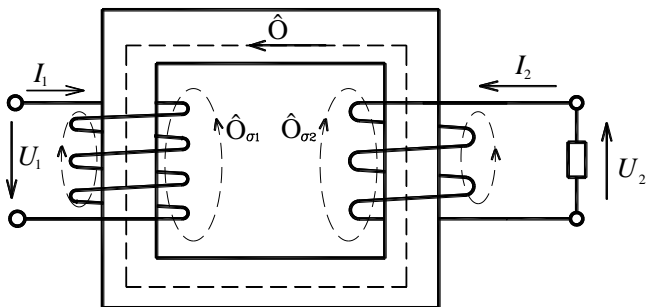


Рисунок 5.1 – Схема устройства трансформатора

Полный поток, сцеплённый с первичной обмоткой,

$$\underline{\Phi}_1 = \underline{\Phi} + \underline{\Phi}_{\sigma 1}. \quad (5.1)$$

В результате изменения во времени потока взаимной индукции Φ в первичной обмотке индуцируется ЭДС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

во вторичной обмотке – ЭДС

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

где w_1 и w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток.

Так как рабочий поток Φ во времени изменяется по синусоидальному закону, то действующие значения ЭДС обмоток будут:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= 4,44 f w_2 \Phi_m, \end{aligned}$$

где Φ_m – амплитудное значение основного рабочего потока в сердечнике.

Из приведённых выражений видно, что ЭДС обмотки пропорциональна числу её витков. ЭДС E_2 вызывает напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки. При холостом ходе $E_2 = U_2$. Если $w_1 > w_2$, $E_1 > E_2$, то трансформатор является понижающим, при $w_1 < w_2$, $E_1 < E_2$ – повышающим.

Для однофазных понижающих трансформаторов отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток называется коэффициентом трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (5.2)$$

Трёхфазные же трансформаторы характеризуются **коэффициентами трансформации**:

а) *фазным* – отношением числа витков $w_{\text{вн}}$ фазы обмотки высшего напряжения (ВН) к числу витков $w_{\text{нн}}$ фазы обмотки низшего напряжения (НН),

$$k_{\phi} = \frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{нн}}} = \frac{U_{\text{фвн}}}{U_{\text{фнн}}}. \quad (5.3)$$

б) *линейным* – отношением линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода,

$$k_{\text{л}} = \frac{U_{\text{лвн}}}{U_{\text{лнн}}}. \quad (5.4)$$

Для схем Y/Y и Δ/Δ фазный и линейный коэффициенты трансформации равны, т. е. $k_{\text{л}} = k_{\phi}$; для схемы Y/ Δ $k_{\text{л}} = \sqrt{3}k_{\phi}$.

При постоянной частоте f питающей сети величина подведённого напряжения U_1 в основном определяет величину потокосцепления первичной обмотки $w_1\Phi$, а следовательно, определяет поток Φ и величины ЭДС E_1 и E_2 . Если пренебречь потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и падением напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки, то можно считать, что ЭДС E_1 первичной обмотки уравнивает приложенное напряжение сети U_1 ($U_1 = -E_1$).

При нагрузке вторичная обмотка трансформатора (см. рисунок 5.1) замыкается на нагрузочное сопротивление, в результате действия ЭДС E_2 возникает ток вторичной обмотки I_2 . Полный поток Φ_2 , сцепленный со вторичной обмоткой,

$$\Phi_2 = \Phi + \Phi_{\sigma 2}, \quad (5.5)$$

где Φ – поток взаимоиנדукции между обмотками, являющийся рабочим

потоком [тот же поток Φ , что и в выражении (5.1)];

$\Phi_{\sigma 2}$ – поток рассеяния вторичной обмотки, на рисунке 5.1 условно показан линиями магнитной индукции, сцепленными только с витками вторичной обмотки.

Поток рассеяния создаётся током I_2 , поэтому при холостом ходе $\Phi_{\sigma 2} = 0$.

При наличии тока во вторичной обмотке поток взаимной индукции Φ создаётся действием намагничивающих сил F_1 и F_2 , где $F_1 = w_1 I_1$, а $F_2 = w_2 I_2$. При этом суммарное действие этих МДС остаётся таким же, как и при холостом ходе:

$$\underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \underline{F}_0, \quad (5.6)$$

или

$$w_1 \underline{I}_1 + w_2 \underline{I}_2 = w_1 \underline{I}_0, \quad (5.6a)$$

где F_0 и I_0 – намагничивающая сила и ток первичной обмотки при холостом ходе.

Разделив выражение (5.6 a) на w_1 , получаем:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \frac{w_2}{w_1} \underline{I}_2 = \underline{I}_0 - \frac{\underline{I}_2}{k}. \quad (5.7)$$

Из выражения (5.7) следует, что ток \underline{I}_1 состоит из двух составляющих: одна из них \underline{I}_0 определяет основной рабочий магнитный поток Φ , а вторая $\left(-\frac{\underline{I}_2}{k}\right)$ компенсирует размагничивающее действие тока вторичной обмотки.

Обозначив $\frac{\underline{I}_2}{k} = \underline{I}'_2$, получим:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2, \quad (5.7a)$$

где \underline{I}'_2 – ток вторичной обмотки, приведенный к числу витков первичной (приведенный ток нагрузки).

Ток холостого хода I_0 составляет лишь несколько процентов тока I_1 . Если им пренебречь, то из выражения (5.7) следует, что токи обмоток I_1 и I_2

обратно пропорциональны числам витков, т. е. $\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}$ или с индексами высшего и низшего напряжения $\left(\frac{I_{\text{вн}}}{I_{\text{вн}}}\right) = \left(\frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{вн}}}\right)$.

При работе трансформатора магнитные потоки Φ , $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, изменяясь, наводят ЭДС в обмотках трансформатора. Полагая, что все электрические и магнитные величины в трансформаторе изменяются по синусоидальному закону, записываем по второму закону Кирхгофа уравнения для первичной и вторичной обмоток в комплексной форме:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = \underline{I}_1 r_1; \quad (5.8)$$

$$\underline{E}_2 + \underline{E}_{\sigma 2} = \underline{I}_2 r_2 + \underline{U}_2, \quad (5.9)$$

где \underline{E}_1 и \underline{E}_2 – ЭДС, наводимые основным рабочим магнитным потоком;

\underline{E}_{σ_1} и \underline{E}_{σ_2} – ЭДС, наводимые соответствующими потоками рассеяния;
 r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток.

При записи уравнений (5.8) и (5.9) напряжение \underline{U}_1 понимается как ЭДС первичной сети, введенная в обмотку извне, а напряжение $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{z}_H$ – как падение напряжения на сопротивлении нагрузки \underline{z}_H .

ЭДС \underline{E}_{σ_1} пропорциональна магнитному потоку $\underline{\Phi}_{\sigma_1}$, а ЭДС \underline{E}_{σ_2} – потоку $\underline{\Phi}_{\sigma_2}$. Поскольку сами $\underline{\Phi}_{\sigma_1}$ и $\underline{\Phi}_{\sigma_2}$ пропорциональны собственным токам I_1 и I_2 , то ЭДС \underline{E}_{σ_1} и \underline{E}_{σ_2} будут также пропорциональны этим токам, т. е. $E_{\sigma_1} = x_1 I_1$; $E_{\sigma_2} = x_2 I_2$; здесь x_1 и x_2 являются коэффициентами пропорциональности между ЭДС и токами и носят название индуктивных сопротивлений рассеяния соответственно первичной и вторичной обмоток.

Учитывая, что поток Φ_{σ_1} совпадает по фазе с током I_1 , поток Φ_{σ_2} – с током I_2 , а ЭДС, наводимые в обмотках, отстают от своих потоков на угол $\pi/2$, получим:

$$\underline{E}_{\sigma_1} = -jx_1 I_1; \quad \underline{E}_{\sigma_2} = -jx_2 I_2.$$

Подставив \underline{E}_{σ_1} и \underline{E}_{σ_2} в выражения (5.8) и (5.9), будем иметь:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{z}_1; \quad (5.10)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{z}_2, \quad (5.11)$$

где $\underline{z}_1 = r_1 + jx_1$ и $\underline{z}_2 = r_2 + jx_2$ – комплексные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Уравнения (5.10) и (5.11) носят название уравнений равновесия напряжения обмоток. Эти уравнения совместно с уравнением (5.7а) описывают рабочий процесс в трансформаторе в режиме нагрузки и являются основными уравнениями трансформатора.

Согласно уравнению (5.10) напряжение \underline{U}_1 , приложенное к первичной обмотке, уравновешивается наведенной в ней ЭДС \underline{E}_1 и падением напряжения $\underline{I}_1 \underline{z}_1$. При работе трансформатора в диапазоне от холостого хода до нагрузок, не превышающих номинальную, падение напряжения относительно мало (2–7 %), и поэтому приближенно можно принять, что $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$. Так как $E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$, то при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ можно считать, что в указанном диапазоне нагрузок величина Φ_m остается практически постоянной. При этом намагничивающий ток также практически не изменяется и равен току холостого хода I_0 .

Пренебрегая потерями, получаем для однофазного трансформатора (или для одной из фаз трехфазного трансформатора) $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Если при $U_1 = \text{const}$ изменяется частота сети f или число витков первичной обмотки трансформатора w_1 , то для того чтобы обеспечить $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$, магнитный поток Φ_m также изменяется. При уменьшении f или w_1 поток увеличивается и наоборот.

5.2 Приведенный трансформатор и его схема замещения

В реальном трансформаторе числа витков $w_1 \neq w_2$, поэтому $E_1 \neq E_2$, $I_1 \neq I_2$ и, как следствие, различны активные r_1 , r_2 и реактивные x_1 , x_2 сопротивления

обмоток. Это затрудняет количественный анализ процессов, происходящих в трансформаторе.

Чтобы избежать этих затруднений, реальный трансформатор, имеющий различные числа витков первичной и вторичной обмоток, заменяется эквивалентным (приведенным) трансформатором, у которого $w_1 = w_2$ и $k = 1$. Указанная замена правомерна, если все энергетические и электромагнитные соотношения в реальном и приведенном трансформаторах одинаковы и, следовательно, не отразятся на режиме работы первичной обмотки. Исходя из этого определяют токи, ЭДС, напряжения и сопротивления вторичной цепи приведенного трансформатора. Эти величины называются приведенными к числу витков первичной обмотки или просто приведенными и обозначаются они соответствующими буквами со штрихом. Определим эти величины. Так как $w'_2 = w_1$, то $E'_2 = E_1 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = kE_2$. Аналогично $U'_2 = kU_2$.

Магнитодвижущая сила вторичной обмотки приведенного трансформатора должна быть равна МДС вторичной обмотки реального трансформатора:

$$I'_2 w_1 = I_2 w_2, \quad \text{откуда} \quad I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}.$$

Потери во вторичной обмотке реального и приведенного трансформаторов должны быть одинаковыми:

$$(I'_2)^2 r'_2 = I_2^2 r_2,$$

$$r'_2 = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 r_2 = k^2 r_2.$$

Для того чтобы отношения между активными и индуктивными сопротивлениями рассеяния у трансформаторов сохранились, необходимо, чтобы выполнялось равенство $x'_2 = k^2 x_2$. С учетом отмеченного следует, что сопротивление z'_2 вторичной обмотки приведенного трансформатора $z'_2 = k^2 z_2$, а приведенное сопротивление нагрузки $z'_H = k^2 z_H$.

Система уравнений, описывающих рабочий процесс в приведенном трансформаторе, приобретает вид:

$$U_1 = -E_1 + I_1 z_{11};$$

$$\begin{aligned} \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{aligned} \quad (5.12)$$

Приведение величин вторичной обмотки к числу витков первичной позволяет построить удобную для расчетов схему замещения трансформатора.

В реальных трансформаторах между первичной и вторичной обмотками существует магнитная связь. При расчетах режимов работы и характеристик трансформаторов удобно эту связь между обмотками заменить электрической. В этом случае исследование работы упрощается и сводится к расчетам относительно простой электрической цепи. Электрическая схема, в которой магнитная связь между обмотками трансформатора заменена электрической, носит название схемы замещения трансформатора.

Структуру этой схемы (рисунок 5.2) выбирают таким образом, чтобы ей соответствовали уравнения системы (5.12), описывающие рабочий процесс в трансформаторе.

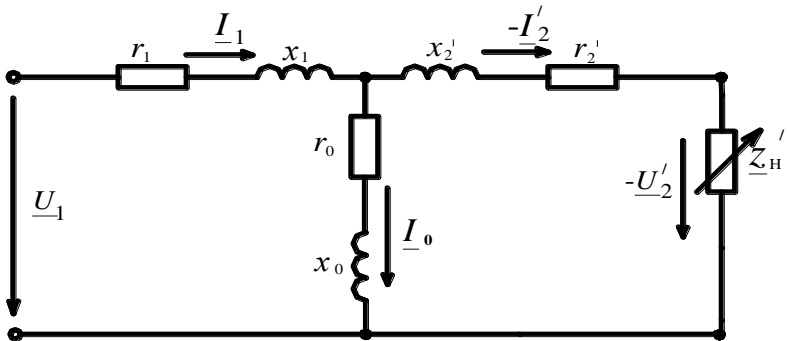


Рисунок 5.2 – Схема замещения трансформатора

На схеме замещения с помощью параметров r_1 , x_1 , r_2' и x_2' учитывают сопротивления обмоток приведенного трансформатора, а с помощью r_0 , x_0 – параметры намагничивающей ветви, причем $r_1 = r_2' \ll r_0$ и $x_1 = x_2' \ll x_0$.

Сопротивление r_0 представляет собой некоторое фиктивное сопротивление, посредством которого учитывают потери в стали трансформатора, т. е. $\Delta P_{\infty} = I_0^2 r_0$.

Величина ΔP_{∞} зависит от марки, толщины листа электротехнической стали, из которой набран магнитопровод, а также от значений магнитной индукции в сердечнике и частоты перемагничивания (частоты тока первичной обмотки).

Сопротивление x_0 называется индуктивным сопротивлением взаимной индукции обмоток трансформатора. Это сопротивление обусловлено

главным магнитным потоком, который замыкается по магнитопроводу трансформатора.

Комплексные сопротивления первичной обмотки $\underline{z}_1 = r_1 + jx_1$ и вторичной обмотки $\underline{z}'_2 = r'_2 + jx'_2$ являются постоянными. Они практически не зависят от токов и напряжения U_1 . Значения z_1 и z'_2 примерно одинаковы, а их индуктивные составляющие x_1 и x'_2 для силовых трансформаторов обычно больше активных сопротивлений r_1 и r'_2 .

Сопротивления r_0 и x_0 существенно зависят от подведенного напряжения U_1 . Связано это с тем, что с увеличением U_1 возрастает ЭДС E_1 и, следовательно, магнитный поток Φ_m , а начиная с некоторого значения магнитного потока происходит насыщение магнитопровода и намагничивающий ток растёт быстрее, чем U_1 . Таким образом, с ростом U_1 сопротивления r_0 и x_0 уменьшаются.

Обычно исследуется работа трансформатора при $U_1 = \text{const}$. В этом случае можно принимать $z_0 = \text{const}$.

В трехфазном трансформаторе схема замещения, приведенная на рисунке 5.2, справедлива для одной фазы.

При расчетах режимов работы трансформаторов с использованием схемы замещения её параметры должны быть известны. Задаваясь сопротивлением нагрузки, находим токи, напряжения, потери мощности и другие величины.

Параметры схемы замещения могут быть найдены расчетным или опытным путём.

При упрощенном анализе процессов в трансформаторе намагничивающую ветвь на схеме замещения можно исключить. Это возможно на основании того, что сопротивление намагничивающей ветви z_0 велико, а ток в ней I_0 очень мал и им можно пренебречь. В этом случае имеем упрощенную схему замещения (рисунок 5.3), состоящую из последовательно соединенных сопротивлений r_k и x_k , где $r_k = r_1 + r'_2$, а $x_k = x_1 + x'_2$.

Сопротивления r_k и x_k являются сопротивлениями короткого замыкания: активным – r_k и индуктивным – x_k .

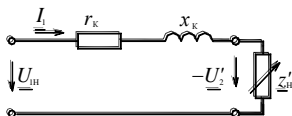


Рисунок 5.3 – Упрощенная схема замещения трансформатора

5.3 Режимы работы трансформатора

В зависимости от величины сопротивления нагрузки трансформатор может работать в трех режимах:

- 1 Холостой ход при сопротивлении нагрузки $z_n = \infty$.

2 Короткое замыкание при $z_n = 0$.

3 Нагрузочный режим при $0 < z_n < \infty$.

Имея параметры схемы замещения, можно анализировать любой режим работы трансформатора. Сами параметры определяют на основе опытов холостого хода и короткого замыкания. При холостом ходе вторичная обмотка трансформатора является разомкнутой, вследствие чего ток $I'_2 = 0$. Система уравнений (5.12) при холостом ходе трансформатора имеет вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 z_1; \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Опыт холостого хода трансформатора проводят для определения коэффициента трансформации, мощности потерь в стали и параметров намагничивающей ветви схемы замещения, проводят его обычно при номинальном напряжении первичной обмотки.

Для однофазного трансформатора на основе данных опыта холостого хода можно рассчитать:

- коэффициент трансформации, $k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$;
- процентное значение тока холостого хода, $i_0 = \left(\frac{I_0}{I_{н1}} \right) \cdot 100\%$;
- активное сопротивление ветви намагничивания r_0 , определяемое из условия $P_0 = I_0^2 r_0$, $r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$;
- полное сопротивление ветви намагничивания, $z_0 = \frac{U_{и1}}{I_0}$;
- индуктивное сопротивление ветви намагничивания, $x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}$.

Часто определяют также коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{(U_{и1} I_0)}.$$

В некоторых случаях опыт холостого хода проводят для нескольких значений напряжения первичной обмотки: от $\underline{U}_1 \approx 0,3 \underline{U}_{н1}$ до $\underline{U}_1 \approx 1,1 \underline{U}_{н1}$. По полученным данным строят характеристики холостого хода, которые представляют собой зависимость P_0 , z_0 , r_0 и $\cos \varphi_0$ в функции от напряжения U_1 . Пользуясь характеристиками холостого хода, можно установить значения определяемых величин при любом значении напряжения U_1 .

Для определения напряжения короткого замыкания, потерь в обмотках и сопротивлений r_k и x_k проводят опыт короткого замыкания. При этом к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение, чтобы токи обмоток короткозамкнутого трансформатора были равны своим номинальным величинам, т. е. $I_{1к} = I_{н1}$, $I_{2к} = I_{н2}$. Напряжение на первичной

обмотке, при котором отмеченные условия выполняются, называется номинальным напряжением короткого замыкания $U_{кн}$.

Учитывая, что $U_{кн}$ обычно составляет всего 5–10 % от $U_{нн}$, поток взаимоиנדукции сердечника трансформатора при опыте короткого замыкания в десятки раз меньше, чем в номинальном режиме, и сталь трансформатора ненасыщена. Поэтому потерями в стали пренебрегают и считают, что вся подводимая к первичной обмотке мощность $P_{кн}$ расходуется на нагрев обмоток и определяет величину активного сопротивления короткого замыкания r_k .

Во время проведения опыта измеряют напряжение $U_{кн}$, ток $I_{кн} = I_{нн}$ и мощность $P_{кн}$ первичной обмотки. По этим данным можно определить:

– процентное напряжение короткого замыкания, $u_{\xi} = \frac{U_{\xi f}}{U_{\text{нн}}} \cdot 100 \%$;

– активное сопротивление короткого замыкания, $r_k = \frac{P_{кн}}{I_{нн}^2}$;

– активные сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток, приблизительно равные половине сопротивления короткого замыкания, $r_1 \approx r_2' \approx \frac{r_k}{2}$;

– полное сопротивление короткого замыкания, $z_{\xi} = \frac{U_{\xi f}}{I_{\text{нн}}}$;

– индуктивное сопротивление короткого замыкания, $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$;

– индуктивное сопротивление первичной и приведенной вторичной обмоток, приблизительно равны половине индуктивного сопротивления короткого замыкания, $x_1 \approx x_2' \approx \frac{x_k}{2}$;

– сопротивления вторичной обмотки реального трансформатора:

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} ; x_2 = \frac{x_2'}{k^2} ;$$

– индуктивное, активное и полное процентные напряжения короткого замыкания:

$$u_{\xi\lambda} = \frac{I_{\text{нн}} r_{\xi}}{U_{\text{нн}}} \cdot 100 \%$$

$$u_{\xi D} = \frac{I_{\text{нн}} x_{\xi}}{U_{\text{нн}}} \cdot 100 \%$$

$$u_{\xi} = \frac{I_{\text{нн}} z_{\xi}}{U_{\text{нн}}} \cdot 100 \%$$

В нагрузочном режиме очень важно знать, как влияют параметры нагрузки на КПД и изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки.

Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение активной мощности, передаваемой нагрузке, к активной мощности, подводимой к трансформатору.

КПД трансформатора имеет высокое значение. У силовых трансформаторов небольшой мощности он составляет примерно 0,95, а у трансформаторов мощностью в несколько десятков тысяч киловольт-ампер доходит до 0,995.

Определение КПД по формуле $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ с использованием непосредственно измеренных мощностей P_1 и P_2 даёт большую погрешность. Удобнее эту формулу представить в другом виде:

$$\eta = \frac{P_2}{(P_2 + \sum \Delta P)}, \quad (5.14)$$

где $\sum \Delta P$ – сумма потерь в трансформаторе.

В трансформаторе имеются два вида потерь: магнитные потери, вызванные прохождением магнитного потока по магнитопроводу, и электрические потери, возникающие при протекании тока по обмоткам.

Так как магнитный поток трансформатора при $U_1 = \text{const}$ и изменении вторичного тока от нуля до номинального практически остаётся постоянным, то и магнитные потери $\Delta P_{\text{ст}}$ в этом диапазоне нагрузок также можно принять постоянными и равными потерям холостого хода P_0 .

Электрические потери в меди обмоток $\Delta P_{\text{м}}$ пропорциональны квадрату тока. Их удобно выразить через потери короткого замыкания $P_{\text{кн}}$, полученные при номинальном токе,

$$\Delta P_1 = I_1^2 r_{\text{к}} = \beta^2 (I_{\text{н}}^2 r_{\text{к}}) = \beta^2 P_{\text{кн}},$$

где β – коэффициент нагрузки, $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{н}}}$.

