

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Стахановский инженерно-педагогический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Луганский государственный университет имени
Владимира Даля»

Кафедра электромеханики и транспортных систем

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

для студентов направления подготовки

Профессиональное обучение (по отраслям)

профиль: «Безопасность технологических процессов и производств»,
«Информационные технологии и системы».

Луганск 2023

УДК 621.3

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом
ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»
(протокол № от . .2023 г.)*

Конспект лекций по дисциплине «**Электротехника и основы электроники**» для студентов направления подготовки **Профессиональное обучение (по отраслям), профиль:** «Безопасность технологических процессов и производств», «Информационные технологии и системы», / Сост.: А.Г. Петров, Е.Н. Шелемей, – **Стаханов:** ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», 2023. – 92 с.

Конспект лекций содержит 8 лекций, описание которых сопровождается теоретическими сведениями. К каждой теме приведены вопросы для самопроверки, список рекомендованной литературы.

Предназначен для студентов профиля «Электроснабжение».

Составители:	доц. Петров А.Г. асс. Шелемей Е.Н.
Ответственный за выпуск:	доц. Петров А.Г.
Рецензент:	доц. Черникова С.А.

© Петров А.Г. Шелемей Е.Н., 2023
© ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЛЕКЦИЯ 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	6
ЛЕКЦИЯ 2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	13
ЛЕКЦИЯ 3. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ	23
ЛЕКЦИЯ 4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ.....	30
ЛЕКЦИЯ 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ТРАНСФОРМАТОРЫ	39
ЛЕКЦИЯ 6. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	50
ЛЕКЦИЯ 7. АСИНХРОННЫЕ И СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	60
ЛЕКЦИЯ 8. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	74
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника и электроника – область теоретического изучения и практического применения и электрических и магнитных явлений.

Теория электрических цепей, фундамент которой заложен законами Ома и Кирхгофа, изучает электромагнитные явления:

а) в технических системах, предназначенных для производства, передачи и распределения электрической энергии (энергетическое направление);

б) в средствах информационно-измерительной и вычислительной техники (информационное направление);

в) в системах автоматического управления, электромеханических и электротехнологических устройствах (технологическое направление).

Электромагнитное поле, являющееся особой формой материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами, обладает свойствами оказывать механическое воздействие на заряженные частицы вещества, намагниченные тела и токоведущие проводники. Переход от полной картины электромагнитного поля к упрощенным процессам в электрическом и магнитном полях связан с тем, что в области неподвижных заряженных тел обнаруживается только электрическое поле, а вокруг неподвижных магнитов – магнитное.

Разнообразное применение электрической энергии объясняется ее преимуществами перед другими видами энергии, так как она сравнительно просто получается из других форм энергии, передается на различные расстояния и преобразуется в другие формы энергии, что делает ее незаменимой во всех отраслях хозяйственной деятельности человека. Во всех современных электротехнических устройствах, предназначенных для различных технических целей, происходят определенные энергетические преобразования:

а) электрические генераторы и двигатели служат для взаимного преобразования механической и электрической энергии, а при помощи трансформаторов электроэнергия одного напряжения преобразуется в электроэнергию другого напряжения;

б) в электрической лампе и светодиоде происходит процесс преобразования электрической энергии в световую, а солнечные батареи и фотоэлементы служат основными источниками энергии космических аппаратов;

в) во многих электротехнических устройствах электроэнергия перераспределяется между отдельными элементами этих устройств.

Для передачи электрической энергии в заданных направлениях применяются проводниковые материалы с высокой удельной проводимостью, которые без значительных потерь электрической энергии проводят электрический ток. При этом для концентрации энергии и уменьшения объема электрического поля используют конденсаторы, заполненные диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью, а для концентрации энергии и уменьшения объема магнитного поля используются ферромагнитными материалами с высокой магнитной проницаемостью.

При расчетах электротехнических установок встречаются трудности, связанные с идеализацией задач в процессе их математической постановки. Поэтому существуют два основных подхода к решению электротехнических задач: а) с использованием интегральных величин, характеризующих работу установки в целом: электрического тока, напряжения, ЭДС, магнитного потока, МДС; б) с использованием дифференциальных понятий, характеризующих состояние материала в различных местах этого устройства.

К первому подходу применима теория электрических цепей, ко второму – теория электромагнитного поля, но физически общей задачей является задача, формулируемая в теории электромагнитного поля. В основе теории цепей лежат законы Ома и Кирхгофа, известные из курса физики, а в основе теории электромагнитного поля – уравнения Максвелла, дающие математическую формулировку электромагнитных процессов в пространстве.

Электроника – область науки, техники и производства, охватывающая исследование и разработку электронных устройств. При этом к аналоговой электронике относятся электронные средства, предназначенные для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону непрерывной функции, а к цифровой электронике – средства для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону дискретной функции.

Промышленное развитие электроники подразделяется на энергетическое направление, связанное с преобразованием переменного и постоянного токов для нужд энергетики, металлургии, транспорта и информационное, к которому относятся электронные средства, обеспечивающие измерение, контроль и управление различными процессами.