Учитывая, что $P_2 = \beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 = P_1 - \sum \Delta P$, получаем расчетную формулу для определения КПД,

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}, \quad (5.15)$$

где $S_{\text{н}}$ – номинальная полная мощность трансформатора;

φ_2 – угол сдвига фаз между напряжением и током в нагрузке.

Максимум КПД можно найти, приравняв первую производную $\frac{d\eta}{d\beta}$ к нулю. При этом получим, что КПД имеет максимальные значения при такой нагрузке, когда постоянные (не зависящие от тока) потери P_0 равны переменным (зависящим от тока) $\beta_{\text{опт}}^2 P_{\text{кн}}$, т. е.

$$P_0 = \beta_{\text{опт}}^2 P_{\text{кн}}, \text{ откуда } \beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}}.$$

У современных силовых масляных трансформаторов $\beta_{\text{опт}} = 0,5 \dots 0,7$. С такой нагрузкой трансформатор наиболее часто работает в процессе эксплуатации.

Характерной особенностью зависимости $\eta = f(\beta)$ для трансформаторов является малое изменение их КПД при значительных колебаниях коэффициента нагрузки β .

На КПД трансформатора оказывает влияние характер нагрузки: с повышением $\cos \varphi_2$ КПД увеличивается, так как при этом возрастает полезная активная мощность, а потери при $\beta = \text{const}$ остаются неизменными.

График зависимости $\eta = f(\beta)$ изображен на рисунке 5.4.

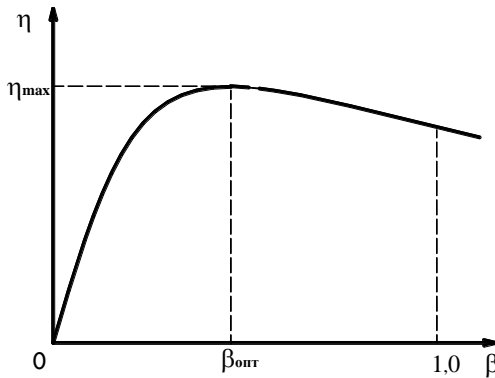


Рисунок 5.4 – Кривая изменения КПД трансформатора в зависимости от коэффициента нагрузки

Для определения процентного изменения напряжения на вторичной обмотке однофазного трансформатора используют уравнение

$$\Delta u\% = \beta(u_{\text{кА}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кВ}} \sin \varphi_2), \quad (5.16)$$

где $u_{\text{кА}}$ и $u_{\text{кВ}}$ — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах.

Определение этих величин уже ранее рассматривалось.

Из уравнения (5.16) следует, что изменение напряжения трансформатора зависит от коэффициента нагрузки (β), её характера (угла φ_2) и составляющих напряжения короткого замыкания ($u_{\text{кА}}$ и $u_{\text{кВ}}$).

Для трехфазного трансформатора при соединении первичной обмотки звездой уравнение (5.16) справедливо для фазы, при этом

$$u_{\text{ЭА}} = \frac{I_{\text{II}} r_{\text{Э}}}{U_{\text{II}0}} \cdot 100 \% , \quad u_{\text{ЭВ}} = \frac{I_{\text{II}} x_{\text{Э}}}{U_{\text{II}0}} \cdot 100 \% ,$$

где $U_{\text{II}0}$ – номинальное фазное напряжение первичной обмотки.

Если значение $\Delta u\%$ найдено, то вторичное напряжение однофазного трансформатора

$$U_2 = \frac{U_{\text{II}}}{k} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right). \quad (5.17)$$

Внешней характеристикой трансформатора является зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi_2 = \text{const}$ (рисунок 5.5).

Для построения внешней характеристики можно использовать уравнения (5.16) и (5.17).

При активно-емкостной нагрузке и определенном соотношении r_{H} и x_{CH} можно получить постоянство U_2 при росте I_2 . Это достигается, когда угол φ_2 имеет определенную величину и является отрицательным. Отмеченное следует из уравнения (5.16), приравняв нулю $\Delta u\%$. Учитывая что $\beta \neq 0$, получаем:

$$u_{\text{КА}} \cos\varphi_2 + u_{\text{КР}} \sin\varphi_2 = 0 \quad \text{и} \quad \text{tg}\varphi_2 = -\frac{u_{\text{КА}}}{u_{\text{КР}}}, \quad \varphi_2 = \arctg\left(-\frac{u_{\text{ЭА}}}{u_{\text{ЭВ}}}\right).$$

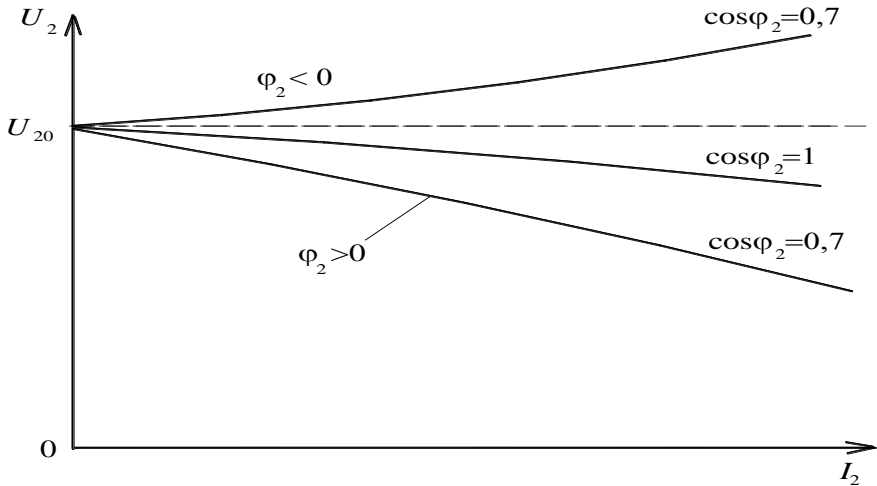


Рисунок 5.5 – Внешние характеристики трансформаторов средней и большой мощностей при различных характерах нагрузки

Пример 3.1. Расчёт параметров трёхфазного трансформатора

Трёхфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{\text{H}} = 63000$ ВА, номинальные напряжения $U_{\text{IН}} = 10000$ В и $U_{\text{2Н}} = U_{20} =$

= 400 В, потери холостого хода $P_0 = 265$ Вт, потери короткого замыкания $P_{кн} = 1280$ Вт, напряжение короткого замыкания u_k составляет 5,5 % от номинального значения, ток холостого хода i_0 составляет 2,8 % от номинальной величины. Определить: а) номинальные фазные напряжения первичной $U_{1\text{нф}}$ и вторичной $U_{2\text{нф}}$ обмоток при схеме соединения Y/Δ ; б) фазный k_ϕ и линейный k_L коэффициенты трансформации; в) номинальные токи первичной $I_{1н}$ и вторичной $I_{2н}$ обмоток; г) КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = 0,5$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$; д) абсолютное значение напряжения короткого замыкания; е) параметры схемы замещения трансформатора; ж) процентное изменение напряжения на вторичной обмотке при $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$ и $\varphi_2 < 0$) и номинальном токе; рассчитать и построить внешнюю характеристику для указанных в предыдущем пункте видов нагрузки.

Решение. Так как первичная обмотка соединена звездой, то фазное напряжение первичной обмотки

$$U_{1\phi} = U_{1л} / \sqrt{3} = 10000 / \sqrt{3} = 5780 \text{ В.}$$

При соединении вторичных обмоток треугольником имеем

$$U_{2\text{нф}} = U_{2н} = 400 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации фазных напряжений

$$k_\phi = U_{1\text{нф}} / U_{2\text{нф}} = 5780 / 400 = 14,45.$$

Коэффициент трансформации линейных напряжений

$$k_L = U_{1л} / U_{2л} = 10000 / 400 = 25.$$

Линейный номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1л} = S_{нл} / (\sqrt{3} U_{1л}) = 63000 / (\sqrt{3} \cdot 10000) = 3,64 \text{ А.}$$

Линейный номинальный ток вторичной обмотки

$$I_{2л} = S_{нл} / (\sqrt{3} U_{2л}) = 63000 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 91 \text{ А.}$$

КПД трансформатора при заданной нагрузке с $\beta = 0,5$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ можно определить из выражения (5.15):

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_{нл} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}} = 1 - \frac{265 + 0,5^2 \cdot 1280}{0,5 \cdot 63000 \cdot 0,8 + 265 + 0,5^2 \cdot 1280} = 0,81.$$

Абсолютное значение фазного напряжения короткого замыкания

$$U_{\text{фкн}} = u_k U_{1\text{нф}} / 100 = 5,5 \cdot 5780 / 100 = 317,9 \text{ В.}$$

Схема замещения трансформатора приведена на рисунке 5.6.

Определение параметров схемы замещения начинаем с расчёта полного сопротивления намагничивающей ветви:

$$z_0 = 100 U_{1\text{нф}} / (i_0 I_{1л}) = 100 \cdot 5780 / (2,8 \cdot 3,64) = 56711 \text{ Ом.}$$

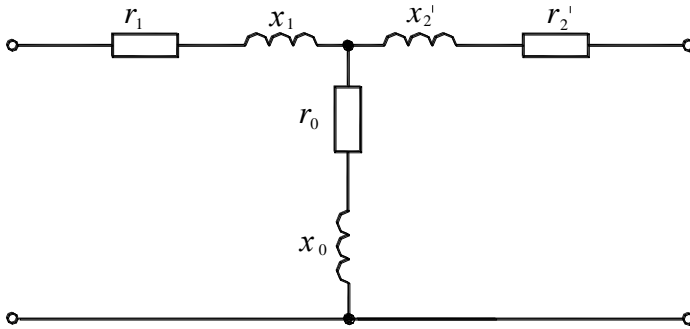


Рисунок 5.6 – Схема замещения одной фазы трёхфазного трансформатора

Активное сопротивление намагничивающей ветви

$$r_0 = P_0 / (3I_0^2) = 10^4 P_0 / (3i_0^2 I_{\text{IH}}^2) = 10^4 \cdot 265 / (3 \cdot 2,8^2 \cdot 3,64^2) = 8503 \hat{\text{I}} \hat{\text{I}} .$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{56711^2 - 8503^2} = 56070 \hat{\text{I}} \hat{\text{I}} .$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{\text{к}} = U_{\text{ФКН}} / I_{\text{IH}} = 317,9 / 3,64 = 87,3 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_{\text{к}} = P_{\text{к}} / (3I_{\text{IH}}^2) = 1280 / (3 \cdot 3,64^2) = 32,2 \hat{\text{I}} \hat{\text{I}}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2} = \sqrt{87,3^2 - 32,2^2} = 81,1 \hat{\text{I}} \hat{\text{I}}$$

Активные сопротивления обмоток приведенного трансформатора

$$r_1 = r_2' = r_{\text{к}} / 2 = 32,2 / 2 = 16,1 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора

$$x_1 = x_2' = x_{\text{к}} / 2 = 81,1 / 2 = 40,5 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки реального трансформатора

$$r_2 = \frac{r_2'}{k_{\Phi}^2}, \quad x_2 = \frac{x_2'}{k_{\Phi}^2} .$$

Процентное изменение напряжения при номинальном токе ($\beta = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$) определяем, используя выражение (5.16). Для активно-индуктивной нагрузки ($\varphi_2 > 0$) получаем:

$$\Delta u \% = \beta \left(\frac{I_{\text{IH}} r_{\text{E}} \cos \varphi_2}{U_{\text{IH0}}} + \frac{I_{\text{II}} x_{\text{E}} \sin \varphi_2}{U_{\text{IH0}}} \right) \cdot 100 \% =$$

$$1 \cdot \sqrt{3} \left(\frac{3,64 \cdot 32,2 \cdot 0,8}{10000} + \frac{3,64 \cdot 81,1 \cdot 0,6}{10000} \right) \cdot 100 \% = 4,68 \% ,$$

для активно-ёмкостной нагрузки ($\varphi_2 < 0$)

$$\Delta u \% = \beta \left(\frac{I_{\text{IH}} r_{\text{E}} \cos \varphi_2}{U_{\text{IH0}}} + \frac{I_{\text{II}} x_{\text{E}} \sin \varphi_2}{U_{\text{IH0}}} \right) \cdot 100 \% =$$

$$= 1 \cdot \sqrt{3} \left(\frac{3,64 \cdot 32,2 \cdot 0,8}{10000} - \frac{3,64 \cdot 81,1 \cdot 0,6}{10000} \right) \cdot 100 \% = -1,44 \% .$$

Напряжение на вторичной обмотке при активно-индуктивной нагрузке находим из выражения (5.17):

$$U_2 = \frac{U_{\text{IHФ}}}{k_{\Phi}} \left(1 - \frac{\Delta u \%}{100} \right) = \frac{5780}{14,45} \left(1 - \frac{4,68}{100} \right) = 381,2 \text{ В},$$

при активно-ёмкостной нагрузке

$$U_2 = \frac{U_{\text{IHФ}}}{k_{\text{II}}} \left(1 - \frac{\Delta u \%}{100} \right) = \frac{5780}{14,45} \left(1 + \frac{1,44}{100} \right) = 405,7 \text{ В}.$$

Контрольные вопросы

- 1 Назначение трансформатора. Чем на практике обусловлена необходимость изменения напряжения?
- 2 Какие функции выполняет сердечник в трансформаторе?
- 3 Почему сердечник трансформатора набирают из тонких пластин?
- 4 Принцип работы трансформатора.
- 5 От чего зависит величина ЭДС в обмотке трансформатора?
- 6 От чего зависит величина магнитной индукции в сердечнике трансформатора?
- 7 Коэффициент трансформации трансформатора.
- 8 Приведённые параметры вторичной обмотки трансформатора и их определение.
- 9 Опыт холостого хода трансформатора.
- 10 Опыт короткого замыкания трансформатора.
- 11 Почему увеличение тока во вторичной обмотке вызывает возрастание тока в первичной обмотке?
- 12 Почему рост тока во вторичной обмотке приводит к изменению напряжения на выходе трансформатора?
- 13 Влияние характера нагрузки на внешнюю характеристику трансформатора.

- 14 Схема замещения трансформатора.
- 15 Определение параметров схемы замещения трансформатора.
- 16 Условие максимума КПД трансформатора.
- 17 Постоянные потери в трансформаторе.
- 18 Переменные потери в трансформаторе.
- 19 От чего зависят потери в обмотках трансформатора?
- 20 От чего зависят потери в сердечнике трансформатора?
- 21 Почему не рекомендуется работа трансформатора с большой недогрузкой?
- 22 Процентное изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.
- 23 Определение КПД трансформатора.
- 24 Перечислите и поясните номинальные данные трёхфазного трансформатора.
- 25 При каких условиях с ростом тока нагрузки напряжение на выходе трансформатора не изменяется?

6 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

6.1 Принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронная машина – это машина переменного тока, у которой частота вращения ротора отличается от частоты вращения магнитного поля статора.

В большинстве случаев асинхронная машина используется как двигатель. Наиболее широкое распространение нашли трехфазные асинхронные двигатели. Однофазные асинхронные двигатели, как правило, выполняются небольшой мощности (примерно до 0,5 кВт).

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из двух частей: неподвижной – статора и вращающейся – ротора.

Статор трехфазного двигателя представляет собой полый цилиндр, набранный из листов электротехнической стали, на внутренней поверхности которого имеются пазы. Внутри пазов укладывается обмотка, которая может соединяться звездой или треугольником. Она состоит из отдельных катушек (секций), которые объединены в три фазы. В двухполюсных машинах фазы на статоре располагаются со сдвигом в пространстве под углом в 120° . Рабочее напряжение фазы статорной обмотки большинства двигателей составляет 220 В, поэтому при питании машины от трехфазной сети с напряжением 380 В фазы статора соединяются звездой, а при сетевом напряжении 220 В – треугольником.

Внутри статора находится ротор, в пазах которого также размещается обмотка. В зависимости от исполнения этой обмотки асинхронные двигатели делятся на двигатели с фазным и короткозамкнутым ротором. На практике наибольшее распространение имеют последние, в них обмотка ротора выполняется в виде «беличьей клетки».

При питании обмотки статора трехфазным током создается вращающееся магнитное поле (поток Φ), частота вращения которого (синхронная)

$$n_1 = 60f_1/p, \quad (6.1)$$

где f_1 – частота тока сети;

p – число пар полюсов статорной обмотки.

Вращающееся поле статора индуцирует в проводниках ротора ЭДС (направление ЭДС определяется по правилу правой руки), и по ним протекает ток. Активная составляющая этого тока совпадает по фазе с ЭДС.

В результате взаимодействия отмеченной составляющей с потоком статора создается электромагнитная сила (ее направление определяется по правилу левой руки) и электромагнитный момент M , под действием которого ротор приходит во вращение с частотой n в ту же сторону, что и поток Φ .

По мере разгона ротора его частота вращения n увеличивается, но даже при отсутствии нагрузки на валу (холостой ход) она не сможет достигнуть частоты вращения поля статора n_1 . Объясняется это тем, что ток в роторе и, следовательно, вращающий момент могут возникать только в том случае, если магнитное поле пересекает проводники ротора, т. е. если $n \neq n_1$. При холостом ходе в машине существует небольшой тормозной момент, обусловленный механическим трением в подшипниках и ротора о воздух, и для его преодоления двигатель должен развивать вращающий момент, а поэтому, при увеличении нагрузочного момента на валу двигателя M_2 должен увеличиваться и вращающий момент двигателя ($M \approx M_2$), вследствие чего возрастает разность $n_1 - n$. Таким образом, для рассматриваемого двигателя характерной особенностью является несинхронное (асинхронное) вращение его ротора с магнитным полем, созданным токами статорной обмотки. Отсюда и его название – асинхронный двигатель.

В номинальном режиме частота вращения ротора n_n на несколько процентов меньше, чем n_1 . Данный факт позволяет определять число пар полюсов двигателя, если известна номинальная частота вращения ротора. Для определения количества пар полюсов достаточно взять ближайшую большую (к заданной n_n) синхронную частоту n_1 и по формуле (6.1) рассчитать p .

Относительную разность частот вращения статорного магнитного поля и ротора обозначают через s и называют скольжением,

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (6.2)$$

Скольжение часто выражают в процентах:

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% . \quad (6.3)$$

Частота вращения ротора n , выраженная через скольжение s , согласно (6.2) $n = n_1(1 - s)$.

При работе асинхронного двигателя между его обмотками статора и ротора осуществляется постоянная трансформаторная взаимосвязь. Однако аналогия между асинхронной машиной и трансформатором при этом далеко не полная. Основные отличия:

1) в трансформаторе обмотка каждой фазы расположена на отдельном стержне, а распределенные фазные обмотки асинхронного двигателя имеют пространственный сдвиг осей и заложены в пазах сердечника статора: вследствие этого в сердечнике трехфазной асинхронной машины поток вращается, а в сердечнике трехфазного трансформатора пульсирует;

2) в трансформаторе нагрузка присоединяется ко вторичной обмотке, а в

асинхронном двигателе обмотка ротора замкнута накоротко, и в результате взаимодействия её тока с вращающимся потоком машины создается электромагнитный момент, уравновешивающийся моментом нагрузки на валу;

3) в трансформаторе первичная и вторичная обмотки неподвижны, а у асинхронной машины обмотка ротора перемещается относительно обмотки статора, в результате этого величина и частота ЭДС ротора переменные, зависят от скольжения;

4) в магнитопроводе асинхронной машины имеется большой воздушный зазор, вследствие этого величина намагничивающего тока и параметры, характеризующие ветвь намагничивания, у асинхронной машины и трансформатора различны. Ток холостого хода у асинхронного двигателя достигает 30–50 %, а у силового трансформатора – 3–7 % от номинального.

На практике асинхронные машины используют в основном как двигатели, они потребляют около 50 % электрической энергии, вырабатываемой всеми электрическими станциями. Потребность в асинхронных двигателях непрерывно растёт. Такое широкое распространение они получили из-за своей конструктивной простоты, низкой стоимости, высокой эксплуатационной надежности. Широкий диапазон мощностей, на которые выпускают эти двигатели, – от долей ватта до нескольких тысяч киловатт. Они имеют относительно высокий КПД: при мощностях более 1 кВт $\eta = 0,7 \dots 0,95$ и только в микродвигателях он снижается до 0,2–0,65.

Наряду с большими достоинствами асинхронные двигатели имеют и некоторые недостатки. К их числу следует отнести потребление из сети реактивного тока, необходимого для создания вращающегося магнитного потока, в результате чего асинхронные двигатели работают с $\cos\varphi \neq 1$. В двигателях мощностью более 1 кВт $\cos\varphi = 0,7 \dots 0,9$, а в микродвигателях $\cos\varphi = 0,3 \dots 0,7$. Кроме того, по возможности регулировать частоту вращения они уступают двигателям постоянного тока.

6.2 Асинхронная машина при неподвижном роторе

Если к обмотке статора подвести напряжение сети U_1 , а обмотку ротора разомкнуть (например, в машине с фазным ротором с помощью подъема щёток), то за счет U_1 в обмотке статора будет ток холостого хода I_0 , который создает вращающееся магнитное поле, часть которого Φ сцепляется с обеими обмотками, а часть $\Phi_{ст}$ – только с обмоткой статора. Поток Φ называется так же, как и в трансформаторе, основным потоком, поток $\Phi_{ст}$ – потоком рассеяния. Первый наводит ЭДС E_1 и E_2 в обмотках статора и ротора, второй – ЭДС рассеяния $\underline{E}_{ст} = -jI_0X_1$ только в обмотке статора.

Взаимозависимость между подведенным напряжением U_1 и ЭДС определяется так же, как и в трансформаторе, а именно:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_0 \underline{z}_1, \quad (6.4)$$

где U_1 – фазное напряжение источника питания;

E_1 – фазная ЭДС статорной обмотки;

$\underline{z}_1 = r_1 + jx_1$ – комплекс полного сопротивления фазной обмотки статора.

В рассматриваемых условиях асинхронная машина представляет собой статический трансформатор при холостом ходе. Но при этом нужно учитывать, что асинхронная машина на пути вращающегося потока имеет двойной воздушный зазор и поэтому её ток I_0 гораздо больше, чем в трансформаторах, что и отмечалось уже ранее.

В уравнении (6.4) величина $I_0 z_1$ мала, в зависимости от мощности составляет 2–8 % от напряжения U_1 , поэтому можно считать, что

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1. \quad (6.5)$$

ЭДС, наводимые основным потоком Φ в обмотках, будут:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi_m; \\ E_2 &= 4,44 f_1 w_2 k_{\text{об2}} \Phi_m, \end{aligned} \quad (6.6)$$

где f_1 – частота тока сети;

w_1, w_2 – число витков фазных обмоток статора и ротора;

$k_{\text{об1}}, k_{\text{об2}}$ – обмоточные коэффициенты соответствующих обмоток;

Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока.

Если считать, что $f = \text{const}$, то в асинхронной машине $E_1 \equiv \Phi_m$. Сопоставляя эту зависимость с выражением (6.5), видим, что основной магнитный поток статора, как и в трансформаторе, определяется главным образом приложенным напряжением. В дальнейшем этот вывод распространяется и на режимы работы машины под нагрузкой вплоть до номинальной.

Отношение $\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{\text{об1}} w_1}{k_{\text{об2}} w_2} = k_e$ называется коэффициентом

трансформации ЭДС.

Так как при разомкнутой обмотке ротора $n = 0$, то мощность P_0 , подводимая к машине из сети, идет только на покрытие потерь, а именно:

а) потерь в меди статора $3I_{\text{оф}}^2 r_1$, (3 – число фаз, $I_{\text{оф}}$ – фазный ток холостого хода);

б) потери в стали статора $\Delta P_{\text{ст1}}$;

в) потери в стали ротора $\Delta P_{\text{ст2}}$.

Следовательно, $P_0 = 3I_{\text{оф}}^2 r_1 + \Delta P_{\text{н01}} + \Delta P_{\text{н02}}$.

Если роторную обмотку машины замкнуть, а сам ротор затормозить, то машина будет работать в режиме короткого замыкания. Относительное значение напряжения короткого замыкания, при котором $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$ у неё больше, чем у трансформатора из-за больших магнитных

потоков рассеяния.

Физическая сущность явлений при коротком замыкании асинхронной машины принципиально та же, что и в трансформаторе. Если пренебречь для режима короткого замыкания МДС, создающей основной магнитный поток, то можно записать

$$\underline{F}_1 = -\underline{F}_2,$$

где F_1 и F_2 – намагничивающие силы статорной и роторной обмоток,

$$F_1 = 0,9m_1w_1k_{\text{об1}}I_1; \quad F_2 = 0,9m_2w_2k_{\text{об2}}I_2,$$

где m_1 и m_2 – числа фаз соответствующих обмоток.

Из равенства МДС F_1 и F_2 можно определить коэффициент трансформации токов,

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1w_1k_{\text{об1}}}{m_2w_2k_{\text{об2}}}.$$

В асинхронных машинах для удобства сопоставления величин статорной и роторной обмоток и изображения их в одном масштабе на диаграмме, а также для получения более простой схемы замещения осуществляют приведение параметров роторной обмотки к числу фаз и числу витков обмотки статора (по аналогии с трансформатором). При этом мощность, потери и МДС в приведенном роторе должны сохранить те же значения, что и в реальном роторе.

Величины приведенного ротора обозначают теми же символами, что и для реального ротора, но только со штрихом.

Для приведенной асинхронной машины имеем следующие параметры роторной цепи:

$$\begin{aligned} E'_2 &= E_1 = E_2k_e; \\ I'_2 &= I_1 = \frac{I_2}{k_i}; \\ r'_2 &= r_2k_e k_i; \\ x'_2 &= x_2k_e k_i; \\ r_k &= r_1 + r'_2; \\ x_k &= x_1 + x'_2. \end{aligned} \tag{6.7}$$

Коэффициент $k = k_e k_i$ называется коэффициентом трансформации асинхронной машины. С учетом данного коэффициента $r'_2 = kr_2$, $x'_2 = kx_2$.

По аналогии с трансформатором

$$\begin{aligned} r_k &= r_1 + r'_2; \\ x_k &= x_1 + x'_2, \end{aligned}$$

где r_k и x_k – параметры короткого замыкания асинхронной машины.

В противоположность трансформаторам, параметры r_k и x_k асинхронных машин отнюдь не всегда постоянны. Так, например, в двигателях с закрытыми пазами на роторе x_k зависит от величины тока.

Мощность P_k , потребляемая машиной при коротком замыкании, практически идёт только на покрытие потерь в меди статора и ротора, т. е.

$$P_E = \Delta P_{11} + \Delta P_{12} = m_1 I_1^2 r_1 + m_1 I_2^2 r_2' = m_1 I_1^2 r_E.$$

6.3 Работа асинхронной машины при вращающемся роторе

В статорной обмотке при переходе от неподвижного ротора к подвижному практически ничего не меняется, если $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$. В роторной же обмотке изменяется частота ЭДС из-за возникновения скольжения,

$$f_{2s} = f_1 s. \quad (6.8)$$

Таким образом, частота ЭДС (тока), наводимая вращающимся полем в роторе, равна частоте сети, умноженной на скольжение.

При работе асинхронной машины двигателем частота f_{2s} обычно весьма невелика; если, например, $f_1 = 50$ Гц, а скольжение s_n при номинальной нагрузке составляет 1–4 %, то

$$f_{2s} = 50 \cdot (0,01 - 0,04) = 0,5 - 2 \text{ Гц.}$$

ЭДС и индуктивное сопротивление обмотки вращающегося ротора:

$$E_{2s} = 4,44 f_{2s} w_2 k_{o62} \Phi_m = 4,44 f_1 s w_2 k_{o62} \Phi_m = E_2 s; \quad (6.9)$$

$$x_{2s} = 2\pi f_{2s} L_{2\sigma} = 2\pi f_1 s L_{2\sigma} = x_2 s, \quad (6.10)$$

где $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния фазной обмотки ротора;

E_2 и x_2 – ЭДС и индуктивное сопротивление фазной обмотки неподвижного ротора.

Активное сопротивление обмотки ротора при малой частоте тока в ней можно считать неизменным, т. е. $r_2 = \text{const}$, тогда по закону Ома ток в роторной обмотке

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}. \quad (6.11)$$

Уравнение (6.11) позволяет режим двигателя с вращающимся ротором привести к эквивалентному режиму при неподвижном роторе. В этом режиме во вторичной цепи при вращении ротора вместо ЭДС E_{2s} с частотой f_{2s} будет существовать ЭДС при неподвижном роторе E_2 с частотой f_1 , а вместо индуктивного сопротивления при вращении ротора x_{2s} во вторичной цепи действует индуктивное сопротивление при неподвижном роторе x_2 . Для сохранения величины и фазы тока I_2 необходимо вместо r_2 ввести новое

со

противление r_2/s . Представим r_2/s как

$$r_2/s = r_2 + r_2(\bar{1} - \bar{s})/s. \quad (6.12)$$

Тогда эквивалентная схема роторной цепи имеет вид рисунка 6.1, а Т-образная схема замещения для приведенной машины – вид рисунка 6.2. Последняя получена на основании основных уравнений асинхронной машины:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 z_1; \\ \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 z'_2 &= \underline{I}'_2 r_2 \frac{1-s}{s}; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{aligned} \quad (6.13)$$

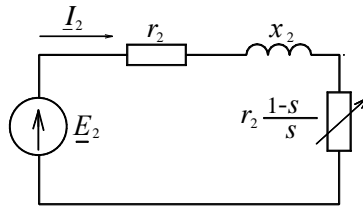


Рисунок 6.1 – Эквивалентная схема роторной цепи

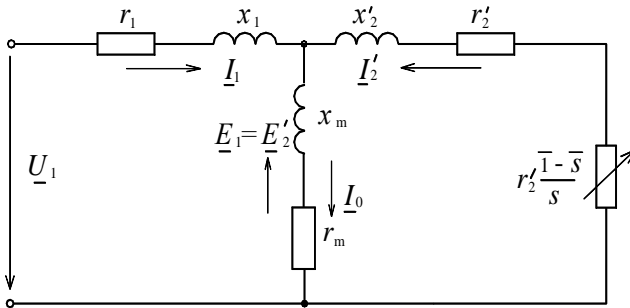


Рисунок 6.2 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

На схеме замещения r_1 и x_1 – фазное активное и индуктивное сопротивления статорной обмотки; r_2' и x_2' – аналогичные приведенные сопротивления роторной обмотки; r_m и x_m – параметры намагничивающей

ветви; $r_2' \frac{1-s}{s}$ – элемент, на котором выделяется электрическая мощность, равная механической мощности на валу двигателя.

6.4 Вращающий момент асинхронного двигателя

Если считать, что двигатель работает в установившемся режиме, т. е. при $n = \text{const}$, то в этом случае, по условию равновесия моментов,

$$M = M_0 + M_2,$$

где M – вращающий момент, развиваемый двигателем; M_0 и M_2 – моменты сопротивления при холостом ходе двигателя и его нагрузки.

Момент M_2 задаётся рабочим механизмом, на который работает двигатель. Соответствующая ему полезно развиваемая двигателем мощность P_2 определяется в виде

$$P_2 = M_2 \omega = M_2 2\pi \frac{n}{60},$$

где ω – угловая частота вращения ротора.

Моменту холостого хода M_0 соответствует мощность

$$P_0 = \Delta P_{\text{ia0}} + \Delta P_{\text{ai4}} = M_0 \omega = M_0 2\pi \frac{n}{60}.$$

Вращающий момент двигателя M образуется в результате взаимодействия вращающегося магнитного потока Φ и тока в роторе I_2 . Но поле Φ вращается с угловой частотой ω_1 , следовательно, развиваемая им электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = M \omega_1.$$

Из энергетической диаграммы также следует, что

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{M2}} = M \omega + \Delta P_{\text{M2}},$$

где ΔP_{M2} – потери в обмотке ротора, $\Delta P_{\text{M2}} = 3I_2'^2 r_2' = 3I_2^2 r_2$.

Следовательно, $P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = M(\omega_1 - \omega) = \Delta P_{\text{M2}}$ или $M \omega_1 \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \Delta P_{\text{M2}}$, откуда

$$M = \frac{\Delta P_{\text{M2}}}{\omega_1 s} = \frac{3I_2'^2 r_2'}{\omega_1 s}. \quad (6.14)$$

Если в Т-образной схеме замещения асинхронного двигателя намагничивающую ветвь (x_m, r_m) вынести на входные зажимы так, чтобы ток

I_0 не изменился, то получим Г-образную схему замещения двигателя. Последняя имеет вид рисунка 6.3.

Из Г-образной схемы замещения двигателя имеем

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (6.15)$$

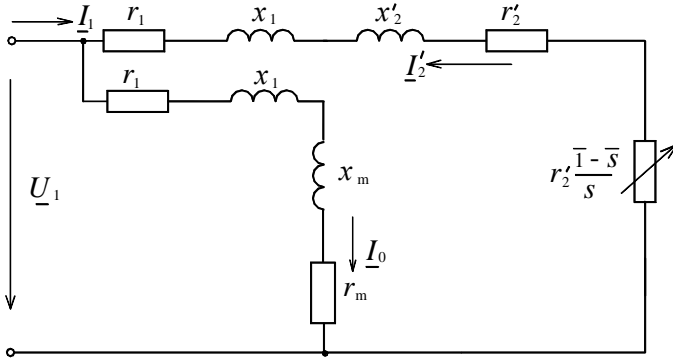


Рисунок 6.3 – Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Подставляя значение тока I_2' в (6.14), получим

$$M = \frac{3U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \quad (6.16)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = 2\pi \frac{n_1}{60}$.

Из выражения (6.16) следует, что вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения питания. Отмеченное является недостатком асинхронного двигателя. Так, если напряжение сети уменьшится на 20 %, то развиваемый двигателем момент снизится на 36 %.

Вращающий момент двигателя также зависит от соотношения параметров его рабочей цепи $r_1 + r_2' = r_k$ и $x_1 + x_2' = x_k$.

При пуске двигателя $n = 0$, $s = +1$, имеем пусковой момент $M_{п}$. Если момент $M_{п}$ достаточен для преодоления статического момента $M_0 + M_2$, то начнется разгон двигателя, т. е. двигатель будет увеличивать частоту вращения до тех пор, пока его момент M не станет равным моменту $M_0 + M_2$. В соответствии

с этим скольжение будет уменьшаться от значения $s = +1$ до определенной величины.

Так как обычно $x_k > r_k$, то при уменьшении s (см. формулу (6.16)) будут одновременно увеличиваться и числитель, и знаменатель; сначала, при больших s , преобладающее значение имеет числитель, вследствие чего момент M возрастает, а затем, при скольжениях $s = 0,12 \dots 0,2$, преобладающее значение получает знаменатель, куда отношение $\frac{r_2'}{s}$ входит в квадрате. Это приводит к тому, что момент M , достигнув наибольшего значения $M_{кр} = M_{max}$, начинает уменьшаться и при $s = 0$ становится равным нулю.

Зависимость $M = f(s)$ при постоянстве U_1 и f_1 называется механической характеристикой асинхронного двигателя. Последняя имеет вид рисунка 6.4.

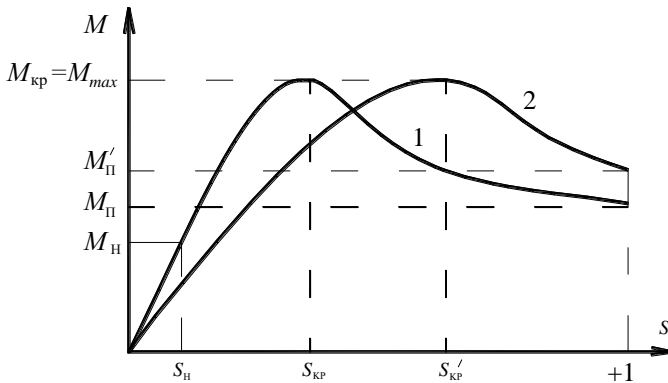


Рисунок 6.4 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Чтобы определить $M_{кр}$, сначала находят то скольжение $s_{кр}$, при котором двигатель развивает этот момент. Для того, по общему правилу, берут производную $\frac{dM}{ds}$ и приравнивают ее к нулю, т. е. решают уравнение $\frac{dM}{ds} = 0$. Так как эта операция носит обычный математический характер, то достаточно привести её конечный результат. При некоторых допущениях имеем

$$s_{кр} = \frac{r_2'}{x_k}, \quad (6.17)$$

тогда максимальный момент (критический момент) будет

$$M_{\max} = M_{\dot{\epsilon}D} = \frac{3U_1^2}{2\omega_1(x_1 + x_2')} \quad (6.18)$$

При номинальном режиме работы двигатель имеет s_H и M_H . Отношение максимального момента к номинальному характеризует перегрузочную способность двигателя

$$\lambda = \frac{\dot{I}_{\dot{\epsilon}D}}{\dot{I}_f} \quad (6.19)$$

Для короткозамкнутых асинхронных двигателей $\lambda = 1,8 \dots 2,5$. Более высокие значения λ соответствуют двигателям с меньшим числом полюсов.

Критическое скольжение двигателя

$$s_{\dot{\epsilon}D} = s_f \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad (6.20)$$

Для расчета механической характеристики можно использовать упрощенную формулу Клосса,

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \quad (6.21)$$

где s – скольжение, при котором определяется момент M .

Имея каталожные данные о M_H , s_H и $\lambda = \frac{\dot{I}_{\dot{\epsilon}D}}{\dot{I}_f}$, из формулы (6.21) определяем $s_{\text{кр}}$ и, задаваясь скольжением s , находим момент M для данного s .

Формула Клосса вместе с выражением для определения частоты вращения ротора $n = n_1(1 - s)$ позволяет получить механическую характеристику в виде зависимости $n = f(M)$, которая представлена на рисунке 6.5. Анализ данного рисунка показывает, что асинхронные двигатели на рабочем участке имеют жесткую механическую характеристику, т. е. такую, при которой частота вращения мало изменяется при увеличении нагрузки.

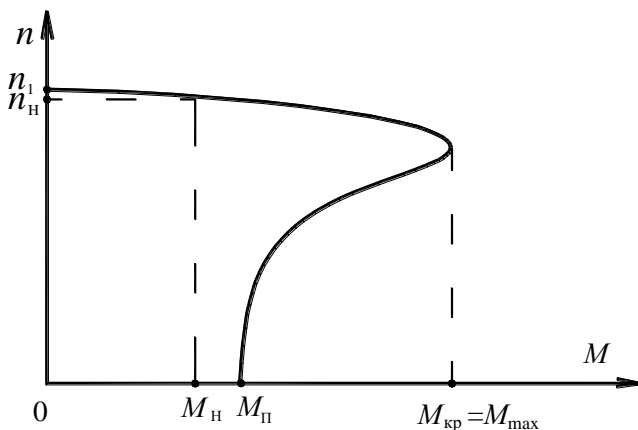


Рисунок 6.5 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Анализ зависимости $M = f(s)$, (см. уравнение (6.16)) показывает, что максимальный момент M_{kp} не зависит от активного сопротивления обмотки ротора r_2' (см. формулу (6.18)), однако согласно выражению (6.17) это сопротивление оказывает влияние на скольжение s_{kp} , при котором асинхронный двигатель развивает максимальный момент. Отмеченное используют в двигателях с фазным ротором. При пуске таких двигателей в цепь ротора включают пусковой реостат $r_{2\text{пуск}}$, при этом возрастает s_{kp} , максимальный момент M_{kp} , не изменяясь по величине, смещается в сторону больших скольжений, отчего возрастает пусковой момент $M_п$, что облегчает пуск двигателя (кривая 2 на рисунке 6.4). Одновременно включение $r_{2\text{пуск}}$ уменьшает пусковой ток $I_{2\text{пуск}}$, а следовательно, и $I_{1\text{пуск}}$.

Полезная мощность, отдаваемая двигателем рабочему механизму, Вт,

$$P_2 = M n / 9,55, \quad (6.22)$$

где M – момент на валу двигателя, Н·м;

n – частота вращения ротора, об/мин.

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos \varphi_1, \quad (6.23)$$

где $U_{1л}$ – линейное напряжение сети;

$I_{1л}$ – линейный ток, потребляемый из сети;

φ_1 – угол сдвига фаз между током и напряжением.

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (6.24)$$

Пример 6.1. Расчёт параметров асинхронного трёхфазного двигателя с короткозамкнутым ротором

Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими номинальными данными: мощность $P_H = 10$ кВт, напряжение $U_1 = 380$ В, частота вращения $n_H = 1420$ об/мин, КПД $\eta_H = 0,84$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{1H} = 0,85$. Кратность максимального момента (перегрузочная способность двигателя) $\lambda = \frac{M_{кр}}{M_H} = 1,8$.

Определить:

- 1) потребляемую активную мощность из сети при номинальной нагрузке;
- 2) номинальный и максимальный вращающие моменты;
- 3) номинальный ток;
- 4) номинальное и критическое скольжение;
- 5) построить механические характеристики $n = f(M)$ и $M = f(s)$;
- 6) определить электромагнитную мощность и потери энергии в статоре при номинальной нагрузке;
- 7) общие потери в двигателе при номинальной нагрузке;
- 8) электрические потери в роторе при номинальной нагрузке;
- 9) установить возможность пуска двигателя при полной его нагрузке на валу, т. е. когда $M_C = M_H$;
- 10) установить возможность работы двигателя при кратковременной перегрузке $M_C = 110$ Нм;
- 11) определить кратность пускового момента k_H ;
- 12) используя график $n = f(M)$, определить полезную мощность на валу двигателя P_2' при $n = 1450$ об/мин.

Решение. Потребляемая активная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H} = 9,55 \frac{10 \cdot 10^3}{1420} = 67,3 \text{ Нм}; \quad M_{кр} = \lambda M_H = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Нм.}$$

Номинальный ток

$$I_{1H} = \frac{D_{1H}}{\sqrt{3} U_1 \cos\varphi_{1H}} = \frac{11,9 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 21,3 \text{ А.}$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053,$$

$$s_{ед} = s_1 \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,053 \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Механическую характеристику $M = f(s)$ строим по уравнению Клосса (6.21), а для построения $n = f(M)$ дополнительно используем зависимость $n = n_1(1 - s)$. Результаты расчёта заносим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчёта характеристик асинхронного двигателя

s	0,033	0,053	0,1	0,175	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
n , об/мин	1450	1420	1350	1238	1200	1050	900	600	300	0
M , Нм	44	67,3	104,3	121	120	105,3	88,38	65,2	50,5	41,2

Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\dot{M}_i} = \dot{M}_i \omega_1 = M_i \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{M_i n_1}{9,55} = \frac{67,3 \cdot 1500}{9,55} = 10570 \text{ Вт.}$$

Потери энергии в статоре при номинальной нагрузке

$$\Delta P_N = P_{ii} - \dot{E}_{\dot{M}_i} = 11900 - 10570 = 1330 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в роторе при номинальной нагрузке

$$\Delta \dot{E}_{\dot{M}_2} = \dot{E}_{\dot{M}_1} s_i = 10570 \cdot 0,0533 = 560 \text{ Вт.}$$

Общие потери энергии в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{i \text{ о а е в}} = \dot{E}_{ii} - \dot{E}_i = 11900 - 10000 = 1900 \text{ Вт.}$$

На основании табличных данных строим характеристики $M = f(s)$ и $n = f(M)$, изображённые на рисунках 6.6 и 6.7.

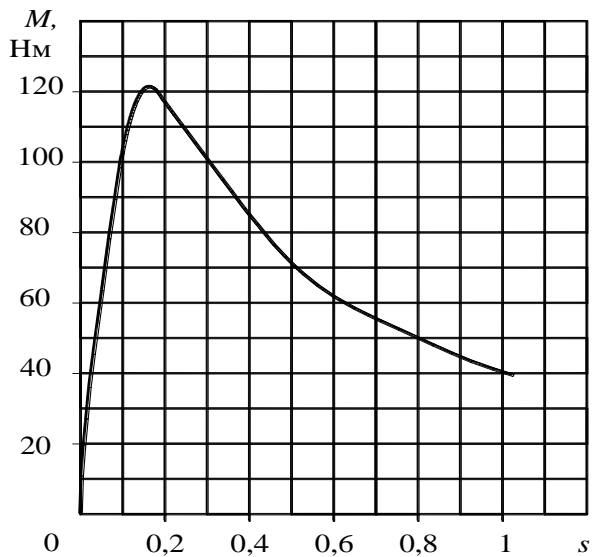


Рисунок 6.6 – Расчётная зависимость вращающего момента двигателя от скольжения

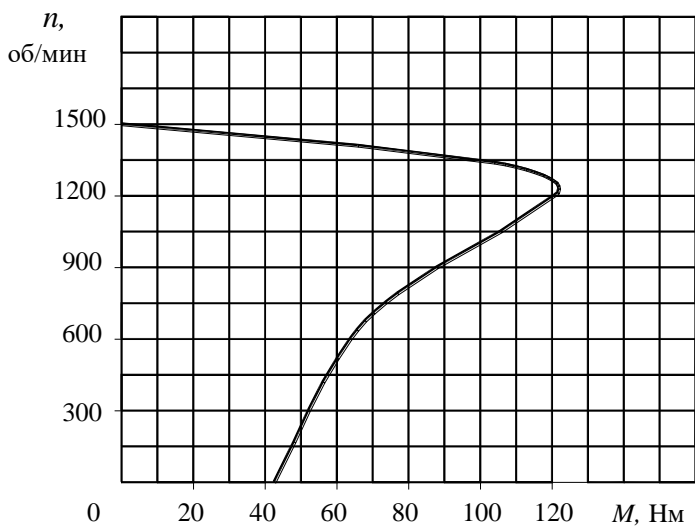


Рисунок 6.7 – Расчётная зависимость частоты вращения двигателя от вращающего момента

Из расчетной таблицы имеем при пуске двигателя $s = 1$ и $M_{\Pi} = 41,2$ Нм. Так как $M_c = 67,3$ Нм $>$ M_{Π} , то запустить двигатель нельзя. Работа двигателя при кратковременной перегрузке, равной 110 Нм, возможна, так как при этом $M_{кр} > M_c$ ($M_{кр} = 121$ Нм).