Актуальными вопросами в настоящее время являются способы реализации сложных алгоритмов обработки информации в минимальных объемах с помощью цифровых дискретных электронных устройств, что предполагает унификацию цифровых элементов, совместимость с интегральной технологией и компьютерное моделирование электронных схем.

ЛЕКЦИЯ 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.

Цель лекции: Ознакомление с топологией, элементами и основными законами электрических цепей. Изучение методов эквивалентного преобразования схем электрических цепей с пассивными элементами.

1.1 Топологические характеристики, элементы и схемы электрических цепей

Исследование электрических явлений и их практического применения исторически началось с изучения свойств постоянного тока, т. е. тока, неизменного во времени. Он представляет собой направленное упорядоченное движение частиц, несущих электрические заряды. Как известно из курса физики, носителями заряда в металлах являются свободные электроны, а в жидкостях – ионы. Упорядоченное движение носителей заряда в проводниках вызывается электрическим полем, которое создается в них источниками электрической энергии. Источники электрической энергии преобразуют химическую, механическую и другие виды энергии в электрическую. Источник электрической энергии характеризуется величиной, направлением ЭДС и внутренним сопротивлением. Экспериментальные исследования свойств постоянного тока, проведенные выдающимися учеными, как А.М.Ампер, Г.С.Ом, Ш.О.Кулон, В.Э.Вебер, Г.Р.Герц, Д.К. Максвелл и др. позволили выявить ряд закономерностей и понятий, которые явились фундаментальными законами электротехники.

Многие современные электротехнические устройства являются устройствами постоянного тока, предназначенные для решения различных задач: распределения, контроля, преобразования и использования электрической энергии. Так, постоянный ток применяется на городском и железнодорожном транспорте, электронике, медицине, промышленности. Развиваются и совершенствуются различные типы источников электрической энергии постоянного тока: солнечные батареи и фотоэлементы – источники энергии космических аппаратов; МГД-генераторы для электрических станций.

Постоянный ток принято обозначать I [А], ЭДС источника – E [В], сопротивление R [Ом], проводимость – g [См], индуктивность – L [Гн], емкость – C [Ф]: размерности соответствуют Международной системе единиц СИ.

Электромагнитное устройство с происходящими в нем и в окружающем его пространстве физическими процессами на практике заменяют некоторым расчетным эквивалентом – электрической цепью. **Электрическая цепь** – это соединение друг с другом источников электрической энергии и нагрузок, по которым протекает электрический ток.

Графическое изображение электрической цепи с помощью условных знаков называют **электрической схемой**. Зависимость тока, протекающего по сопротивлению, от напряжения на этом сопротивлении принято называть вольтамперной характеристикой (ВАХ). По оси абсцисс откладывается напряжение, по оси ординат – ток (рисунок 1.1).

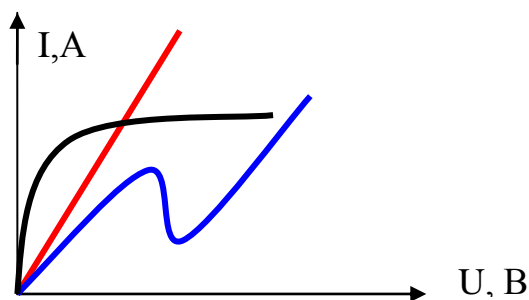


Рисунок 1.1 – ВАХ элементов электрической цепи

Сопротивления, ВАХ которых являются прямыми линиями, называют линейными сопротивлениями, а электрические цепи только с линейными сопротивлениями – линейными электрическими цепями. Электрические цепи с нелинейными сопротивлениями – нелинейными электрическими цепями.

Кроме этого, электрические цепи подразделяются на разветвленные и неразветвленные. В простейшей неразветвленной схеме одна ветвь, по элементам которой протекает один ток, а разветвленная схема состоит из нескольких ветвей. Ветвь – это участок цепи с последовательно соединенными элементами, заключенный между двумя узлами. В каждой ветви электрической схемы протекает свой ток. Узел – точка цепи, в которой сходятся не менее трех ветвей. Таким образом, схема электрической цепи содержит двойную информацию: о составе элементов цепи и о способе их соединения.

Реальное электромагнитное устройство представляется электрической цепью в виде элементов, связанных между собой. Связи между элементами осуществляются соединением их выводов (зажимов или полюсов). Наиболее распространенные элементы связаны с остальной частью цепи двумя выводами и носят название **двухполюсники**.

Элементы электрической цепи, преобразующие другие виды энергии в электромагнитную, расходуемую или запасаемую, называют источниками (генераторами) или активными элементами. Реальные источники энергии в основном работают в одном из режимов:

1. Напряжение на зажимах источника мало зависит от протекающего тока – источник ЭДС (обозначение E);
2. Ток, генерируемый источником J , не зависит от напряжения.

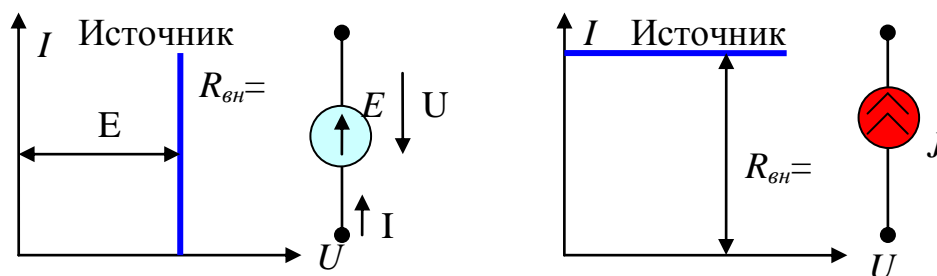


Рисунок 1.2 – ВАХ идеальных источников энергии

Источник ЭДС имеет внутреннее сопротивление $R_{вн}$, а стрелка на схеме рисунка 1.3 а указывает направление возрастания потенциала внутри источника. На схеме замещения источника тока с сопротивлением $R_{вн}=\infty$ (рисунок 1.3 б) стрелка показывает положительное направление тока источника тока.

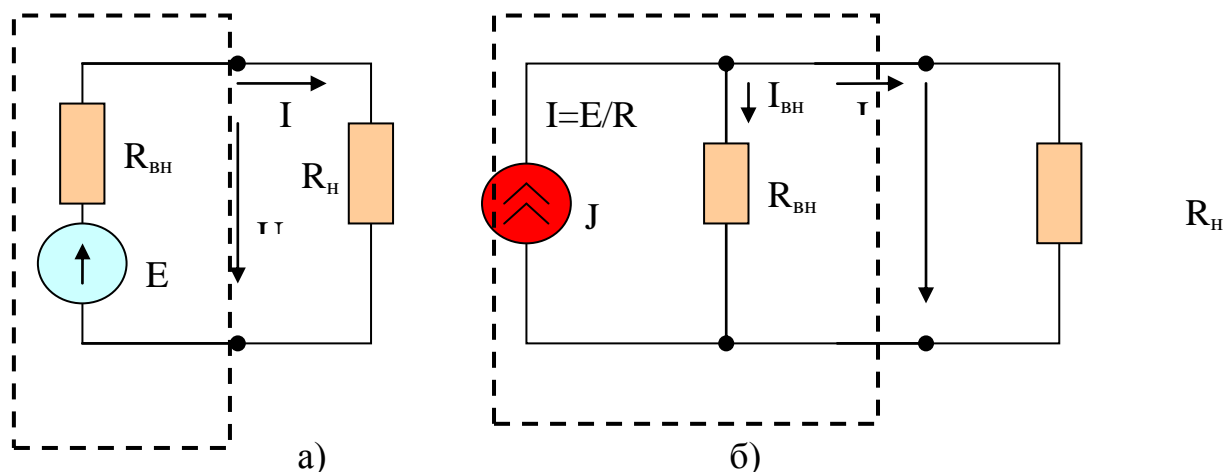


Рисунок 1.3 – Схемы замещения идеальных источников энергии: источника ЭДС (а), источника тока (б)

Идеальный источник ЭДС нельзя заменить идеальным источником тока, так как не равны энергетические соотношения $EI \neq UJ$, развиваемые ЭДС – $(E \cdot I)$ и источником тока $J - (U \cdot J)$.

Элементы цепи, которые необратимо потребляют или накапливают электромагнитную энергию – пассивные элементы. К **пассивным элементам** относятся резистивный, индуктивный и емкостный элементы. Необратимое потребление энергии с преобразованием ее в тепловую, механическую или химическую осуществляется в резистивном элементе. Накопление энергии в магнитном поле осуществляется в индуктивном элементе, а процесс накопления энергии в электрическом поле осуществляется в емкостном элементе.

Перед анализом цепи на ее схеме указывают условные положительные направления токов или напряжений на участках цепи. Выбор направления является произвольным, но в основном выбирают предполагаемое направление движения положительных зарядов.

1.2 Основные законы и соотношения в цепях постоянного тока

В простейшем виде закон Ома определяет зависимость $I = \frac{U}{R}$ между током и напряжением резистивного элемента электрической цепи. В общем случае закон Ома (или закон Ома для участка цепи) определяет зависимость между напряжением и током для неразветвленного участка электрической цепи, содержащей произвольное число элементов

$$I = \frac{U + \sum \pm E_i}{\sum R_i} = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) \pm E}{\sum R_i}, \quad (1.1)$$

где $\sum R_i$ – арифметическая сумма сопротивлений всех резистивных элементов; φ_a, φ_b – величины потенциалов на участке цепи; $\sum E_i$ – алгебраическая сумма всех источников ЭДС.

При этом ЭДС, направления которых совпадают с положительным направлением тока, записываются со знаком «+», а ЭДС, направления которых противоположны положительному направлению тока, со знаком «-».