Кратность пускового момента

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{н}} = \frac{41,2}{67,3} = 0,61.$$

Полезная мощность P'_2 , Вт, на валу двигателя при частоте вращения ротора $n = 1450$ об/мин

$$P'_2 = 0,104 M n = 0,104 \cdot 44 \cdot 1450 = 6635 \text{ Вт},$$

где M , Нм, берётся из рассчитанной выше таблицы для заданного n .

Контрольные вопросы

- 1 Конструкция и разновидности асинхронных машин.
- 2 Вращающееся магнитное поле и условия его возникновения.
- 3 Принцип действия асинхронного двигателя.
- 4 Факторы, влияющие на частоту вращения магнитного поля статора.
- 5 ЭДС в роторной обмотке при неподвижном и вращающемся роторе.
- 6 Ток в роторной обмотке при вращающемся роторе.
- 7 Скольжение и его влияние на процессы в машине.
- 8 Как режим работы асинхронной машины влияет на величину скольжения?
- 9 Вращающий момент асинхронного двигателя.
- 10 Механическая характеристика асинхронного двигателя.
- 11 Какой момент в двигателе называется критическим?
- 12 Факторы, влияющие на величину критического момента.
- 13 Почему с увеличением тормозного момента частота вращения ротора уменьшается?
- 14 Какое скольжение называется критическим?
- 15 Что влияет на величину критического скольжения?
- 16 Почему при пуске двигателя возникает большой пусковой ток?
- 17 Пути увеличения пускового момента.
- 18 Способы уменьшения пускового тока в двигателе.
- 19 Регулирование частоты вращения ротора асинхронного двигателя.
- 20 Как осуществить реверсирование двигателя?
- 21 Почему не рекомендуется работа асинхронного двигателя с недогрузкой?
- 22 Почему частота вращения ротора асинхронного двигателя не достигает частоты вращения поля статора?
- 23 Как напряжение питания влияет на величину пускового момента?

7 ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7.1 Основные понятия о выпрямителях

Выпрямитель – устройство, преобразующее переменный ток в постоянный, точнее, пульсирующий с той или иной частотой, но имеющей одно направление. Его принцип действия основан на односторонней проводимости некоторых электронных приборов (вентилей). В качестве последних могут использоваться электровакуумные, ионные и полупроводниковые приборы. Наиболее широко в настоящее время используются полупроводниковые вентили: неуправляемые – диоды и управляемые – тиристоры. В состав выпрямительного агрегата, как правило, входят силовой (вентильный) трансформатор, блок вентилей, сглаживающий фильтр, блоки управления, защиты и сигнализации.

Выпрямители можно классифицировать по числу фаз, мощности и возможности регулирования.

В зависимости от числа фаз источника переменного напряжения выпрямители делятся на однофазные и трехфазные. В свою очередь, однофазные бывают однополупериодными, двухполупериодными с нулевой точкой и мостовыми. Наиболее часто используются на практике в однофазных цепях двухполупериодные схемы. Широкое применение в промышленности находят трехфазные выпрямители. Основными схемами таких агрегатов являются: схема с нулевой точкой и мостовая. Причем обе эти разновидности используются как самостоятельно, так и в составе более сложных схемных решений. В последнем случае нулевая или мостовая схема включаются последовательно или параллельно, с уравнивающим реактором или без такового. Усложнение схемы позволяет повысить качество выпрямленного напряжения.

По выходной мощности выпрямительные агрегаты можно условно разделить на установки малой (до единиц киловатт), средней (до десятков киловатт) и большой мощности (сотни и более киловатт).

По возможности регулирования напряжения выпрямители делятся на неуправляемые, в которых вентилями служат диоды, и управляемые, построенные полностью или частично на полупроводниковых управляемых вентилях – тиристорах или ионных управляемых приборах – тиратронах.

Во всех выпрямителях вентили выполняют функции коммутирующих устройств, подключающих нагрузку к обмоткам вентильного

трансформатора таким образом, что по ней проходит ток одного направления. Процесс перехода тока с одного вентиля на другой называется коммутацией, а моменты времени, в которые это происходит, называются моментами коммутации. У идеального выпрямителя коммутация тока происходит мгновенно. В реальных схемах, из-за наличия индуктивности сети, индуктивности обмоток вентильного трансформатора и индуктивности токоведущих шин, коммутация тока с диода на диод происходит в течение некоторого времени, называемого временем коммутации. Это время зависит от эквивалентной индуктивности цепи, по которой протекает коммутируемый ток, от величины коммутируемого тока и от рабочего напряжения выпрямителя. В преобразовательной технике принято представлять время коммутации как некоторую долю периода переменного входного напряжения выпрямителя. Тогда время коммутации можно измерять в угловых единицах (градусах), а термин “время коммутации” преобразуется в “угол коммутации”.

7.2 Однофазная схема выпрямления с нулевой точкой

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевой (средней) точкой изображена на рисунке 7.1. Своё название схема получила из-за того, что вторичная обмотка вентильного трансформатора разделена на две равные части и из средней точки раздела сделан вывод, к которому подключается нагрузка. Данную схему можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, работающих в противофазе на общую нагрузку R_n . В первую половину периода, когда полярность напряжения на вторичной обмотке вентильного трансформатора соответствует обозначениям на рисунке 7.1, в проводящем состоянии находится диод VD_1 , а VD_2 закрыт. Ток протекает в верхнем контуре вторичной цепи по часовой стрелке. Во второй полупериод полярность напряжения на обмотке меняется и в работу вступает диод VD_2 , а VD_1 закрывается. Ток в этом случае протекает в нижнем контуре вторичной цепи против часовой стрелки. Коммутация тока с одного диода на другой происходит в момент перехода сетевого напряжения через нуль. Независимо от того, какой диод открыт, через нагрузку R_n ток i_n проходит в одном направлении, указанном на рисунке 7.1.

Работа выпрямителя иллюстрируется с помощью временных диаграмм, приведённых на рисунке 7.2. Из этих диаграмм видно, что частота пульсации выходного напряжения u_n на нагрузке в два раза выше частоты сети, поэтому однофазная схема с нулевой точкой считается двухпульсовой (двухполупериодной).

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя для данной схемы

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (U_2 \sqrt{2} \sin \omega t) d\omega t = 2\sqrt{2}U_2 / \pi \approx 0,9U_2, \quad (7.1)$$

где U_2 – действующее значение напряжения на половине вторичной обмотки
 вентильного трансформатора;
 ω – угловая частота входного напряжения.

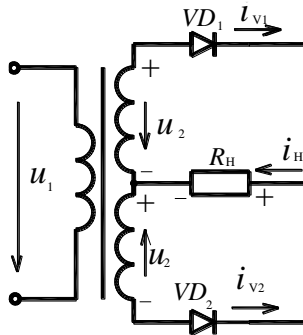


Рисунок 7.1 – Однофазная двухполупериодная схема выпрямления с нулевой точкой

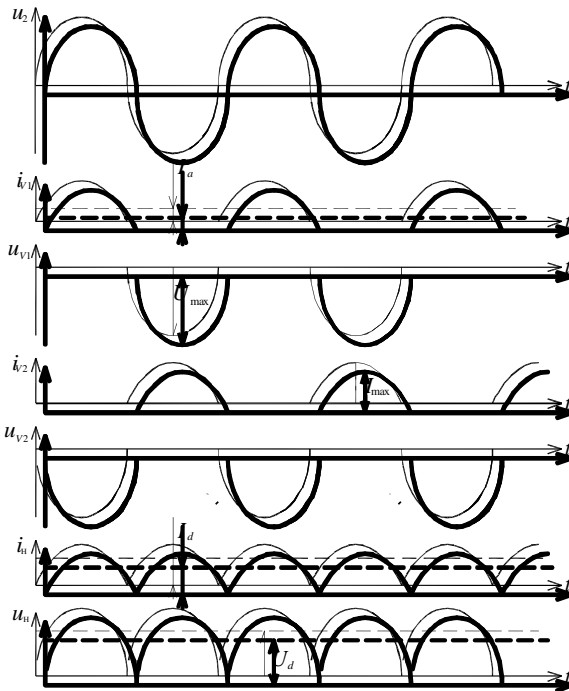


Рисунок 7.2 – Временные диаграммы работы однофазной двухполупериодной схемы с нулевой точкой: u_2 – кривая напряжения на

половине вторичной обмотки трансформатора; i_{v1}, i_{v2} – кривые токов диодов VD_1 и VD_2 ; u_{v1}, u_{v2} – напряжение на диодах VD_1 и VD_2 ; i_n – кривая тока нагрузки; u_n – кривая напряжения на нагрузке

Действующее значение напряжения на половине вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = 1,11 U_d . \quad (7.2)$$

Среднее значение тока через диод в два раза меньше среднего значения тока нагрузки I_d :

$$I_a = \frac{I_d}{2} . \quad (7.3)$$

Максимальное значение тока диода

$$I_{\max} = \frac{\pi}{2} I_d . \quad (7.4)$$

Действующее значение тока диода

$$I_V = \frac{\pi}{4} I_d . \quad (7.5)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi U_d}{4 R_n} \approx 0,78 I_d , \quad (7.6)$$

где R_n – сопротивление нагрузки выпрямителя.

Максимальное обратное напряжение на диоде в непроводящую часть периода

$$U_{\max} = 2\sqrt{2} U_2 = \pi U_d \approx 3,14 U_d . \quad (7.7)$$

Напряжение на нагрузке – несинусоидальное пульсирующее, состоит из полусинусоид вторичного напряжения трансформатора, следующих одна за другой. Оно образовано постоянным напряжением некоторой величины и набором переменных синусоидальных напряжений определённой частоты и амплитуды. Эти синусоидальные напряжения называются гармониками. Величина каждой составляющей напряжения на нагрузке может быть получена после разложения исходной несинусоидальной кривой в ряд Фурье.

Для рассматриваемой схемы в результате разложения имеем:

$$u_n = U_d \left(1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right) .$$

Из разложения видно, что напряжение на нагрузке формируется постоянной составляющей величиной U_d , не зависящей от времени, и

гармониками с чётной частотой и убывающей амплитудой ($\frac{2}{3}U_d, \frac{2}{15}U_d$ и др.).

Для оценки качества напряжения на выходе выпрямителя вводится коэффициент пульсации, под которым подразумевается отношение амплитуды основной гармоники в кривой выпрямленного напряжения к среднему значению этого напряжения. Основной считается гармоника с минимальной частотой.

Амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения рассматриваемой схемы

$$U_{m(2)} = \frac{2}{3}U_d,$$

следовательно, коэффициент пульсации

$$p = \frac{U_{m(2)}}{U_d} = \frac{2}{3} \approx 0,67. \quad (7.8)$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$\kappa_T = U_1/U_2. \quad (7.9)$$

Мощность первичной обмотки вентиляционного трансформатора

$$S_1 = U_1 I_1 = \frac{\pi U_d}{2\sqrt{2}} \frac{\pi I_d}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi^2}{8} P_d,$$

где P_d — мощность на выходе выпрямителя (мощность нагрузки).

Суммарная мощность двух вторичных обмоток трансформатора

$$S_2 = 2U_2 I_2 = 2 \frac{\pi U_d}{2\sqrt{2}} \frac{\pi}{4} I_d = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} P_d. \quad (7.10)$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 2 \left(\frac{\pi^2}{8} + \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} \right) P_d = 1,48 P_d. \quad (7.11)$$

Если на выходе выпрямителя включён сглаживающий дроссель с индуктивностью значительной величины, то мощность трансформатора

$$S_T = 1,34 P_d. \quad (7.12)$$

Уменьшение установленной мощности трансформатора объясняется изменением формы тока, протекающего по вторичной обмотке, которая из синусоидальной превращается в прямоугольную.

К достоинствам схемы однофазного выпрямителя с нулевой точкой можно отнести малое количество диодов и протекание тока в любой момент времени

только по одному из них. Последнее свойство очень важно для низковольтных выпрямителей, работающих с большими токами, так как позволяет в этом случае повысить КПД выпрямителя за счёт снижения падения напряжения на диодах.

В качестве недостатков рассматриваемой схемы можно отметить большое обратное напряжение на диодах по сравнению с выходным и плохое использование вентильного трансформатора по мощности. Кроме того, при ее реализации необходимо иметь вентильный трансформатор с двумя одинаковыми вторичными обмотками для получения средней точки.

Отмеченные недостатки в меньшей степени присущи однофазной мостовой схеме выпрямления.

7.3 Однофазная мостовая схема выпрямления

Однофазная мостовая схема (рисунок 7.3) имеет структуру, аналогичную мосту Уитстона, в котором резисторы заменены диодами. К одной из диагоналей этого моста подключается источник переменного напряжения (например, вторичная обмотка трансформатора), а к другой – нагрузка. В данной схеме диоды работают попарно: в течение одной половины периода сетевого напряжения ток протекает от вторичной обмотки трансформатора по цепи VD_1, R_H, VD_2 , а на втором полупериоде – по цепи VD_3, R_H, VD_4 , причем в каждом полупериоде через нагрузку ток проходит в одном направлении, что и обеспечивает выпрямление. Коммутация диодов происходит в моменты перехода переменного напряжения через нуль.

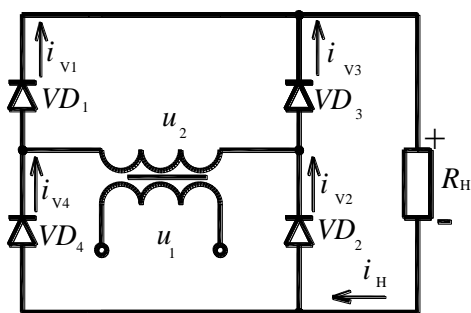


Рисунок 7.3 – Однофазная мостовая схема выпрямления

Временные диаграммы для мостовой схемы, изображённые на рисунке 7.4, подобны диаграммам выпрямителя с нулевой точкой. Разница лишь в том, что у мостовой схемы в каждом полупериоде ток проходит одновременно через два диода (например, VD_1, VD_2), потому временные зависимости токов и напряжений будут принадлежать парам вентилей.

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (U_2 \sqrt{2} \sin \omega t) d\omega t = 2\sqrt{2}U_2 / \pi \approx 0,9U_2, \quad (7.13)$$

где U_2 – действующее значение переменного напряжения на входе выпрямителя.

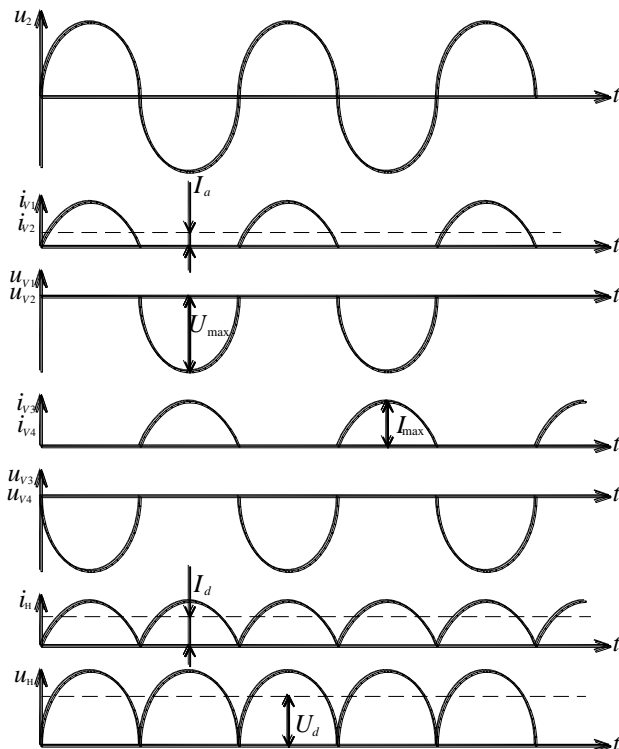


Рисунок 7.4 – Временные диаграммы работы однофазной мостовой схемы выпрямления: u_2 – кривая входного переменного напряжения; i_{V1}, i_{V2} – кривая тока диодов VD_1 и VD_2 ; u_{V1}, u_{V2} – напряжение на диодах VD_1 и VD_2 ; i_{V3}, i_{V4} – кривая тока диодов VD_3 и VD_4 ; u_{V3}, u_{V4} – напряжение на диодах VD_3 и VD_4 ; i_n – кривая тока нагрузки; u_n – кривая напряжения на нагрузке

Действующее значение напряжения на входе выпрямителя

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = 1,1U_d. \quad (7.14)$$

Среднее значение тока через диод в два раза меньше среднего значения тока нагрузки I_d :

$$I_a = \frac{I_d}{2}. \quad (7.15)$$

Максимальное значение тока, протекающего через диод,

$$I_{max} = \frac{\pi}{2} I_d. \quad (7.16)$$

Действующее значение тока диода

$$I_V = \frac{\pi}{4} I_d. \quad (7.17)$$

Действующее значение переменного тока на входе выпрямителя

$$I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d \approx 1,11 I_d. \quad (7.18)$$

Максимальное обратное напряжение на диоде в непроводящую часть периода

$$U_{max} = \sqrt{2} U_2 = \pi U_d / 2 \approx 1,57 U_d. \quad (7.19)$$

Напряжение на нагрузке состоит из полусинусоид вторичного напряжения трансформатора, следующих одна за другой. После разложения в ряд Фурье напряжение такой формы можно представить в виде

$$u_n = U_d \left(1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения с частотой 2ω

$$U_{m(2)} = \frac{2}{3} U_d,$$

следовательно, коэффициент пульсации выпрямленного напряжения

$$p = \frac{U_{m(2)}}{U_d} = \frac{2}{3} \approx 0,67. \quad (7.20)$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$\kappa_T = U_1 / U_2. \quad (7.21)$$

Мощность первичной и вторичной обмоток вентильного трансформатора

$$S_1 = S_2 = U_2 I_2 = 1,23 P_d.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,23 P_d. \quad (7.22)$$

Достоинства рассмотренной схемы выпрямителя в том, что обратное напряжение на диодах здесь меньше, чем у схемы с нулевой точкой, лучше

использование трансформатора по мощности, не требуется наличие трансформатора с двумя одинаковыми вторичными обмотками.

В качестве недостатков однофазной мостовой схемы можно отметить: большее количество диодов и протекание тока в каждом полупериоде по двум диодам одновременно. Последнее свойство схемы снижает ее КПД из-за повышенного падения напряжения на полупроводниковых структурах вентилей. Это особенно заметно у низковольтных выпрямителей, работающих с большими токами.

Несмотря на отмеченные недостатки, мостовая схема широко применяется на практике в однофазных выпрямителях различной мощности.

7.4 Трёхфазная схема выпрямления с нулевой точкой

Схема трёхфазного выпрямителя с нулевой точкой изображена на рисунке 7.5. Для её реализации необходимо наличие трёхфазного источника питания с нейтралью. В качестве последнего чаще всего используют вентиляльный трансформатор, у которого вторичная обмотка соединена звездой с выведенной нейтральной (нулевой) точкой. Полярность диодов в схеме можно изменять на противоположную. При этом меняется и полярность напряжения на нагрузке R_H .

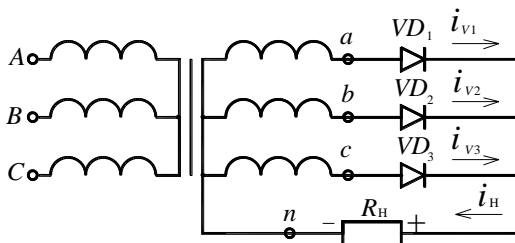


Рисунок 7.5 – Трёхфазная схема выпрямления с нулевой точкой

На рисунке 7.6 приведены временные диаграммы, поясняющие работу схемы. Из временных диаграмм видно, что диоды работают в схеме поочередно. Для полярности включения диодов, изображённой на рисунке 7.5, в любой момент времени ток проводит только один диод, анод которого имеет более положительный потенциал по отношению к общим катодам. Длительность проводящего состояния каждого диода (угол проводимости вентилей) составляет треть часть периода сетевого напряжения. Ток нагрузки выпрямителя формируется токами трех вентилей. Частота пульсации этого тока в три раза выше частоты трёхфазной сети, поэтому данная схема считается трёхпульсовой.

Переход тока с вентиля на вентиль (коммутация) происходит в моменты

времени, соответствующие точкам пересечения синусоид фазных напряжений u_a , u_b , u_c , которые являются моментами естественной коммутации диодов (точки k , l , m , n на временной диаграмме, изображённой на рисунке 7.6).

Кривая выпрямленного напряжения на нагрузке u_H может быть получена как огибающая синусоид фазных напряжений вторичной обмотки трехфазного трансформатора. Форма обратного напряжения на вентиле формируется из участков синусоид линейных напряжений (рисунок 7.6).