Все электрические цепи подчиняются первому и второму законам Кирхгофа, которые используют для нахождения токов в ветвях схемы. Для составления независимых уравнений по закону Ома и двум законам Кирхгофа необходимо произвольно выбрать положительные направления токов в ветвях и обозначить их на схеме, а также положительные направления обхода контура (рисунок 1.4).

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу электрической схемы, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1.2)$$

Физически это означает, что движение зарядов в цепи происходит так, что ни в одном из узлов они не накапливаются.

Второй закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС вдоль контура:

(1.3)

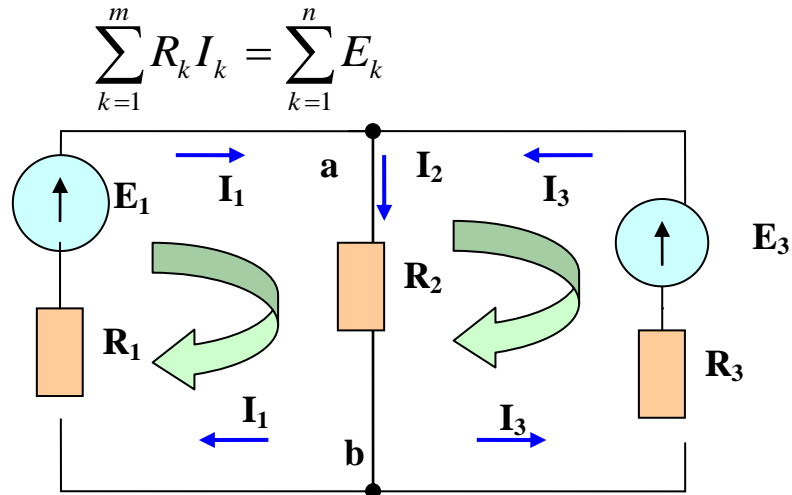


Рисунок 1.4 – Схема электрической цепи

По первому закону Кирхгофа составляют число уравнений, равное числу узлов без единицы: $n=(y-1)$ – число уравнений, y – число узлов. При составлении независимых уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо выбрать контуры так, чтобы каждый следующий контур содержал ветвь, не входящую в предыдущий контур. По второму закону Кирхгофа составляют число уравнений, равное числу ветвей (b) схемы за вычетом ветвей с источниками тока (b_{ucm}) и числа уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа:

$$N = b - b_{ucm} - (y - 1) = b - b_{ucm} - y + 1 = b - b_{ucm} - n \quad (1.4)$$

Таким образом, для схемы рисунка 1.4 система уравнений должна содержать одно уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа и два уравнения – по второму закону:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = E_1 \\ -I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 = -E_3 \end{cases} \quad (1.5)$$

Совместное решение системы уравнений определяет токи в ветвях схемы. Если для какого-либо тока получено отрицательное значение, следует, что его действительное направление противоположно выбранному.

Для анализа работы электрических цепей и изучения режимов их работы, важно знать распределение потенциала в цепи, который можно наглядно представить в виде графического изображения, называемого **потенциальной диаграммой**. Потенциальная диаграмма является иллюстрацией второго закона Кирхгофа для замкнутого контура. Она строится следующим образом: одну из точек контура соединяют с землей (т.е. ее потенциал принимают равным нулю), а потенциалы остальных точек контура схемы вычисляются по формуле $\varphi_a - \varphi_b = U = IR$ или при наличии на участке цепи источника ЭДС: $\varphi_c = \varphi_d \pm E$. Необходимо помнить, что **ток течет от высшего потенциала к низшему**. По оси абсцисс откладываются величины сопротивлений цепи в том порядке, в котором они следуют друг за другом в контуре. По оси ординат откладываются вычисленные потенциалы точек цепи.

Рассмотрим простейшую электрическую схему:

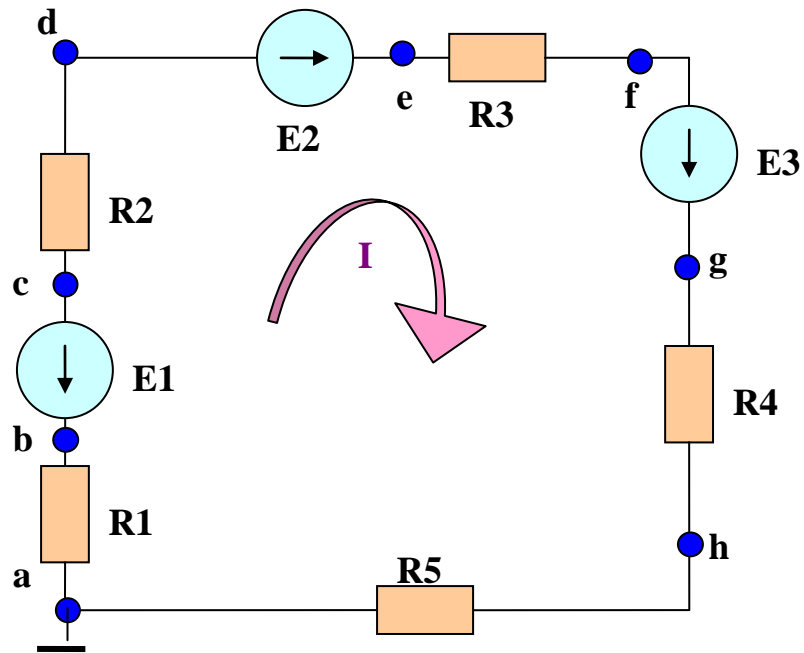


Рисунок 1.5 – Последовательный контур электрической цепи

Производим вычисления потенциалов точек рассматриваемого контура, начиная обход контура с точки, потенциал которой мы приняли $\varphi_a = 0$. При переходе от точки «а» к точке «в» проходим сопротивление R_1 , падение напряжения на котором равно $U=IR_1$, т.е. потенциал точки «в» будет меньше потенциала точки «а» на величину падения напряжения на сопротивлении R_1 :

$$\varphi_a - \varphi_b = IR_1, \quad (1.6)$$

Между точками «в» и «с» в цепи включен источник ЭДС, работающий в режиме потребителя. Разность потенциалов на его зажимах будет:

$$\varphi_b - \varphi_c = E_1, \quad (1.7)$$

Потенциал точки «d» ниже потенциала точки «с» на величину падения напряжения на сопротивлении R_2 , т.е.

$$\varphi_c - \varphi_d = IR_2, \quad (1.8)$$

ЭДС E_2 работает в режиме генератора, т.е. при этом потенциал точки «е» будет выше потенциала точки «в» на величину ЭДС E_2 :

$$\varphi_e = \varphi_d + E_2. \text{ и т. д.} \quad (1.9)$$

По результатам аналогичных расчетов строим потенциальную диаграмму:

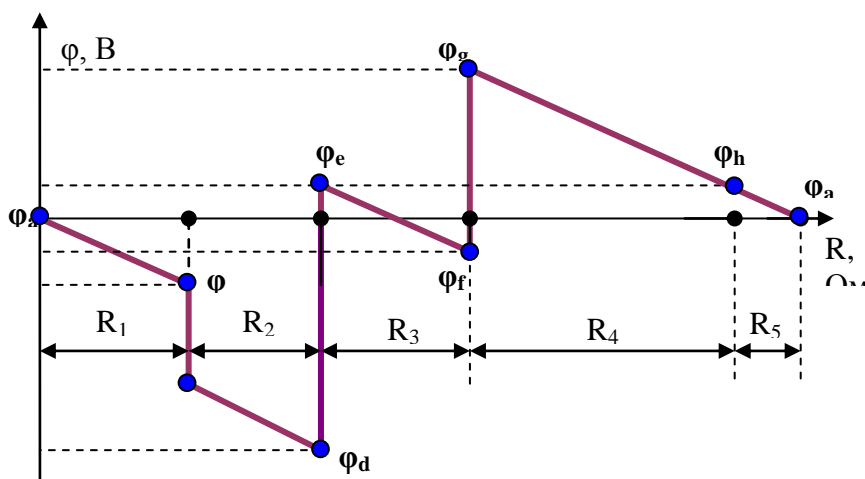


Рисунок 1.6 – Потенциальная диаграмма

1.3 Методы эквивалентного преобразования схем электрических цепей с пассивными элементами

Основные соотношения при последовательном, параллельном соединении потребителей постоянного тока изучаются в курсе физики, поэтому рассмотрим только смешанное соединение потребителей и метод взаимного преобразования пассивной трехлучевой звезды и треугольника сопротивлений.

При **смешанном соединении** резистивных элементов (рисунок 1.7):

а) ток в неразветвленной части схемы будет определяться

$$I_1 = \frac{U_{cd}}{R1 + R_{эк}} = \frac{U_{cd}}{R1 + \frac{R2 * R3}{R2 + R3}} \quad (1.10)$$

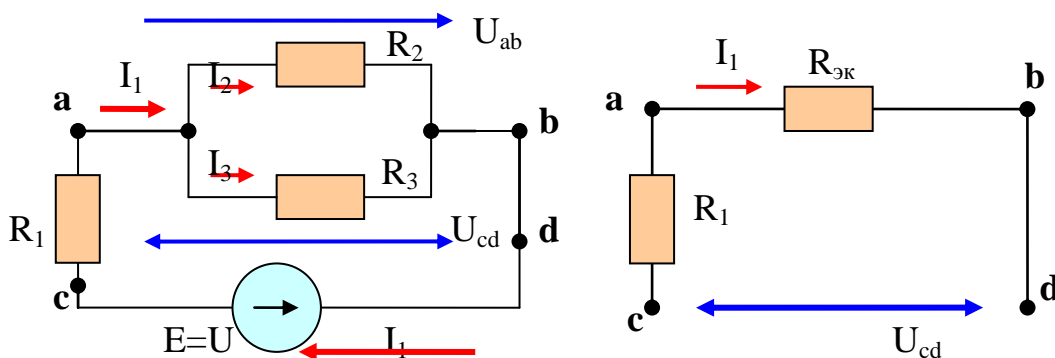


Рисунок 1.7 – Смешанное соединение резистивных элементов

Взаимное преобразование трехлучевой звезды и треугольника сопротивлений. Расчет сложной электрической цепи упрощается, если в ней группу резистивных элементов заменить другой эквивалентной группой, в которой резистивные элементы соединены иначе. После такой замены режим работы остальной части электрической цепи не изменится. Данное преобразование применяется для сложных цепей постоянного тока и цепей трехфазного тока.