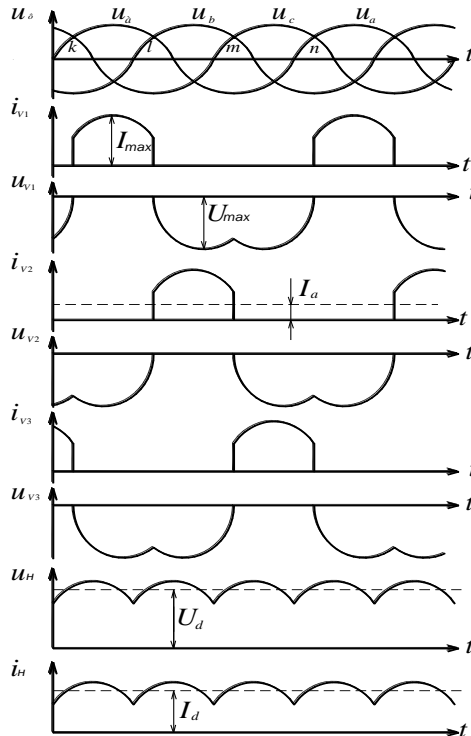


Рисунок 7.6 – Временные диаграммы трехфазной нулевой схемы выпрямления: u_ϕ – фазные напряжения на входе выпрямителя; i_{v1} , i_{v2} , i_{v3} – кривые токов в первом, втором и третьем диодах; u_{v1} , u_{v2} , u_{v3} – кривые напряжений на первом, втором и третьем диодах; u_H , i_H – кривые напряжения и тока на нагрузке

С учетом периодичности кривой выпрямленного напряжения его среднее значение можно определить путем интегрирования кривой u_H за треть периода:

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \sqrt{2}U_{20} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_{20} = 1,17U_{20} , \quad (7.23)$$

где $U_{2\phi}$ – действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке вентильного трансформатора

$$U_{2\phi} = \frac{U_d}{1,17} = 0,85U_d. \quad (7.24)$$

Максимальное обратное напряжение равно амплитуде линейного напряжения вторичной обмотки вентильного трансформатора:

$$U_{\max} = \sqrt{6}U_{2\phi} = 2,45U_{2\phi} = 2,09U_d. \quad (7.25)$$

Среднее значение тока диода

$$I_a = \frac{I_d}{3}. \quad (7.26)$$

Максимальное значение тока диода

$$I_{\max} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} I_d. \quad (7.27)$$

Действующие значения тока вентиля I_V и тока вторичной обмотки трансформатора I_2

$$I_V = I_2 = \frac{2\pi}{9} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} I_d. \quad (7.28)$$

На практике последовательно с нагрузкой обычно включается сглаживающий дроссель значительной индуктивности, тогда действующие значения тока вентиля I_V и тока вторичной обмотки трансформатора I_2 :

$$I_V = I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{3}}. \quad (7.29)$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$\kappa_T = U_{1\phi} / U_{2\phi}. \quad (7.30)$$

Действующее значение первичного тока трансформатора, обмотки которого соединены звездой,

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{I_d}{\hat{e}_0}. \quad (7.31)$$

Напряжение на нагрузке состоит из отрезков синусоид длительностью $2\pi/3$. Разложение такой периодической кривой в ряд Фурье имеет вид:

$$u_i = \frac{3\sqrt{6}U_{2\phi}}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{8} \cos 3\omega t - \frac{1}{35} \cos 6\omega t + \frac{1}{80} \cos 9\omega t - \dots \right).$$

Из разложения в ряд Фурье напряжения на нагрузке следует, что амплитуда основной (третьей) гармоники

$$U_{m(3)} = 3\sqrt{6}U_{26} / 8\pi.$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения

$$p = \frac{U_{m(3)}}{U_d} = \frac{3\sqrt{6}U_{26} 2\pi}{8\pi 3\sqrt{6}U_{26}} = 0,25. \quad (7.32)$$

Расчетная мощность трансформатора без учета увеличения веса стали, связанного с появлением потока вынужденного намагничивания,

$$S_{об} = \frac{3U_{26}I_2 + 3U_{10}I_1}{2} = 1,35U_d I_d = 1,35P_d, \quad (7.33)$$

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение на первичной обмотке трансформатора;

P_d – мощность на выходе выпрямителя.

Коэффициент мощности схемы

$$\gamma_0 = \frac{P_d}{S_1} = \frac{P_d}{1,21P_d} = 0,83. \quad (7.34)$$

Наличие диодов, включенных последовательно с обмотками вентильного трансформатора, приводит к созданию однонаправленного МДС, которые вызывают так называемый поток вынужденного намагничивания. Подобное явление может привести к насыщению магнитопровода и значительному увеличению намагничивающего тока. Для устранения насыщения приходится увеличивать сечение магнитопровода или применять специальное соединение вторичных обмоток трансформатора зигзагом.

7.5 Трёхфазная мостовая схема выпрямления

Трёхфазная мостовая схема с неуправляемыми диодами приведена на рисунке 7.7. Схема соединения вторичных обмоток трансформатора для данного выпрямителя не оказывает влияния на функционирование устройства. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, изображены на рисунке 7.8.

Все вентили схемы можно разбить на две группы: катодную (VD_1, VD_2, VD_3) и анодную (VD_4, VD_5, VD_6). В катодной группе в течение каждой трети периода работает вентиль с наиболее высоким потенциалом анода, а в анодной – вентиль, катод которого наиболее отрицателен.

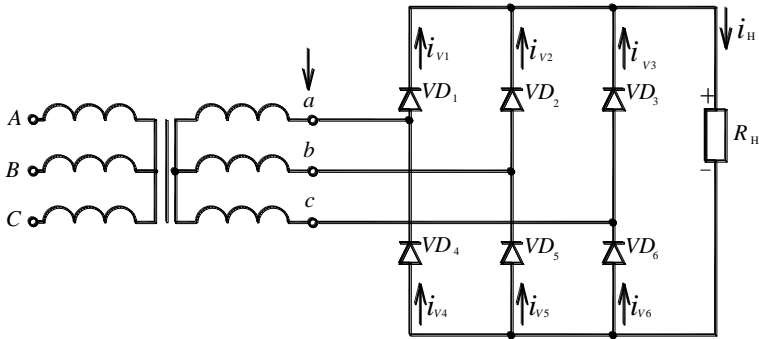


Рисунок 7.7 – Трёхфазная мостовая схема выпрямления

Открытие вентиля происходит в моменты естественной коммутации (точки k, l, m для диодов катодной группы и точки k', l', m' для диодов анодной группы). Чередование работы отдельных диодов можно проследить на временной диаграмме. Так на интервале между точками k и m' открыты диоды VD_1 и VD_5 . Между m' и l работают VD_1 и VD_6 , а на следующем временном отрезке ток протекает через VD_2 и VD_6 . В любой момент времени в проводящем состоянии находится один вентиль в анодной группе и один в катодной. Кривая выпрямленного напряжения определяется разностью мгновенных значений фазных напряжений (мгновенным значением линейного напряжения) на входе выпрямителя.

Характерным для кривой выпрямленного напряжения является шестикратная по отношению к частоте сети частота пульсации. Поэтому мостовая схема является шестипульсовой.

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{6}{2\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}U_{2л} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \frac{\pi}{6}}{\pi/6} = 1,35U_{2л} = 2,34U_{2ф}, \quad (7.35)$$

где $U_{2л}$ – линейное напряжение на входе выпрямителя.

Из сравнения с аналогичной зависимостью для трехфазной нулевой схемы видно, что при одном и том же входном напряжении среднее значение выпрямленного напряжения мостовой схемы в два раза больше, чем нулевой.

На основании выражения (7.35) линейное напряжение на входе выпрямителя

$$U_{2л} = 0,74U_d. \quad (7.36)$$

Максимальное значение обратного напряжения

$$U_{\max} = \frac{\sqrt{6}U_d}{2,34} = 1,05U_d. \quad (7.37)$$

Среднее значение тока диода

$$I_{\text{à}} = \frac{I_d}{3}. \quad (7.38)$$

Максимальное значение тока диода в случае активной нагрузки

$$I_{\text{max}} = \frac{\pi}{3} I_d. \quad (7.39)$$

Действующее значение тока диода при активной нагрузке

$$I_V = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} I_d. \quad (7.40)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки вентильного трансформатора, соединённой звездой,

$$I_2 = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (7.41)$$

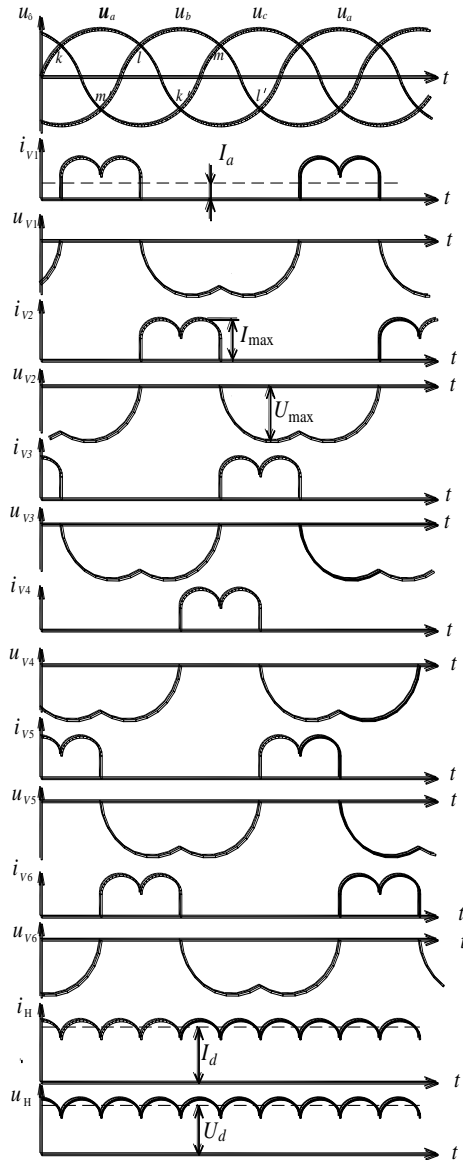


Рисунок 7.8 – Временные диаграммы трехфазной мостовой схемы выпрямления: u_{ϕ} – фазные напряжения на входе выпрямителя; i_{V1} , i_{V2} , i_{V3} , i_{V4} , i_{V5} , i_{V6} – кривые токов в первом–шестом диодах; u_{V1} , u_{V2} , u_{V3} , u_{V4} , u_{V5} , u_{V6} – кривые напряжений на первом–шестом диодах; u_n , i_n – кривые напряжения и тока на нагрузке

Коэффициент трансформации трансформатора

$$\kappa_T = U_{1\phi} / U_{2\phi}.$$

Действующее значение тока первичной обмотки, соединённой звездой,

$$I_1 = \frac{I_2}{\hat{e}_T} = \frac{I_d}{\hat{e}_0} \sqrt{3}. \quad (7.42)$$

Напряжение на нагрузке состоит из отрезков косинусоид длительностью $\pi/3$. Разложение такой периодической кривой в ряд Фурье имеет вид

$$u_u = \frac{3\sqrt{2}U_{2Л}}{\pi} \left(1 + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \frac{2}{143} \cos 12\omega t + \frac{2}{323} \cos 18\omega t - \dots \right).$$

Из выражения для напряжения на нагрузке следует, что амплитуда основной (шестой) гармоники

$$U_{m(6)} = 6\sqrt{2}U_{2Л} / 35\pi.$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения

$$p = \frac{U_{m(6)}}{U_d} = \frac{6\sqrt{2}U_{2Л}\pi}{35\pi 3\sqrt{2}U_{2Л}} = 0,057. \quad (7.43)$$

Типовая мощность трансформатора

$$S_T = \frac{3(U_{10} I_{10} + U_{20} I_{20})}{2} = 1,05U_d I_d = 1,05P_d. \quad (7.44)$$

Сравнение мощностей трансформаторов для трехфазных нулевой и мостовой схем показывает, что последняя лучше использует трансформатор. При одинаковой мощности на выходе выпрямителя мостовая схема требует трансформатор в 1,27 раза меньшей мощности.

Коэффициент мощности схемы

$$\gamma_0 = \frac{P_d}{S_2} = \frac{P_d}{1,05P_d} = 0,955.$$

Более высокие показатели мостовой схемы по сравнению с нулевой обусловили ее широкое применение как для мощных, так и для маломощных выпрямителей трехфазного тока.

7.6 Фильтрация выпрямленного напряжения

Напряжение, получаемое от выпрямителей, является не постоянным, а пульсирующим. Оно состоит из постоянной и переменной составляющих. Чем больше переменная составляющая по отношению к постоянной, тем больше пульсация и хуже качество выпрямленного напряжения.

Переменная составляющая формируется гармониками. Частоты гармоник определяются равенством

$$f(n) = kmf, \quad (7.45)$$

где k – номер гармоники, $k = 1, 2, 3, \dots$;

m – количество пульсов выпрямляемого напряжения;

f – частота напряжения сети.

Как уже отмечалось выше, качество выпрямленного напряжения оценивается коэффициентом пульсации p (см. выражение (7.8)), который зависит от среднего значения выпрямленного напряжения и амплитуды основной гармоники в нагрузке.

Порядок гармонических составляющих $n = km$, содержащихся в кривой выпрямленного напряжения, зависит лишь от числа пульсов и не зависит от конкретной схемы выпрямителя. Гармоники минимальных номеров имеют наибольшую амплитуду.

Действующее значение напряжения гармонической составляющей порядка n зависит от среднего значения выпрямленного напряжения U_d идеального нерегулируемого выпрямителя:

$$U_{(n)} = U_d \sqrt{2} / (k^2 m^2 - 1). \quad (7.46)$$

В реальных схемах переход тока с одного диода на другой происходит в течение некоторого конечного промежутка времени, измеряемого долями периода переменного напряжения и называемого углом коммутации. Наличие углов коммутации существенно увеличивает амплитуду гармоник. В результате растут пульсации выпрямленного напряжения.

Переменная составляющая выпрямленного напряжения, состоящая из гармоник низкой и высокой частоты, создает в нагрузке переменный ток, который оказывает мешающее воздействие на другие электронные устройства.

Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения между выходными зажимами выпрямителя и нагрузкой включают сглаживающий фильтр, который значительно ослабляет пульсацию выпрямленного напряжения за счет подавления гармоник.

Основными элементами сглаживающих фильтров являются катушки индуктивности (дроссели) и конденсаторы, а при небольших мощностях и транзисторы.

Работа пассивных фильтров (без транзисторов и других усилителей) основана на зависимости от частоты величины сопротивления реактивных элементов (катушки индуктивности и конденсатора). Реактивные сопротивления катушки индуктивности X_L и конденсатора X_C :

$$X_L = 2\pi fL; \quad X_C = 1/2\pi fC, \quad (7.47)$$

где f – частота тока, протекающего через реактивный элемент;

L – индуктивность дросселя;

C – емкость конденсатора.

Из формул для сопротивления реактивных элементов следует, что с

увеличением частоты тока сопротивление катушки индуктивности (дросселя) растёт, а конденсатора уменьшается. Для постоянного тока сопротивление конденсатора равно бесконечности, а катушки индуктивности – нулю. Отмеченная особенность позволяет катушке индуктивности беспрепятственно пропускать постоянную составляющую выпрямленного тока и задерживать гармоники. Причём, чем больше номер гармоники (выше её частота), тем эффективней она задерживается. Конденсатор наоборот полностью задерживает постоянную составляющую тока и пропускает гармоники.

Основным параметром, характеризующим эффективность работы фильтра, является коэффициент сглаживания (фильтрации)

$$q = p_1/p_2, \quad (7.48)$$

где p_1 – коэффициент пульсации на выходе выпрямителя в схеме без фильтра;

p_2 – коэффициент пульсации на выходе фильтра.

На практике применяются пассивные Г-образные, П-образные и резонансные фильтры. Наиболее широко используются Г-образные и П-образные, схемы которых приведены на рисунке 7.9.

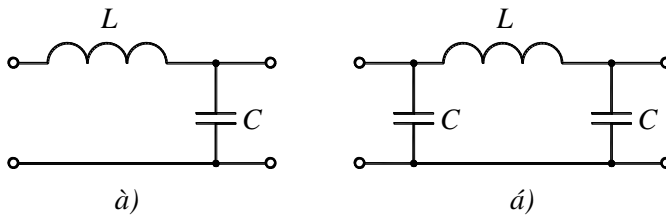


Рисунок 7.9 – Схемы пассивных сглаживающих Г-образного (а) и П-образного (б) фильтров

В контрольной работе исходными данными для расчёта индуктивности дросселя фильтра L и ёмкости конденсатора фильтра C являются коэффициент пульсации выпрямителя, вариант схемного решения, а также требуемый коэффициент пульсации на выходе фильтра.

Расчёт параметров фильтра начинают с определения коэффициента сглаживания. Далее необходимо произвольно выбрать схему фильтра и ёмкость конденсатора в ней. Ёмкость конденсатора фильтра выбирают из ряда ёмкостей, приведённого ниже. На практике используют конденсаторы следующих ёмкостей: 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 4000 мкФ. Меньшие значения ёмкостей из этого ряда целесообразно применять при больших рабочих напряжениях, а большие ёмкости – при невысоких напряжениях.

Индуктивность дросселя в Г-образной схеме фильтра можно определить из приближённого выражения

$$L \approx \frac{10q}{m^2 C}, \quad (7.49)$$

для П-образной схемы –

$$L \approx \frac{10^5 q}{C^2 m^3}. \quad (7.50)$$

В выражениях (7.49) и (7.50) ёмкость подставляется в микрофарадах, а результат получается в генри.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение выпрямительного агрегата.
- 2 Что входит в состав выпрямительного агрегата?
- 3 На чём основан принцип действия выпрямителя?
- 4 Как можно классифицировать выпрямительные агрегаты?
- 5 Схема и свойства однофазного выпрямителя со средней точкой.
- 6 Чем объясняется пульсация выпрямленного напряжения?
- 7 Схема и свойства однофазного мостового выпрямителя.
- 8 Чем оценивается качество выпрямленного напряжения?
- 9 Гармоники в кривой выпрямленного напряжения и их влияние на нагрузку.
- 10 Область применения однофазных выпрямителей.
- 11 Схема и свойства трёхфазного выпрямителя со средней точкой.
- 12 Схема и свойства трёхфазного мостового выпрямителя.
- 13 Чем объясняется возникновение угла коммутации?
- 14 Сглаживающие фильтры.
- 15 На чём основан принцип действия сглаживающих фильтров?
- 16 Чем оценивается качество работы сглаживающего фильтра?
- 17 Как выбирается марка диода для конкретного выпрямителя?
- 18 Определение параметров пассивного сглаживающего фильтра.
- 19 Применение выпрямителей в промышленности и на транспорте.

8 ЗАДАНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

8.1 Контрольная работа № 1

Задача № 1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии

Для заданной электрической цепи известны напряжение источника питания U и сопротивления потребителей. Требуется определить токи всех ветвей и составить баланс мощностей. Схема цепи выбирается из рисунка 8.1, а числовые данные её параметров берутся из таблицы 8.1.

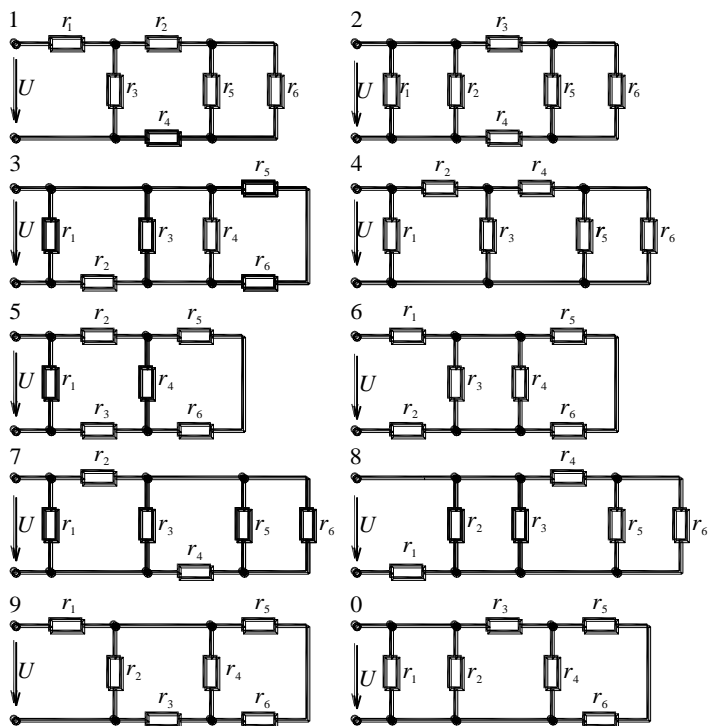


Рисунок 8.1 – Варианты электрических цепей к задаче № 1

Таблица 8.1 – Числовые значения исходных данных к задаче № 1

Вариант	U, В	Сопровитления, Ом					
		r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
1	65	19	10	16	9	8	10
2	75	13	11	15	13	10	12
3	85	11	18	12	10	14	13
4	95	12	13	15	12	10	7
5	105	9	11	9	10	8	16
6	115	7	16	9	8	8	10
7	125	8	16	12	8	7	14
8	135	9	13	15	12	10	7
9	145	10	12	8	8	13	9
0	155	14	7	12	11	17	12

Теоретический материал и пример расчета приведены в первом разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5, 6].

Примечание – Решаемый вариант задачи определяется по двум последним цифрам учебного шифра. По предпоследней цифре шифра из рисунка 8.1 выбирается номер схемы электрической цепи, а из таблицы 8.1 по последней цифре берётся строка с числовыми данными. Например, для шифра 953 выбирается пятая схема с числовыми данными, соответствующими третьей строке таблицы 8.1.

Задача № 2. Расчет сложной цепи постоянного тока с двумя узлами

Для сложной цепи, изображенной на рисунке 8.2, известны сопротивления r_1 – r_6 и ЭДС источников питания E_1 , E_2 и E_3 . Требуется:

1 Составить систему уравнений для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа. Решать данную систему не следует.

2 Определить токи методом межузлового напряжения.

3 Составить баланс мощностей и оценить режим работы каждого источника.

Параметры элементов электрической цепи приведены в таблице 8.2. Теоретический материал и пример расчета приведены в первом разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5, 6].

Примечание – Решаемый вариант задачи определяют по двум последним цифрам учебного шифра. По предпоследней цифре шифра из рисунка 8.2 выбирают номер схемы электрической цепи, а по последней цифре из таблицы 8.2 берут строку с числовыми данными. В зависимости от схемного решения цепи, некоторые параметры из таблицы 8.2 могут не использоваться. Например, для шифра 953 выбирают пятую схему с числовыми данными, соответствующими третьей строке таблицы 8.2. В этой цепи не используется резистор r_5 .

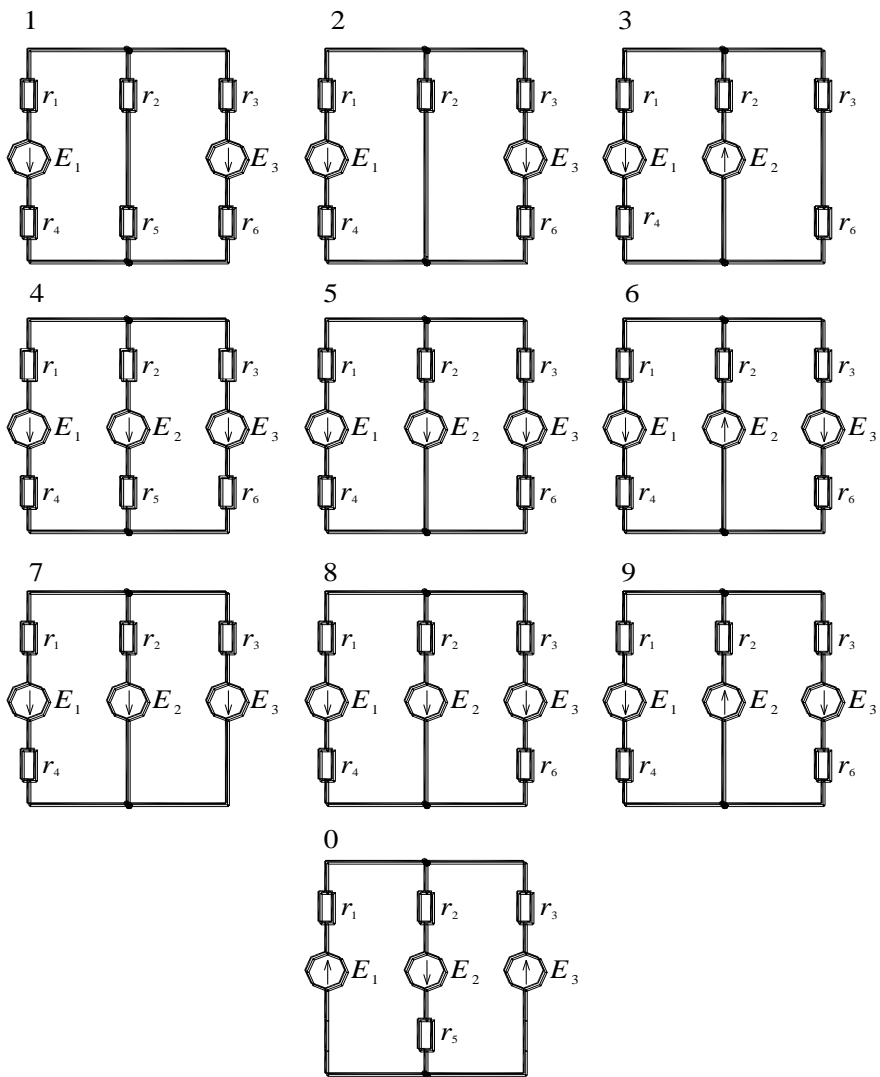


Рисунок 8.2 – Варианты электрических цепей к задаче № 2

Таблица 8.2 – Числовые значения исходных данных к задаче № 2

Величина	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$r_1, \text{Ом}$	1	2	3	4	5	6	7	8	8	10
$r_2, \text{Ом}$	3	5	7	9	11	8	6	4	2	1
$r_3, \text{Ом}$	2	3	5	6	8	9	11	7	4	6
$r_4, \text{Ом}$	1	5	11	9	5	8	11	4	9	7
$r_5, \text{Ом}$	4	1	6	5	9	6	4	11	7	2
$r_6, \text{Ом}$	6	3	8	4	11	9	6	7	9	6
$E_1, \text{В}$	110	120	100	80	90	100	110	120	160	140
$E_2, \text{В}$	120	100	180	190	200	180	160	170	190	150
$E_3, \text{В}$	130	80	140	150	170	13	160	120	190	150

Задача № 3. Расчет разветвленной линейной цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии

Для цепи, изображенной на рисунке 8.3, известны ЭДС E_1, E_2 и внутренние сопротивления r_{01}, r_{02} источников питания, а также сопротивления r_1-r_6 . Необходимо:

1 Составить систему уравнений для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа. Решать эту систему уравнений не следует.

2 Определить токи ветвей методом контурных токов.

3 Составить баланс мощностей.

4 Построить потенциальную диаграмму для контура, включающего две ЭДС.

Значения параметров элементов цепи приведены в таблице 8.3. Теоретический материал и пример расчета даны в первом разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5, 6].

Примечание – Решаемый вариант задачи определяют по двум последним цифрам учебного шифра. По предпоследней цифре шифра из рисунка 8.3 выбирают номер схемы электрической цепи, а из таблицы 8.3 по последней цифре берут строку с числовыми данными.

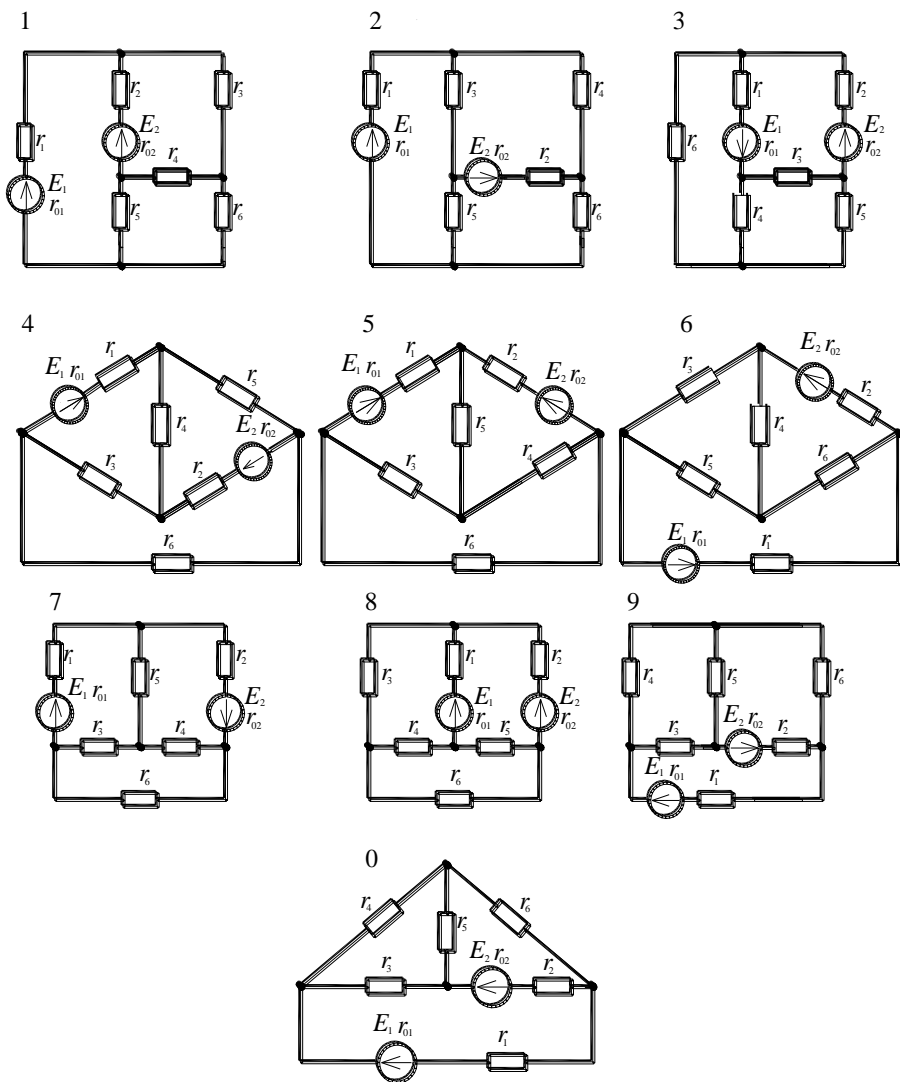


Рисунок 8.3 – Варианты электрических цепей к задаче № 3

Таблица 8.3 – Числовые значения исходных данных к задаче № 3

Вариант	E_1	E_2	r_{01}	r_{02}	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
	В		Ом							
1	75	15	0,2	0,8	4	3	7	6	6	6
2	85	25	0,25	0,6	2	8	5	2	4	5
3	95	35	0,15	1,0	9	4	5	5	6	7
4	105	45	0,4	1,2	4	7	2	2	4	5
5	115	55	0,5	0,5	6	3	9	3	3	3
6	125	65	0,3	0,8	6	8	3	6	4	6
7	135	75	0,6	1,2	7	4	7	2	5	8
8	145	85	0,5	0,5	9	3	6	5	5	8
9	155	95	0,4	1,2	5	3	7	5	8	9
0	65	105	0,8	0,8	4	6	3	8	6	3

8.2 Контрольная работа № 2

Задача № 1. Расчёт неразветвлённой цепи однофазного синусоидального тока

Напряжение на зажимах цепи изменяется по синусоидальному закону с угловой частотой ω , c^{-1} . Амплитудное значение U_m , В, и начальная фаза ψ_U , град, напряжения, а также значения параметров цепи приведены в таблице 8.4. Необходимо при частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц:

- 1 Определить показания приборов, указанных на схеме.
- 2 Найти закон изменения тока в цепи.
- 3 Вычислить закон изменения напряжения между точками, к которым подключён вольтметр.
- 4 Построить векторную диаграмму.

Теоретический материал и пример расчета приведены во втором разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5].

Примечание – Решаемый вариант задачи определяют по двум последним цифрам учебного шифра. По предпоследней цифре шифра из рисунка 8.4 выбирают номер схемы электрической цепи, а из таблицы 8.4 по последней цифре берут строку с числовыми данными.

Таблица 8.4 – Числовые значения исходных данных к задаче № 1

Величина	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_m , В	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215
ψ_U , град	15	25	35	45	55	65	–55	–45	–35	–25
r_1 , Ом	2	9	10	17	12	8	16	6	4	5

Окончание таблицы 8.4

Величина	Вариант										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
r_2 , Ом	4	5	6	7	8	9	10	11	8	6	
x_{L1} , Ом	2	4	6	20	8	16	12	9	6	4	
x_{C1} , Ом	10	8	6	12	14	10	11	8	7	8	
x_{L2} , Ом	7	6	5	8	9	10	12	6	4	8	
x_{C2} , Ом	9	8	7	6	5	4	7	9	8	6	

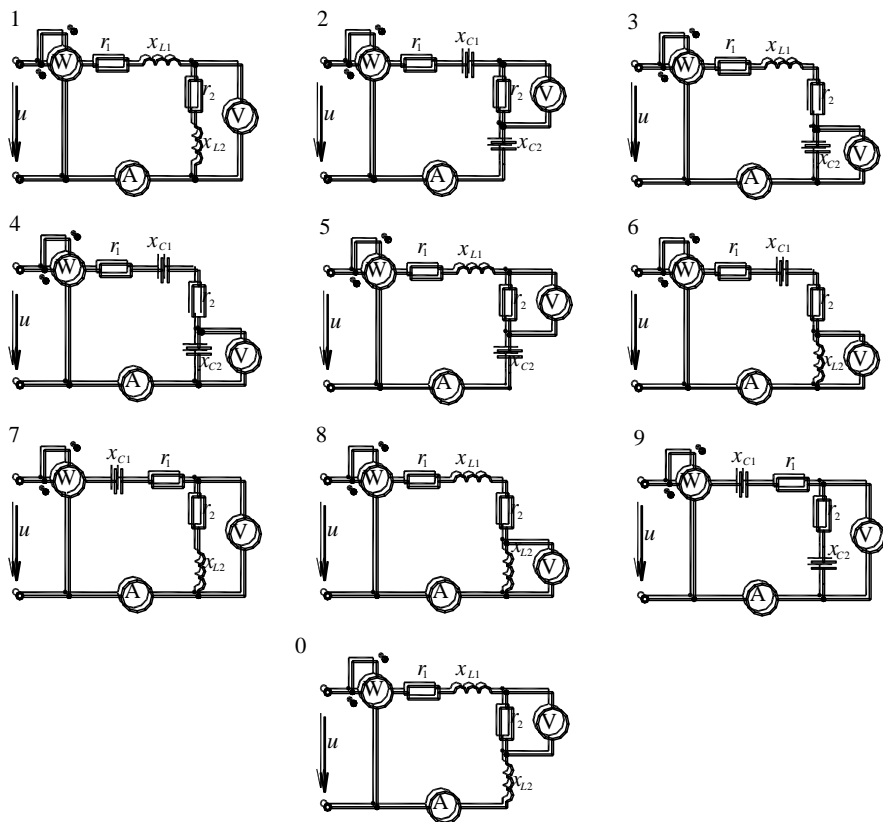


Рисунок 8.4 — Варианты электрических цепей к задаче № 1

Задача № 2. Расчёт разветвлённой цепи однофазного синусоидального тока

Электрическая цепь, подключённая к сети переменного тока с напряжением U и частотой 50 Гц, имеет параметры, численные значения которых приведены в таблице 8.5.

Необходимо:

1 Рассчитать сопротивления реактивных элементов цепи.

2 Определить действующие значения токов в ветвях с помощью комплексных чисел.

3 По полученным комплексным изображениям записать выражения для мгновенных значений напряжения на разветвлённом участке цепи и токов в ветвях.

4 Составить баланс активных и реактивных мощностей.

5 Определить характер (индуктивный или ёмкостный) и параметры элемента, который необходимо включить последовательно с источником питания, чтобы в цепи возник резонанс напряжений.

6 Построить векторную диаграмму, на которой изобразить векторы всех токов и напряжений на участках цепи.

Теоретический материал и пример расчета приведены во втором разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5].

Примечание – Решаемый вариант выбирают по двум цифрам учебного шифра. Предпоследняя цифра шифра должна совпадать с номером схемы на рисунке 8.5, а по последней цифре выбирают вариант числовых данных в таблице 8.5.

Таблица 8.5 – Числовые значения исходных данных к задаче № 2

Вариант	U , В	r_1 , Ом	L_1 , мГн	C_1 , мкФ	r_2 , Ом	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	r_3 , Ом	L_3 , мГн	C_3 , мкФ
1	220	9	15	800	9	17	1000	10	14	280
2	127	6	20	200	8	18	800	9	16	300
3	380	8	25	400	7	20	600	8	15	400
4	380	5	16	600	6	48	400	7	13	380
5	127	7	10	500	5	13	500	6	17	420
6	220	4	14	1000	12	31	700	5	13	460
7	220	3	18	700	6	20	900	4	18	520
8	127	6	12	300	7	16	450	6	12	340
9	380	5	26	650	6	18	650	8	19	450
0	127	8	24	480	8	26	800	7	11	500

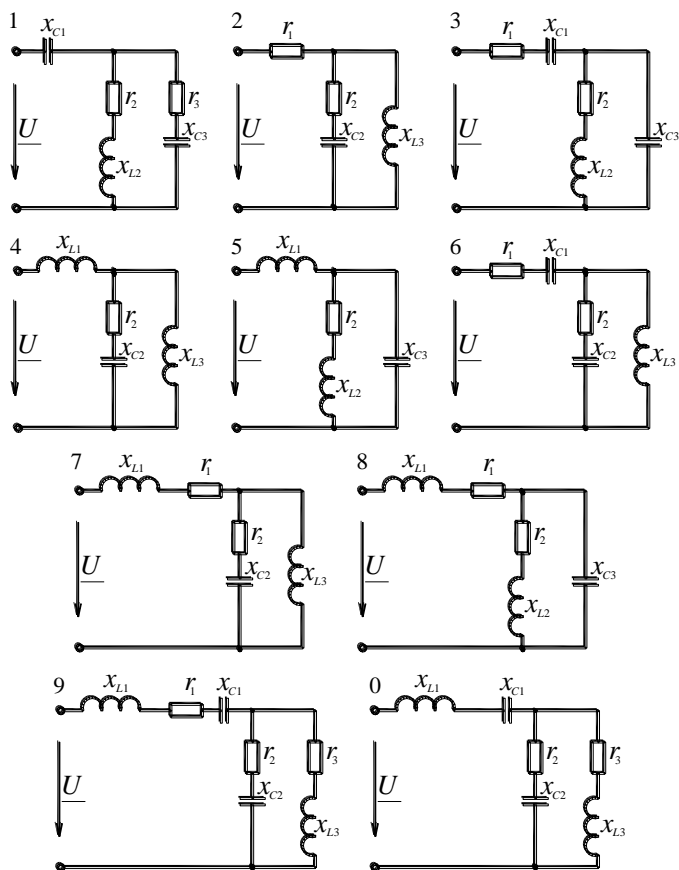


Рисунок 8.5 – Варианты электрических цепей к задаче № 2

Задача № 3. Расчёт трёхфазной цепи

К трёхфазной симметричной сети с линейным напряжением U_L подключена цепь (рисунок 8.6). Значения линейного напряжения U_L , активного r , индуктивного x_L и ёмкостного x_C сопротивлений приёмников приведены в таблице 8.6.

Необходимо:

1 При соединении приёмников звездой с нейтральным проводом определить токи в линейных и нейтральном проводах, а также активную и реактивную мощности, потребляемые нагрузкой в следующих режимах:

- при симметричной системе напряжений на нагрузке;
- обрыве одной фазы нагрузки, указанной в таблице 8.6;

в) обрыве нейтрального провода и коротком замыкании одной фазы нагрузки, указанной в таблице 8.6.

2 Построить топографическую диаграмму напряжений и на ней показать векторы всех токов для трёх рассмотренных случаев.

3 Те же элементы трёхфазной нагрузки включить треугольником и определить фазные и линейные токи. Рассчитать значения активной и реактивной мощностей, потребляемых нагрузкой. Построить векторную диаграмму напряжений и токов для этого случая.

Теоретический материал и пример расчета приведены во втором разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5].

Примечание – Решаемый вариант выбирают по двум цифрам учебного шифра. Предпоследняя цифра шифра должна совпадать с номером схемы на рисунке 8.6, а по последней цифре шифра выбирают вариант числовых данных в таблице 8.6.

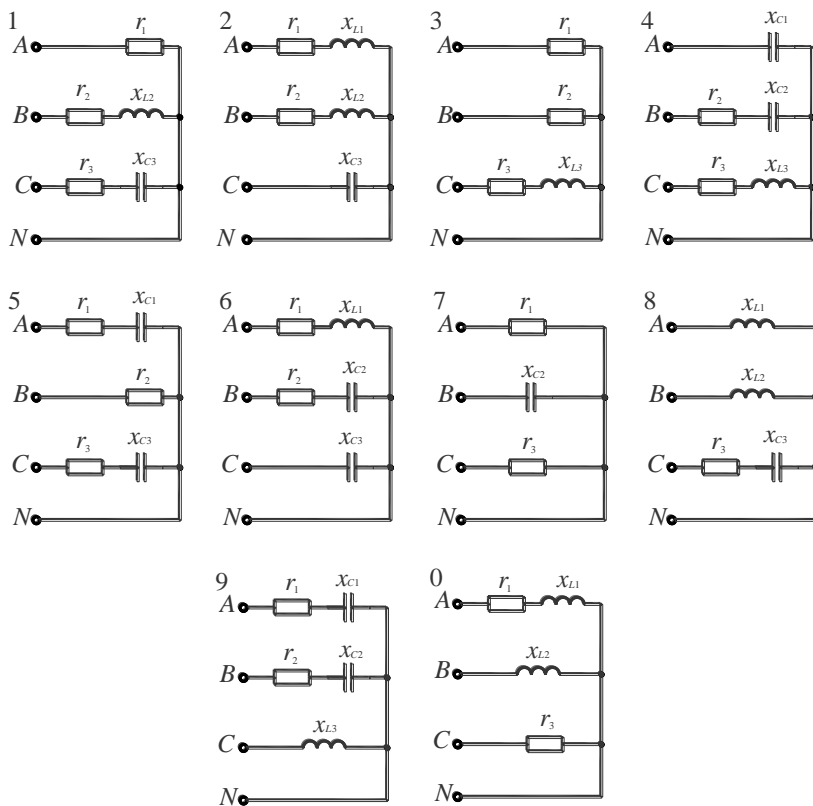


Рисунок 8.6 – Варианты электрических цепей к задаче № 3

Таблица 8.6 – Числовые значения исходных данных к задаче № 3

Вариант	$U_L, В$	Сопrotивления, Ом									Оборван провод в фазе	Короткое замыкание фазы
		r_1	x_{L1}	x_{C1}	r_2	x_{L2}	x_{C2}	r_3	x_{L3}	x_{C3}		
1	380	4	2	3	2	8	8	3	4	4	В	С
2	220	6	8	4	8	4	6	5	7	8	С	В
3	380	8	4	6	8	9	4	7	6	4	А	С
4	380	5	6	8	4	7	3	9	3	6	А	В
5	220	7	3	5	6	5	9	8	9	7	В	С
6	220	3	5	9	3	3	7	6	5	8	С	А
7	380	9	7	7	5	6	8	4	6	9	А	В
8	220	8	9	8	7	4	3	2	7	8	В	С
9	380	7	4	3	9	8	9	5	8	7	С	А
0	220	6	8	9	4	2	5	7	9	6	А	В

8.3 Контрольная работа № 3

Задача № 1. Расчёт параметров трансформатора

Трёхфазный двухобмоточный трансформатор имеет: номинальную полную мощность $S_{н}$; высшее линейное напряжение $U_{вн}$; низшее линейное напряжение $U_{нн}$; мощность потерь холостого хода P_0 ; мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$; относительное значение напряжения короткого замыкания $u_{к\%}$; относительное значение активной составляющей напряжения короткого замыкания $u_{ка\%}$; процентное изменение напряжения $\Delta u\%$; относительное значение тока холостого хода $i_0, \%$; коэффициент полезного действия η , определенный при коэффициенте нагрузки $\beta = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$; параметры упрощенной схемы замещения r_k и x_k ; параметры намагничивающей ветви r_0 и x_0 . Числовые значения заданных величин и номера пунктов задания, подлежащих выполнению, указаны в таблицах 8.7–8.16. Необходимо сформулировать условие задачи в соответствии с перечнем пунктов задания, приведённого в таблице для своего варианта, и выполнить решение.

Теоретический материал и пример расчета приведены в пятом разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5].

Примечание – Решаемый вариант выбирают по двум цифрам учебного шифра. Предпоследняя цифра шифра должна совпадать с номером группы заданий в названии таблицы для данной задачи, а по последней цифре шифра выбирают строку числовых данных в таблице. Например, для шифра 652 необходимо выбрать таблицу 8.12 (пятая группа заданий) и в этой таблице взять числовые данные из второй строки.