Соединение трех сопротивлений, имеющее вид трехлучевой звезды называют соединением «звезда». Соединение трех сопротивлений так, что они образуют собой стороны треугольника – соединением «треугольник».

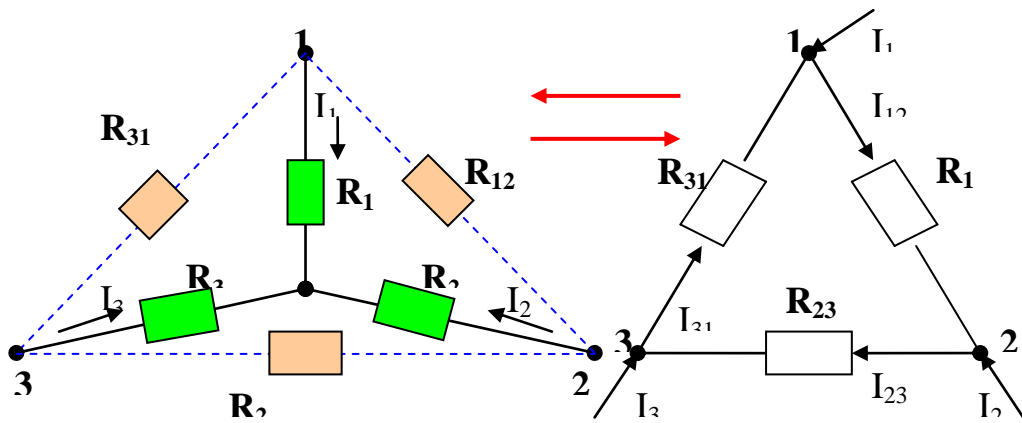


Рисунок 1.8 – Взаимное преобразование резистивных элементов из схемы соединения в «треугольник» в схему «звезда»

Преобразование в «треугольник»

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} + R_1 + R_2; R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} + R_2 + R_3; R_{31} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} + R_1 + R_2 \quad (1.11)$$

Преобразование в «звезду»

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (1.12)$$

Замена источников энергии. При вычислении эквивалентного (или иначе «входного») сопротивления электрических схем принимают, что источники энергии заменяются их внутренними сопротивлениями $R_{вн}$. Из предыдущего материала знаем, что $R_{вн} = 0$ идеального источника ЭДС, то при замене источника участок ветви с ЭДС «закорачивают», а $R_{вн} = \infty$ идеального источника тока, тогда участок ветви с источником тока J «разрывают».

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие токи называются переменным и постоянным?
- 2) Как рассчитывается эквивалентное сопротивление при последовательном и параллельном соединении резисторов?
- 3) Сформулировать закон Ома.
- 4) Сформулировать законы Кирхгофа.
- 5) Сформулировать закон Джоуля-Ленца.
- 6) Какова цель расчета электрической цепи?

ЛЕКЦИЯ 2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель лекции: Ознакомление с основными характеристиками синусоидальных сигналов, их векторным и комплексным изображениями, связями между синусоидальными напряжениями и токами на элементах цепи. Изучение комплексного метода расчета цепей синусоидального тока и явлений «фазового» резонанса в колебательных контурах.

2.1 Основные характеристики синусоидальных сигналов

В электрических цепях электроустановок находят применение периодические ЭДС, напряжения и токи, которые изменяются во времени через равные промежутки, называемые периодом. Из всех видов переменных во времени сигналов наиболее распространены синусоидальные токи и напряжения. Они применяются при анализе процессов в системах управления и переработки информации, так как легко генерируются в широком диапазоне, а их основные характеристики удобно измерять и регистрировать.

Электрические цепи, в которых действуют синусоидальные ЭДС и токи, называют электрическими цепями синусоидального тока. К электрическим цепям синусоидального тока применимы те же понятия контура, ветви, узла и схемы цепи, как и для постоянного тока.

Напряжения, токи и ЭДС в электрических цепях синусоидального тока и схемах замещения, соответствующие различным моментам времени, называются мгновенными значениями и обозначаются строчными буквами i, u, e .

Элементами схем замещения цепей синусоидального тока являются источники синусоидального тока и синусоидальной ЭДС, резистивные, индуктивные и емкостные элементы. Если о резистивном элементе можно судить по таким параметрам, как вольт-амперная характеристика, то для индуктивного элемента – это вебер-амперная характеристика (зависимость потокосцепления в катушке индуктивности от протекающего тока (линейная или нелинейная), а для емкостного элемента – кулон-вольтная характеристика (зависимость заряда на обкладках конденсатора от приложенного напряжения).