Перечень пунктов задания, необходимых для формирования условия задачи:

- 1 Начертить схему трансформатора.
- 2 Определить номинальные токи в обмотках трансформатора.
- 3 Определить коэффициенты трансформации фазных и линейных напряжений.
- 4 Рассчитать мощность потерь холостого хода P_0 .
- 5 Рассчитать мощность потерь короткого замыкания $P_{кз}$.
- 6 Определить параметры упрощенной схемы замещения трансформатора, активное и реактивное сопротивление фазы первичной и вторичной обмоток, полагая, что $r_1 = r_2' = r_k/2$ и $x_1 = x_2' = x_k/2$.
- 7 Начертить упрощенную схему замещения трансформатора.
- 8 Начертить T-образную схему замещения трансформатора и определить ее параметры.
- 9 Построить векторную диаграмму для упрощенной схемы замещения при значении коэффициента нагрузки $\beta = 0,75$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$).
- 10 Построить векторную диаграмму для упрощенной схемы замещения при $\beta = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 < 0$).
- 11 Определить значения процентного изменения вторичного напряжения Δu_2 при коэффициенте нагрузки $\beta = 1$ и значениях φ_2 : -90° ; -60° ; -30° ; 0° ; 30° ; 60° ; 90° . Построить график зависимости $\Delta u_2 = f(\varphi_2)$.
- 12 Определить процентное изменение вторичного напряжения Δu_2 и напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки при β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и значении φ_2 , указанном в таблице. Построить график внешней характеристики трансформатора.
- 13 Определить процентное изменение вторичного напряжения Δu_2 при значениях коэффициента нагрузки β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$ и $\varphi_2 < 0$). Определить максимальное значение КПД трансформатора η при $\cos\varphi_2 = 0,8$.
- 14 Вычислить КПД трансформатора η при значениях коэффициента нагрузки β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и $\cos\varphi_2 = 0,8$.
- 15 Определить напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки при значениях коэффициента нагрузки β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$). Построить график зависимости $U_2 = f(\beta)$.
- 16 Определить характер нагрузки ($\varphi_2 = ?$), при котором напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки не зависит от коэффициента нагрузки β .
- 17 Определить напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки и КПД трансформатора η при значениях коэффициента нагрузки β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$). Построить графики зависимостей $U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$.
- 18 Определить характер нагрузки ($\varphi_2 = ?$), при котором напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки не зависит от коэффициента нагрузки β , и для этого случая построить график зависимости $\eta = f(\beta)$ при изменении β от 0 до 1 через 0,25.
- 19 Построить в общей системе координатных осей графики зависимостей $U_2 = f(I_2)$ при $\cos\varphi_2 = 0,8$ для $\varphi_2 > 0$ и $\varphi_2 < 0$, а также $\eta = f(I_2)$ при $\cos\varphi_2 = 0,8$.
- 20 Определить значения КПД η трансформатора при значениях коэффи-

циента нагрузки β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и $\cos\varphi_2 = 0,8$ и построить график зависимости $\eta = f(\beta)$.

21 Определить напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки и КПД η трансформатора при значениях коэффициента нагрузки β : 0,25; 0,5; 0,75; 1 и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 < 0$). Построить в общей системе координатных осей графики зависимостей $U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$.

Таблица 8.7 – Числовые значения исходных данных к нулевой группе заданий

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		$u_{кв}$, %	η , %	x_k , Ом	i_0 , %	Способ соединения обмоток
		ВН	НН					
1	180	35	10,5	2,3	96,3	414,4	8	Y/Y
2	100	35	0,525	2,4	96,0	740,1	8	Y/Δ
3	50	10	0,4	2,6	95,8	96,46	8	Y/Y
4	30	6,3	0,4	2,8	95,6	62,41	8	Y/Y
5	20	10	0,4	3,0	95,1	230,7	10	Y/Y
6	10	6	0,4	3,3	94,8	157,3	10	Y/Y
7	180	6,3	0,525	2,2	96,6	11,1	6	Y/Δ
8	100	10	0,525	2,4	96,2	49,51	7,5	Y/Δ
9	50	6,3	0,525	2,6	96,0	38,28	7	Y/Δ
0	30	10	0,4	2,8	95,4	157,5	9	Y/Δ

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 2, 4, 17.

Таблица 8.8 – Числовые значения исходных данных к первой группе заданий

Вариант	Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ						
	S_n , кВА	U , кВ		P_o , кВт	$P_{кв}$, кВт	u_k , %	i_0 , %
		ВН	НН				
1	25	6,3	0,4	0,105	0,600	4,5	3,2
2	40	6,3	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
3	40	10	0,4	0,160	0,940	4,6	3,0
4	63	6,3	0,4	0,360	1,350	4,7	4,5
5	100	6,3	0,4	0,330	2,100	4,6	2,6
6	100	35	0,4	0,430	2,100	6,6	4,16
7	160	35	0,4	0,610	2,800	6,6	2,4
8	250	10	0,4	1,050	3,900	4,6	3,0
9	250	35	0,4	0,960	3,900	6,6	2,3
0	320	10	0,525	1,250	4,650	4,5	2,5

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 2, 13, 15, 20.

Таблица 8.9 – Числовые значения исходных данных ко второй группе заданий

Вариант	Схема соединения обмоток трансформатора Y/Δ						
	S _н , кВА	U, кВ		P _о , кВт	P _{кн} , кВт	u _к , %	i _о , %
		ВН	НН				
1	1000	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,4
2	1600	10	0,4	3,30	18,0	5,5	1,3
3	1000	35	0,4	2,75	12,2	6,5	1,5
4	1600	35	0,4	3,65	18,0	6,5	1,4
5	2500	10	0,4	4,60	25,0	5,5	1,0
6	2500	35	0,4	5,10	25,0	6,5	1,1
7	1000	10	0,23	2,45	12,8	5,5	1,4
8	1600	10	0,23	3,30	18,9	5,5	1,3
9	1000	35	0,23	2,75	12,8	6,5	1,5
0	1600	35	0,23	3,65	18,9	6,5	1,4

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 6, 10, 11.

Таблица 8.10 – Числовые значения исходных данных к третьей группе заданий

Вариант	S _н , кВА	U, кВ		P _{кн} , кВт	r _к , Ом	x _к , Ом	Способ соединения обмоток
		ВН	НН				
1	25	6,3	0,4	0,105	38,14	60,41	Y/Δ
2	40	10	0,4	0,160	59,23	98,57	Y/Y
3	100	35	0,23	0,465	253,4	755,6	Y/Δ
4	160	10	0,23	0,565	10,84	25,92	Y/Δ
5	250	10	0,23	0,820	6,20	16,90	Y/Δ
6	250	35	0,23	1,000	75,9	301,2	Y/Δ
7	25	10	0,4	0,135	95,12	152,8	Y/Y
8	160	35	0,4	0,610	133,9	487,7	Y/Y
9	100	6,3	0,4	0,330	8,30	16,25	Y/Y
0	63	6,3	0,4	0,360	13,47	26,36	Y/Y

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–3, 7, 18.

Таблица 8.11 – Числовые значения исходных данных к четвертой группе заданий

Вариант	Схема соединения обмоток обмоток трансформатора Y/Δ						
	S _н , кВА	U, кВ		P _о , кВт	r _к , Ом	x _к , Ом	η, %
		ВН	НН				
1	25	6,3	0,4	0,105	38,14	60,41	98,1

2	40	10	0,4	0,160	59,23	98,57	98,2
---	----	----	-----	-------	-------	-------	------

Окончание таблицы 8.11

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	r_k , Ом	x_k , Ом	η , %
		ВН	НН				
3	100	35	0,23	0,465	253,4	755,6	98,1
4	160	10	0,23	0,565	10,84	25,92	98,8
5	250	10	0,23	0,820	6,20	16,90	97,7
6	50	35	0,23	1,000	75,9	301,2	97,3
7	25	10	0,4	0,135	95,12	152,8	98,0
8	160	35	0,4	0,610	133,9	487,7	98,5
9	100	6,3	0,4	0,330	8,30	16,25	97,2
0	63	6,3	0,4	0,360	13,47	26,36	97,5

Примечания

1 КПД определен при коэффициенте нагрузки $\beta = 0,5$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$.

2 Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–4, 6, 9.

Таблица 8.12 – Числовые значения исходных данных к пятой группе заданий

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		r_k	x_k	r_0	x_0	Способ соединения обмоток
		ВН	НН					
1	180	10	0,525	12,64	27,84	755	7904	Y/Y
2	100	10	0,525	23,95	49,51	1295	1327	Y/ Δ
3	100	6,3	0,525	9,5	19,65	562	5918	Y/Y
4	20	6,3	0,4	59,4	91,57	2200	21940	Y/ Δ
5	10	10	0,4	334,2	436,78	13969	99026	Y/ Δ
6	63	6,3	0,4	13,47	26,36	1775	13893	Y/Y
7	100	6,3	0,4	8,3	16,35	1931	15134	Y/Y
8	160	35	0,4	133,9	487,7	50650	315263	Y/ Δ
9	50	6,3	0,525	20,98	38,28	1131	11282	Y/Y
0	30	6,3	0,4	37,38	62,41	1718	16446	Y/ Δ

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 8, 17.

Таблица 8.13 – Числовые значения исходных данных к шестой группе заданий

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	u_k , %	i_0 , %	η , %	φ_2
		ВН	НН					
1	25	6,3	0,4	0,105	4,5	3,2	96,6	0
2	25	6,3	0,23	0,105	4,5	3,2	96,5	-90°
3	40	6,6	0,23	0,240	4,5	4,5	96,6	-60°

4	40	10	0,4	0,160	4,6	4,6	96,7	-30°
---	----	----	-----	-------	-----	-----	------	------

Окончание таблицы 8.13

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	u_k , %	i_0 , %	η , %	φ_2
		ВН	НН					
5	25	10	0,4	0,135	4,5	4,5	96,5	30°
6	100	35	0,4	0,465	6,5	6,5	97,0	60°
7	100	5	0,23	0,465	6,5	6,5	96,9	90°
8	160	10	0,23	0,565	4,5	4,5	97,5	-45°
9	250	10	0,23	0,820	4,5	4,5	97,7	45°
0	250	35	0,23	1,000	6,5	6,5	97,6	-15°

Примечания
1 Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 5, 12, 14.
2 Схема соединения обмоток Y/Δ.

Таблица 8.14 – Числовые значения исходных данных к седьмой группе заданий

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	u_k , %	x_k , Ом	i_0 , %	Способ соединения обмоток
		ВН	НН					
1	25	6,3	0,23	0,105	4,5	59,16	3,2	Y/Δ
2	40	10	0,4	0,160	4,6	98,57	3,0	Y/Y
3	100	35	0,4	0,465	6,5	759,0	2,6	Y/Y
4	160	10	0,23	0,565	4,5	25,92	2,4	Y/Δ
5	250	35	0,23	1,000	6,5	309,0	2,3	Y/Δ
6	1600	10	0,4	3,300	5,5	3,37	1,3	Y/Y
7	2500	10	0,4	1,600	5,5	2,16	1,0	Y/Y
8	1000	10	0,23	2,400	5,5	5,35	1,4	Y/Δ
9	160	35	0,4	0,610	6,6	488,0	2,4	Y/Y
0	63	6,3	0,4	0,360	4,7	26,36	4,5	Y/Y

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–3, 7, 18.

Таблица 8.15 – Числовые значения исходных данных к восьмой группе заданий

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		u_k , %	η , %	x_k , Ом	i_0 , %	Способ соединения обмоток
		ВН	НН					

1	1600	35	0,23	6,5	98,2	9,03	1,4	Y/Δ
2	1000	10	0,23	6,5	98,1	1,28	1,4	Y/Δ
3	2500	35	0,4	6,5	98,5	4,89	1,1	Y/Δ
4	1600	10	0,4	5,5	98,3	0,70	1,3	Y/Y
5	250	10	0,23	4,5	97,7	6,20	2,3	Y/Δ

Окончание таблицы 8.15

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		u_k , %	η , %	x_k , Ом	i_0 , %	Способ соединения обмоток
		ВН	НН					
6	25	6,3	0,4	4,5	96,5	38,14	3,2	Y/Y
7	40	6,3	0,23	4,5	96,6	21,78	4,5	Y/Δ
8	25	10	0,4	4,5	96,4	95,12	3,2	Y/Y
9	100	35	0,23	6,5	96,9	253,44	2,6	Y/Y
0	165	35	0,4	6,5	97,4	133,9	2,4	Y/Y

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 2, 4, 5, 16, 21.

Таблица 8.16 – Числовые значения исходных данных к девятой группе заданий

Вариант	S_n , кВА	U , кВ		P_0 , кВт	P_k , кВт	Δu , %	i_0 , %
		ВН	НН				
1	160	35	0,4	0,610	2,800	6,6	2,4
2	100	6,3	0,4	0,330	2,100	4,6	2,6
3	63	6,3	0,4	0,360	1,350	4,7	4,5
4	10	6	0,4	0,105	0,335	5,5	10,0
5	20	10	0,4	0,220	0,600	5,5	10,0
6	30	6,3	0,4	0,250	0,850	5,5	8,0
7	50	6,3	0,525	0,350	1,325	5,5	7,0
8	180	35	10,5	1,50	4,100	6,5	8,0
9	100	10	0,525	0,730	2,400	5,5	7,5
0	180	6,3	0,525	1,00	4,000	5,5	6,0

Примечания
1 Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 8, 19.
2 Схема соединения обмоток Y/Δ.

Задача № 2. Расчёт параметров трёхфазного асинхронного двигателя

Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими величинами: номинальной мощностью P_n ;

номинальным током I_n ; номинальной частотой вращения ротора n_n ; номинальным скольжением s_n ; коэффициентом полезного действия η_n ; мощностью, потребляемой из сети в номинальном режиме, P_{1n} ; коэффициентом мощности при номинальной нагрузке $\cos\varphi_{1n}$; номинальным моментом M_n ; кратностью максимального момента относительно номинального M_{\max}/M_n ; кратностью пускового момента относительно номинального M_{1p}/M_n ; кратностью пускового тока относительно номинального I_{1p}/I_n ; критическим скольжением $s_{кр}$; числом пар полюсов обмотки статора p ; синхронной частотой вращения n_1 . Двигатель питается от сети с линейным напряжением U_n . Номинальное фазное напряжение обмотки статора $U_{1ф} = 220$ В. Числовые значения заданных величин и номера пунктов задания, подлежащих выполнению, указаны в таблицах 8.17–8.20. Необходимо сформулировать условие задачи в соответствии с перечнем пунктов задания, приведённого в таблице для своего варианта, и выполнить решение.

Теоретический материал и пример расчета приведены в шестом разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5].

Примечание – Решаемый вариант выбирается по двум цифрам учебного шифра. Предпоследняя цифра шифра должна совпадать с номером группы заданий в названии таблицы для данной задачи, а по последней цифре шифра выбирается строка числовых данных в таблице.

Перечень пунктов задания, необходимых для формирования условия задачи:

- 1 Определить схему соединения обмотки статора.
- 2 Начертить схему.
- 3 Определить число пар полюсов обмотки статора.
- 4 Определить значение пускового тока.
- 5 Вычислить частоту вращения двигателя при моменте сопротивления $M_c = 0,9 M_{\max}$.
- 6 Определить частоту вращения двигателя при моменте сопротивления $M_c = 1,4 M_n$.
- 7 Определить значение максимального момента.
- 8 Рассчитать значения момента, развиваемого двигателем при скольжениях: s_n ; $s_{кр}$; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1, и построить график механической характеристики двигателя $n = f(M)$.
- 9 Определить максимальный момент и соответствующее ему критическое скольжение.
- 10 Определить значение пускового момента при снижении напряжения на 15 % относительно номинального.
- 11 Вычислить значение максимального момента при снижении напряжения на 10 % относительно номинального.
- 12 Рассчитать установившуюся частоту вращения ротора при моменте нагрузки $M_c = 1,5 M_n$.

13 Определить коэффициент мощности двигателя при номинальной нагрузке.

14 Определить коэффициент полезного действия двигателя при номинальной нагрузке.

15 Рассчитать мощность на валу и коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке.

16 Определить мощность, потребляемую двигателем из сети при номинальной нагрузке.

17 Выяснить, можно ли запустить двигатель под нагрузкой при напряжении сети, пониженном на 15 % относительно номинального, если статический момент сопротивления нагрузки $M_c = M_n$.

Таблица 8.17 – Числовые значения исходных данных к нулевой группе заданий

Вариант	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$\cos\varphi_{1n}$	$\frac{M_{\max}}{M_i}$	$\frac{I_i}{I_i}$	U_n , В
1	5,5	2880	87,5	0,91	2,5	7,5	380
2	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	7,5	220
3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	6,0	380
4	15,0	730	87,0	0,82	2,0	6,0	220
5	18,5	975	88,0	0,87	2,0	5,0	380
6	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	6,5	220
7	30,0	590	88,0	0,81	1,9	6,0	380
8	37,0	980	91,0	0,89	2,3	6,5	220
9	45,0	1475	92,0	0,90	2,5	7,0	380
0	55,0	490	91,0	0,75	1,8	6,0	220

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–4, 8, 17.

Таблица 8.18 – Числовые значения исходных данных к первой группе заданий

Вариант	U_n , В	M_n , Нм	n_n , об/мин	I_n , А	$\cos\varphi_{1n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$
1	220	490	585	109	0.80	1.7
2	380	260	1470	75	0.89	2.0
3	220	402	2970	388	0.90	2.2
4	380	536	980	101	0.90	1.8
5	220	516	740	130	0.89	1.7
6	380	180	2925	102	0.90	2.2
7	220	71.5	2940	72	0.91	2.5
8	380	288	730	45	0.84	2.0

9	220	143	1470	71.5	0.90	2.3
0	380	731	980	137	0.90	1.8
<i>Примечание</i> – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–3, 6, 14, 17.						

Таблица 8.19 – Числовые значения исходных данных ко второй группе заданий

Вариант	U_n , В	p	M_n , Нм	I_n , А	$\cos\phi_{1n}$	s_n , %	$s_{кр}$, %
1	380	5	728	96	0,78	1,67	5,47

Окончание таблицы 8.19

Вариант	U_n , В	p	M_n , Нм	I_n , А	$\cos\phi_{1n}$	s_n , %	$s_{кр}$, %
2	380	1	60	34,5	0,92	2,0	8,30
3	380	2	487	134	0,92	2,00	7,46
4	220	5	890	199	0,79	1,67	5,47
5	220	4	516	130	0,89	1,33	3,99
6	220	3	536	175	0,390	2,00	6,59
7	380	1	120	70	0,89	1,83	8,60
8	380	4	715	101	0,90	2,00	6,15
9	220	5	653	145	0,80	2,50	7,68
0	220	2	650	307	0,92	2,00	7,46
<i>Примечание</i> – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 2, 5, 7, 14, 17.							

Таблица 8.20 – Числовые значения исходных данных к третьей группе заданий

Вариант	U_n , В	n_n , об/мин	I_n , А	$\cos\phi_{1n}$	η_n , %	$\frac{M_{max}}{M_t}$
1	220	1435	11,6	0,83	82,0	2,4
2	380	950	9,2	0,81	82,0	2,5
3	220	2900	25,6	0,88	87,5	2,8
4	380	720	13,6	0,74	83,0	2,6
5	220	1460	38,0	0,83	87,5	3,0
6	380	970	16,5	0,81	85,5	2,5
7	220	2940	71,9	0,91	88,5	2,5
8	380	590	79,2	0,78	91,0	1,8
9	380	735	37,9	0,84	88,5	2,2
0	220	1470	96,4	0,90	91,0	2,3

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–3, 8, 10, 17.

Таблица 8.21 – Числовые значения исходных данных к четвёртой группе заданий

Вариант	U_n , В	M_{\max} , Нм	$s_{кр}$, %	n_n , об/мин	I_n , А	$\cos\varphi_{1n}$
1	220	1311	5,47	590	166	0,78
2	220	243	8,60	2945	97	0,90
3	220	965	6,59	980	175	0,90
4	220	974	7,46	1470	232	0,92
5	380	1602	5,47	590	115	0,79
6	380	877	3,99	740	75	0,89
7	380	726	6,20	2960	165	0,90

Окончание таблицы 8.21

Вариант	U_n , В	M_{\max} , Нм	$s_{кр}$, %	n_n , об/мин	I_n , А	$\cos\varphi_{1n}$
8	380	1290	4,85	1480	177	0,92
9	220	2185	5,47	590	286	0,80
0	380	1207	3,99	740	101	0,90

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–3, 11, 14, 17.

Таблица 8.22 – Числовые значения исходных данных к пятой группе заданий

Вариант	U_n , В	P_{1n} , кВт	η_n , %	M_{\max}/M_i	n_n , об/мин
1	380	12,79	86,0	2,0	975
2	380	25,00	88,0	2,2	2915
3	380	33,33	90,0	2,1	735
4	380	40,66	91,0	2,5	1475
5	220	50,00	90,0	1,8	585
6	380	60,77	90,5	1,8	490
7	220	80,65	93,0	2,3	1480
8	220	97,29	92,5	2,0	980
9	220	118,27	93,0	2,3	740
0	220	97,83	92,0	2,2	2945

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–3, 12, 17.

Таблица 8.23 – Числовые значения исходных данных к шестой группе заданий

Вариант	U_n , В	P_{1n} , кВт	I_n , А	η_n , %	s_n , %	n_1 , об/мин	$s_{кр}$, %
1	380	40,18	95,7	91,5	1,66	600	5,47
2	220	41,11	121,6	90,0	1,8	3000	8,60

3	380	43,72	75,0	91,5	2,0	750	6,15
4	220	50,78	175,0	90,0	2,0	1000	6,59
5	380	80,65	136,0	93,0	1,3	1500	4,85
6	220	33,15	109,0	90,5	2,5	600	7,68
7	380	107,53	184,0	93,0	1,3	3000	5,40
8	220	106,95	305,0	93,5	14,3	1500	4,85
9	380	81,52	155,0	92,0	1,66	600	5,47
0	220	60,41	172,0	91,0	1,8	3000	8,60

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 2, 8, 13, 17.