Периодическая синусоидальная величина характеризуется (рисунок 3.1):

1. Максимальным значением (амплитудой): ЭДС – E_m ; напряжения – U_m ; тока – I_m .
2. Периодом изменения функции $f(t)=f(t+T)$, т. е. промежутком времени, охватывающим законченный процесс, где t – текущее значение времени; T – продолжительность периода, измеряется в секундах [с].

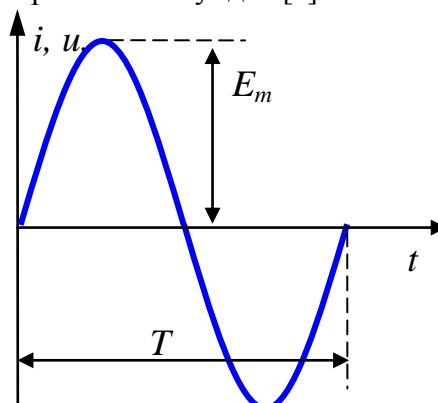


Рисунок 2.1 – График изменения периодических синусоидальных ЭДС, напряжения и тока

3. Частотой $f = \frac{1}{T}$ [Гц] – числом полных изменений периодической величины за 1с. Стандартная промышленная частота $f = 50$ Гц, тогда период изменения $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02$ с. Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \text{ [рад/с]}. \quad (2.1)$$

Такая частота обеспечивает получение оптимальных частот вращения электродвигателей переменного тока и отсутствие заметного для глаз мигания осветительных ламп накаливания. На практике находят применение как высокие, так и низкие частоты. Высокие частоты применяются в приводах электроинструмента и средств автоматики; в установках нагрева металла и в радиотехнических устройствах. Пониженные частоты (до 16 Гц) применяют для электротяги в железнодорожном транспорте. Синусоидальные токи и ЭДС низких частот получают с помощью синхронных генераторов, а высоких частот – полупроводниковых генераторов.

4. Действующими значениями синусоидальной величины, которые в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитудных значений и средним значением:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m; \quad I_{CP} = \frac{2I_m}{\pi} = 0,637I_m \quad (2.2)$$

В большинстве электроизмерительных приборов, измеряющих ток и напряжение, используется принцип электродинамического эффекта, и поэтому они показывают действующее значение.

5. Коэффициентами формы и амплитуды периодической кривой:

$$k_\phi = \frac{I}{I_{cp}} = 1,11 \quad \text{и} \quad k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} \quad (2.3)$$

Источники синусоидальной ЭДС и источники синусоидального тока обозначаются так же, как постоянные источники, но над ними ставится точка \dot{E}, \dot{I}_k .

2.2 Синусоидальные сигналы в прямоугольных координатах

Каждый параметр режима электрической цепи (i, u, e) изменяется по синусоидальному закону:

$$f(t) = A_m \sin(\omega t \pm \psi), \quad (2.4)$$

где $f(t)$ – мгновенное значение функции; A_m – амплитуда функции; ω – угловая частота; ψ – начальный фазный угол.

Аргумент синусоидальной функции ($\omega t \pm \psi$) – фазовый угол или фаза. В момент времени $t = 0$ значение фазового угла называют начальной фазой. Аргумент синусоидальной функции ($\omega t \pm \psi$) может выражаться в градусах или радианах. Синусоидальные величины изображаются зависимостью i, u, e от ωt в виде:

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega t \pm \psi_i); \quad u = U_m \sin(\omega t \pm \psi_u); \\ e &= E_m \sin(\omega t \pm \psi_e). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Графическое изображение, когда начальные фазы тока $\psi_i = \psi_u = 0$ – рисунок 2.2 а. В этом случае синусоидальные величины одновременно проходят через нулевые и максимальные значения, т. е. они совпадают по фазе.

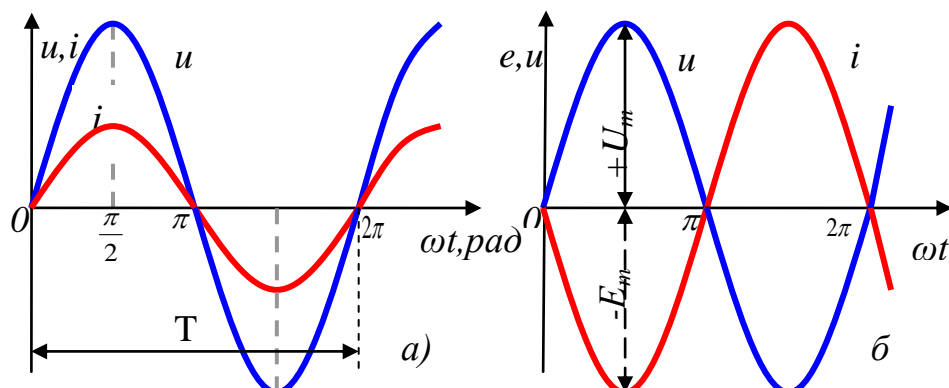


Рисунок 2.2 – Синусоидальные величины, совпадающие по фазе (а) и находящиеся в противофазе (б)

Если две синусоидальные величины одновременно проходят через нуль и принимают максимальные значения противоположных знаков, то в этом случае они находятся в противофазе или сдвинуты на угол π (рисунок 2.2 б). На практике чаще всего ЭДС, токи и напряжения не совпадают по фазе, т. е. через нуль проходят не одновременно. Разность начальных фазовых углов называют углом сдвига фаз.