Таблица 8.24 – Числовые значения исходных данных к седьмой группе заданий

Вариант	U_n , В	n_n , об/мин	I_n , А	$\cos\varphi_{1n}$	M_{\max} , Нм	$s_{\text{кр}}$, %	M_{\max}/M_i
1	380	2880	7,9	0,89	33,15	19,0	2,0
2	380	720	10,47	0,70	137,96	20,0	1,9
3	380	590	64,0	0,81	922,6	5,86	1,2
4	380	1470	134,0	0,92	974,0	7,46	1,1
5	380	980	99,0	0,92	964,8	6,59	1,1
6	220	2850	8,0	0,87	19,16	25,0	2,1
7	220	590	165	0,78	1311	5,47	1,0
8	220	1480	235	0,90	968,0	4,85	1,1
9	220	740	130	0,89	877,2	3,99	1,1
0	220	965	21,28	0,80	136,07	16,77	2,0

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–2, 15–17.

Таблица 8.25 – Числовые значения исходных данных к восьмой группе заданий

Вариант	U_n , В	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\cos\varphi_{1n}$	I_n , А	I_i / I_i	M_{\max}/M_i
1	220	100,0	2960	0,90	220	7,0	2,2
2	220	15,0	2940	0,91	345	7,0	2,2
3	380	30,0	735	0,81	376	6,0	2,1
4	380	45,0	740	0,84	537	6,0	2,0
5	220	22,0	2940	0,91	539	7,5	2,5
6	220	37,0	2945	0,89	912	7,5	2,5
7	380	55,0	2945	0,92	749	7,5	2,5
8	380	110,0	740	0,85	1376	6,5	2,3
9	220	90,0	1480	0,91	1959	7,0	2,3

0	380	75,0	590	0,80	930	6,0	1,8
<i>Примечание</i> – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1–2, 8, 14, 17.							

Таблица 8.26 – Числовые значения исходных данных к девятой группе заданий

Вариант	U_n , В	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\cos\varphi_{1n}$	η_n , %	I_i / I_i	M_{\max} / M_i
1	380	15,0	1465	0,88	88,5	7,0	2,3
2	220	18,5	975	0,85	87,0	6,0	2,0
3	380	22,0	730	0,84	89,0	5,5	2,0
4	220	30,0	590	0,81	88,0	6,0	1,9
5	380	55,0	490	0,78	90,5	5,5	1,8
6	220	45,0	2945	0,91	91,0	7,0	2,2

Окончание таблицы 8.26

Вариант	U_n , В	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\cos\varphi_{1n}$	η_n , %	I_i / I_i	M_{\max} / M_i
7	380	37,0	1475	0,90	91,0	7,0	2,5
8	220	55,0	985	0,89	91,5	6,5	2,1
9	380	75,0	735	0,85	92,0	5,5	1,9
0	220	90,0	590	0,82	91,5	5,5	1,8

Примечание – Пункты задания, подлежащие выполнению, – 1, 2, 4, 5, 9, 16, 17.

8.4 Контрольная работа № 4

Задача № 1. Расчёт параметров магнитной цепи

Для магнитной цепи выполнить следующие действия:

1 По заданному значению магнитной индукции B_0 в воздушном зазоре определить магнитодвижущую силу F намагничивающей катушки.

2 Показать на чертеже направление тока в катушке и определить направление и величину силы, действующей на проводник с током, расположенный в воздушном зазоре. Сила тока задана в таблице 8.27, направление тока в проводнике показано на чертеже магнитной цепи (рисунок 8.7).

3 Удвоить значение магнитодвижущей силы, найденное в первом пункте, и определить величину магнитной индукции в воздушном зазоре для этого случая.

Теоретический материал и пример расчета приведены в четвёртом разделе пособия, а также в учебниках [1–3, 5].

Примечание – Решаемый вариант выбирается по трём цифрам учебного шифра. Марка стали магнитопровода определяется по первой цифре учебного шифра. Если эта цифра чётная или 0, то берётся сталь 1211, для нечётных цифр выбирается литая сталь. Характеристики отмеченных сталей приведены в приложении А. Чертёж

магнитной цепи выбирается из рисунка 8.7 по предпоследней цифре шифра, а числовые данные берутся из таблицы 8.27 по последней цифре.

Таблица 8.27 – Числовые значения исходных данных к задаче № 1

Величина	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
I , А	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
c , мм	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
l_0 , мм	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1
B_0 Тл	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4

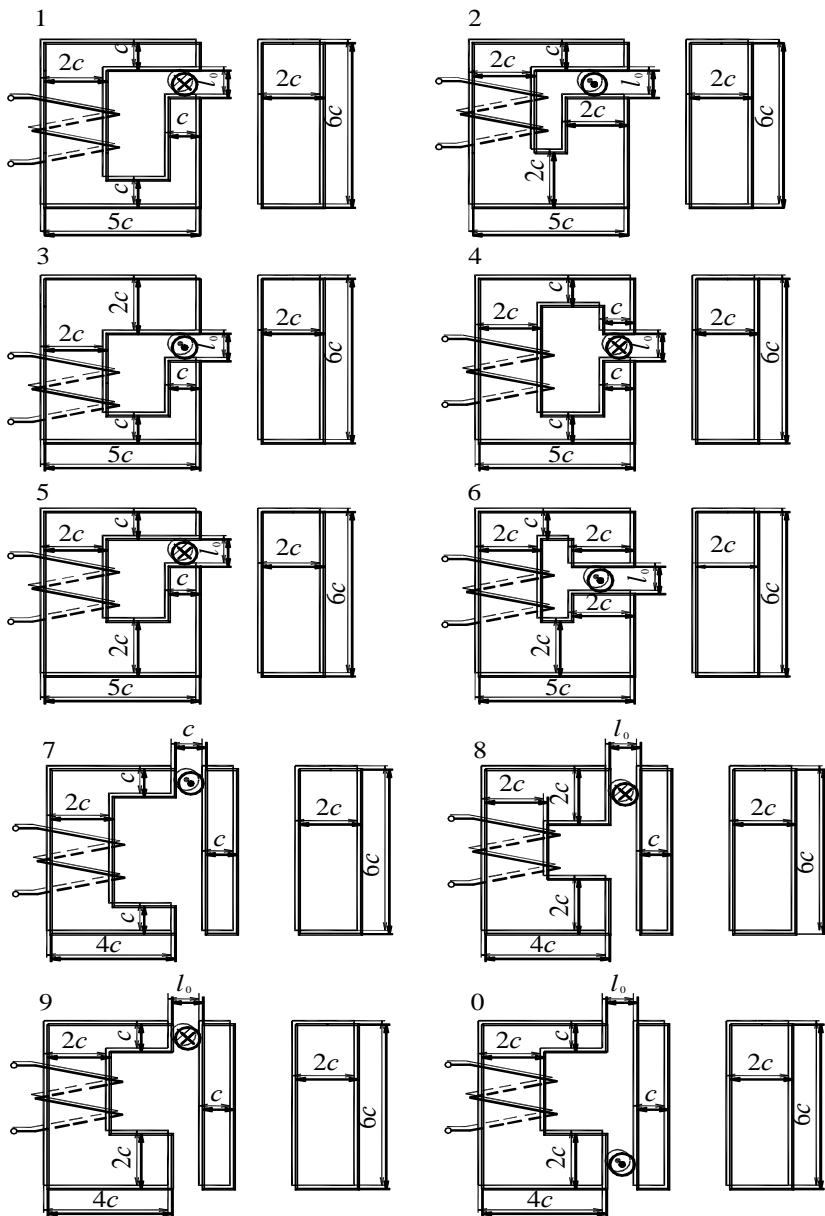


Рисунок 8.7 – Варианты магнитной цепи к задаче № 1

Задача № 2. Расчёт выпрямительного устройства

По заданной схеме выпрямления рассчитать выпрямительное устройство, работающее на активную нагрузку с идеальными вентилями и трансформатором. Средние значения выпрямленного напряжения U_d и тока I_d в нагрузке, действующее значение напряжения питающей сети U_1 , коэффициент пульсации на выходе фильтра p_2 и схема выпрямления указаны в таблице 8.28.

Требуется:

- 1 Вычертить принципиальную схему выпрямительного устройства.
- 2 Рассчитать токи и напряжения на вентильях схемы и выбрать марку диода для заданного выпрямителя.
- 3 Определить основные проектные параметры трансформатора.
- 4 Построить графики, отражающие изменение во времени напряжения и тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора, в нагрузке выпрямителя и в диодах.
- 5 Выбрать и рассчитать сглаживающий фильтр.

Примечание – Решаемый вариант выбирается по двум последним цифрам учебного шифра. Так, если учебный шифр студента 942, то номер варианта числовых данных 42, а схема выпрямителя – трёхфазная мостовая. Студент, имеющий в качестве двух последних цифр нули, выбирает вариант 100. Характеристики полупроводниковых диодов приведены в приложении А. Теоретический материал и пример расчета приведены в седьмом разделе пособия, а также в учебнике [4].

Методические указания к решению второй задачи. Для надёжной работы выпрямителя необходимо правильно выбрать марку диода. У правильно выбранного диода предельно допустимые параметры (в первую очередь, максимально допустимое обратное напряжение U_{RRM} , предельно допустимый прямой ток I_{FAVM} и амплитудное значение прямого тока I_{FMmax}) с некоторым запасом превышают реальные токи и напряжения (U_{max} , I_a , I_{max}), действующие в схеме выпрямителя при заданных значениях напряжения и мощности на выходе установки. Коэффициент запаса рекомендуется выбирать в пределах от 1,2 до 1,5. Выбор марки диода начинается с вычисления значений токов I_a , I_{max} и напряжения U_{max} . Для такого расчёта можно использовать соответствующие выражения, приведённые в разделе 6 пособия. Далее по справочнику выбирается диод, для которого

$$U_{RRM} \geq 1,2U_{max} ,$$

$$I_{FAVM} \geq 1,2I_a ,$$

$$I_{FMmax} \geq 1,2I_{max} .$$

Определение проектных параметров трансформатора заключается в расчёте номинальных значений токов и напряжений обмоток и вычислении его коэффициента трансформации и габаритной мощности. Необходимые для этого зависимости приведены в шестом разделе пособия.

Расчёту сглаживающего фильтра должен предшествовать выбор его схемного решения. В задаче схему фильтра выбирают произвольно (Г-образный или П-образный фильтр). Далее следует вычислить коэффициент сглаживания фильтра. Для выбранной схемы необходимо произвольно задаться величиной емкости конденсатора фильтра и рассчитать, используя формулы из шестого раздела, индуктивность дросселя. Ёмкость конденсатора фильтра можно брать в диапазоне от 50 до 4000 мкФ.

Таблица 8.28 – Числовые значения исходных данных к задаче № 2

Вариант	Данные для расчета				Вариант	Данные для расчета				Схема выпрямителя
	$U_1, В$	$U_a, В$	$I_a, А$	p_2		$U_1, В$	$U_a, В$	$I_a, А$	p_2	
1	127	60	10	0,1	51	220	600	0,5	0,16	Однофазная с нулевой точкой
2		400	0,1	0,12	52		700	5	0,17	
3		300	30	0,13	53		2000	0,5	0,18	
4		200	40	0,14	54		900	1	0,19	
5		150	20	0,15	55		1000	0,2	0,2	
6		100	5	0,2	56		350	10	0,3	
7		120	2	0,25	57		500	1	0,28	
8		250	3	0,3	58		450	2	0,38	
9		380	4	0,35	59		550	3	0,22	
10		270	2,5	0,4	60		650	4	0,32	
11	220	1000	0,3	0,1	61	127	60	1,5	0,1	Однофазная мостовая
12		48	2,0	0,12	62		350	50	0,15	
13		800	60	0,13	63		120	0,5	0,2	
14		12	1,5	0,14	64		200	70	0,25	
15		700	90	0,15	65		36	5,0	0,3	
16		24	3,0	0,16	66		500	100	0,1	
17		600	150	0,17	67		48	1,0	0,15	
18		36	5,0	0,18	68		800	70	0,2	
19		500	200	0,19	69		110	0,4	0,25	
20		60	0,5	0,2	70		600	50	0,3	
21		50	1,7	0,21	71		57	36	0,32	
22		80	2	0,22	72		68	27	0,34	
23		150	3	0,23	73		79	45	0,35	
24		180	4	0,24	74		80	13	0,05	
25		200	5	0,25	75		120	10	0,06	
26		250	6	0,26	76		140	65	0,07	

Окончание таблицы 8.28

Вариант	Данные для расчета				Вариант	Данные для расчета				Схема выпрямителя
	$U_1, В$	$U_d, В$	$I_d, А$	p_2		$U_1, В$	$U_d, В$	$I_d, А$	p_2	
27	220	350	7	0,27	77	380	150	18	0,08	Однофазная мостовая
28		300	8	0,28	78		160	43	0,09	
29		400	9	0,3	79		270	77	0,11	
30		450	15	0,33	80		380	85	0,44	
31	380	1000	100	0,01	81	220	270	100	0,01	Трехфазная с нулевой точкой
32		800	150	0,015	82		350	120	0,015	
33	220	600	70	0,015	83	127	400	40	0,02	
34		500	90	0,017	84		100	30	0,015	
35		850	55	0,013	85		150	50	0,01	
36		750	65	0,014	86		200	25	0,011	
37		650	75	0,016	87		250	35	0,017	
38		480	85	0,018	88		300	15	0,012	
39		380	95	0,021	89		370	9	0,009	
40		520	15	0,012	90		450	30	0,01	
41	127	200	60	0,01	91	220	120	300	0,012	Трехфазная мостовая
42		300	50	0,015	92		270	250	0,014	
43		250	45	0,02	93		370	150	0,009	
44		150	40	0,005	94		400	200	0,006	
45		100	30	0,006	95		300	150	0,007	
46	220	130	60	0,007	96	380	520	100	0,008	
47		110	55	0,008	97		620	60	0,005	
48		90	45	0,009	98		720	70	0,004	
49		120	35	0,01	99		820	80	0,0016	
50		140	30	0,006	100		900	120	0,0017	

9 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

9.1 Общие сведения о курсе и методические указания по самостоятельной работе над ним

В результате изучения курса «Электротехника и основы электроники» студенты должны:

иметь представление о электрических и магнитных цепях, методах их расчёта;

знать конструкцию, принцип действия, теорию работы и характеристики электрических машин, трансформаторов, электронных устройств, применяемых на железнодорожном транспорте;

уметь правильно эксплуатировать отмеченные устройства, проводить их испытания и определять необходимые параметры.

Основной формой изучения дисциплины является самостоятельная работа над рекомендованной литературой. Эта работа организуется и направляется рабочей программой, которую рекомендуется изучать в следующем порядке:

1 Ознакомиться с содержанием главы (раздела или параграфа), стараясь в первую очередь понять физическую сущность явлений и процессов ([1, 6] или другой аналогичный учебник).

2 Уяснить методику математического описания процессов, освоить вывод уравнений.

3 Законспектировать материал главы (параграфа), осветив соответствующий вопрос (вопросы) рабочей программы.

Наличие хорошего конспекта является обязательным условием успешного усвоения курса.

В рабочей программе приведены вопросы, которые необходимо изучить, а также объем и уровень этих вопросов на итоговом контроле (экзамен, зачет).

9.2 Контрольные вопросы для подготовки к сдаче теоретического курса

9.2.1 Вопросы к зачёту по дисциплине «Электротехника и основы электроники»

1 Основные законы электрических цепей.

2 Эквивалентные преобразования в электрических цепях.

3 Расчет простых цепей постоянного тока.

4 Расчет сложных цепей постоянного тока с помощью применения законов Кирхгофа.

5 Расчет сложных цепей методом контурных токов.

6 Расчет сложных цепей методом межузлового напряжения.

7 Потенциальная диаграмма цепи и баланс мощностей.

8 Основные понятия об однофазном переменном токе.

9 Цепь переменного тока с катушкой индуктивности.

10 Цепь переменного тока с конденсатором.

11 Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

12 Расчет цепи переменного тока при последовательном соединении R, L, C .

13 Расчет цепи переменного тока при параллельном соединении R, L, C .

14 Резонанс напряжений и его особенности.

15 Резонанс токов и его особенности.

16 Основные понятия о трехфазных цепях.

17 Соединение трехфазных потребителей «звездой» без нейтрального провода.

18 Соединение трехфазных потребителей «звездой» с нейтральным проводом.

19 Соединение трехфазных потребителей «треугольником».

20 Мощности трехфазных цепей.

21 Основные понятия о нелинейных цепях постоянного тока.

22 Расчет нелинейной цепи с последовательным соединением элементов.

23 Расчет нелинейной цепи с параллельным соединением элементов.

24 Расчет нелинейной цепи со смешанным соединением элементов.

25 Основные понятия о магнитных цепях постоянного тока.

26 Расчет магнитодвижущей силы по заданному значению магнитной индукции в сечении магнитопровода.

27 Расчет индукции в сечении магнитопровода по заданному значению магнитодвижущей силы.

28 Основные понятия об электрических измерениях. Погрешности измерений и классы точности измерительных приборов.

29 Магнитоэлектрический измерительный механизм.

30 Электромагнитный измерительный механизм.

31 Электродинамический измерительный механизм.

32 Индукционный измерительный механизм.

33 Основные понятия о цифровых вольтметрах.

34 Основные понятия о цифровых частотомерах.

35 Расширение пределов измерения амперметров постоянного тока.

36 Расширение пределов измерения вольтметров постоянного тока.

37 Расширение пределов измерения амперметров переменного тока.

38 Расширение пределов измерения вольтметров переменного тока.

9.2.2 Вопросы для подготовки к экзамену по дисциплине «Электротехника и основы электроники»

1 Конструкция, принцип действия и назначение всех частей трансформатора.

2 Основные электрические соотношения в трансформаторе.

3 Приведенный трансформатор и его схема замещения.

4 Опыт холостого хода трансформатора.

5 Опыт короткого замыкания трансформатора.

- 6 Работа трансформатора под нагрузкой.
- 7 Параллельная работа трансформаторов.
- 8 Особенности трехфазных трансформаторов.
- 9 Области применения трансформатора.
- 10 Конструкция, принцип действия и назначение всех частей асинхронного двигателя.
- 11 Основные электрические соотношения в асинхронном двигателе.
- 12 Вращающий момент и механическая характеристика асинхронного двигателя.
- 13 Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.
- 14 Конструкция, принцип действия и назначение всех частей синхронной машины.
- 15 Способы возбуждения синхронной машины.
- 16 Реакция якоря синхронного генератора.
- 17 Характеристики синхронного генератора.
- 18 Характеристики синхронного двигателя.
- 19 Пуск и регулирование частоты вращения синхронного двигателя.
- 20 Конструкция, принцип действия и назначение всех частей машины постоянного тока.
- 21 Способы возбуждения машин постоянного тока.
- 22 Якорные обмотки машин постоянного тока.
- 23 Коммутация в машинах постоянного тока.
- 24 Характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.
- 25 Характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.
- 26 Особенности двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.
- 27 Пуск двигателя постоянного тока.
- 28 Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока.
- 29 Тормозные режимы машин постоянного тока.
- 30 Области применения машин постоянного тока.
- 31 Основные электронные приборы, применяемые на практике.
- 32 Схемы включения транзистора в усилительных каскадах.
- 33 Стабилизаторы постоянного напряжения.
- 34 Выпрямители однофазного переменного тока.
- 35 Выпрямители трёхфазного переменного тока.
- 36 Усилители переменного тока.
- 37 Усилители постоянного тока.
- 38 Мультивибратор на транзисторах.
- 39 Генератор синусоидальных сигналов.
- 40 Логические элементы цифровых устройств.
- 41 Разновидности триггеров и их применение в электронных устройствах.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица А.1 – Кривая намагничивания листовой электротехнической стали марки 1211

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,40	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,6	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2,0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760
2,5	3840	3920	4000	4080	4160	4240	4320	4400	4480	4560
<p><i>Примечание – Для получения напряжённости магнитного поля H, А/м, необходимо значение, взятое из таблицы А.1, умножить на 100.</i></p>										

Таблица А.2 – Кривая намагничивания литой стали

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,50	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,00	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,98	9,11
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,0 4	10,22	10,39	10,56	10,7 6
1,1	10,90	11,08	11,27	11,47	11,67	11,8 7	12,07	12,27	12,48	12,6 9
1,2	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,5 5
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0

Примечание — Для получения напряжённости магнитного поля H, А/м, необходимо значение, взятое из таблицы А.2, умножить на 100.

Таблица А.3 – Параметры некоторых полупроводниковых диодов

Марка диода	Постоянный прямой ток $I_{F\text{AVM}}$, А	Максимальное обратное напряжение U_{RRM} , В	Максимальный прямой ток $I_{F\text{Mmax}}$, А
Д112–10	10	100–1400	31
2Д210Г	10	1000	31
2Ц102В	0,1	1200	0,3
Д112–25	25	100–1400	80
2Ц202Б	0,5	4000	1,5
Д1010	0,3	2000	1
КД208А	1,5	100	5
КД202Б	2	35	6
Д112–32	32	100–1400	100
Д132–50	50	100–1400	160
Д132–80	80	100–1400	250
2Д202В	3	70	10
Д141–100	100	300–1600	315
2Д106А	0,3	100	1
Д171–400	400	300–1600	1250
В2–320	320	150–4000	1000
Д151–160	160	300–1600	500
Д1007	0,5	8000	1,5
Д229А	0,4	200	1,5
КД205Д	0,5	100	1,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Касаткин, А. С.** Электротехника : учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Высш. шк., 2000. – 542 с.
- 2 **Китунович, Ф. Г.** Электротехника : учеб. для вузов / Ф. Г. Китунович. – Минск: Высш. шк., 1999. – 400 с.
- 3 **Волынский, Б. А.** Электротехника : учеб. для вузов / Б. А. Волынский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников. – М. : Высш. шк., 1986. – 528 с.
- 4 **Лачин, В. Н.** Электроника : учеб. для вузов / В. Н. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д : Изд-во «Феникс», 2004. – 576 с.
- 5 **Сборник задач по электротехнике и основам электроники** / под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1987. – 288 с.
- 6 **Новикова, Л. И.** Электротехника : метод. пособие к выполнению расчётно-графических работ по дисц. «Электротехника», «Электротехника и пром. электроника», «Электротехника, электрические машины и аппараты» для студентов неэлектрических специальностей / Л. И. Новикова, Т. Т. Розум. – Минск : БНТУ, 2003. – 39 с.
- 7 **Электротехника** : задания на контрольные работы № 3 и 4 с краткими метод. указаниями к решению задач для студентов III курса / МПС СССР. – М. : ВЗИИТ, 1990. – 63 с.
- 8 **Диоды и тиристоры** / под ред. А. А. Чернышева. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1980. – 176 с.
- 9 **Проектирование электрических машин** / под ред. И. П. Копылова. – М. : Энергия, 1980. – 495 с.