В электротехнике определяющим является угол сдвига фаз между током и напряжением:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i, \quad (2.6)$$

где ψ_u и ψ_i – начальные фазы напряжения и тока соответственно.

Приняв угол $\psi_u = 0$, из формулы $\psi_i = \psi_u - \varphi$ получаем, что

$$u = U_m \sin \omega t \quad \text{и} \quad i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.7)$$

Эти уравнения показывают, что если угол $\varphi < 0$, то ток опережает напряжение на угол φ (рисунок 2.3 а). Если $\varphi > 0$, то ток отстает по фазе от напряжения на величину этого угла φ (рисунок 2.3 б).

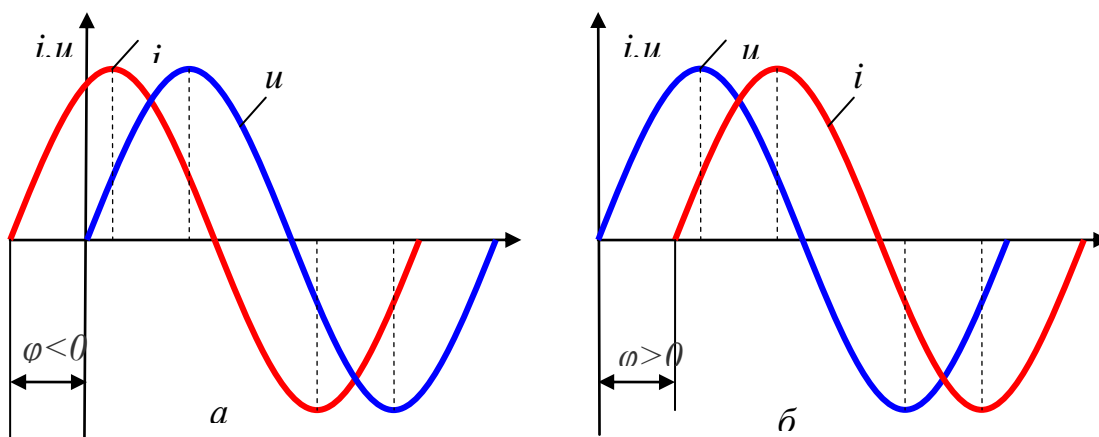


Рисунок 2.3 – Синусоидальные токи и напряжения, сдвинутые по фазе

2.3 Представление синусоидальных величин

Существуют четыре способа представления величин, изменяющихся по синусоидальному закону: в виде тригонометрических функций, графиков изменений функций во времени, вращающихся векторов и комплексных чисел.

Рассмотрим представление синусоидальных величин в виде комплексных чисел, но вначале определимся с понятием векторной диаграммы. **Векторная диаграмма** – совокупность векторов синусоидально изменяющихся функции времени одной частоты, построенных с соблюдением их ориентаций относительно друг друга по фазе.

Для простейшей электрической цепи, состоящей из одного элемента, на зажимах которого действует напряжение

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (2.8)$$

и ток, в котором

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) \quad (2.9)$$

отстает по фазе на угол φ от напряжения, векторная диаграмма имеет вид, изображенный на рисунке 2.4. Начальные фазы напряжения ψ_u и тока ψ_i на векторной диаграмме не показывают, так как взаимное расположение векторов определяется разностью фаз:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \quad (2.10)$$

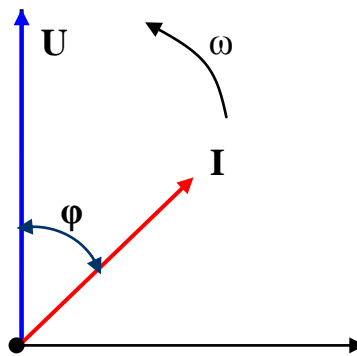


Рисунок 2.3 – Векторная диаграмма, изображающая разность фаз φ между током и напряжением

Из курса математики известно, что комплексная плоскость, на которой изображают комплексное число, имеет действительную и мнимую части. По оси абсцисс откладывают действительную часть комплексного числа, по оси ординат – мнимую. На оси действительных чисел ставят знак «+1», на оси мнимых значений – «+j» ($j = \sqrt{-1}$).

Также, из курса математики знакома формула Эйлера:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha, \quad (2.11)$$

Комплексное число $e^{j\alpha}$ изображают на комплексной плоскости вектором, который равен единице и составляет с вещественной осью «+1» угол α . Угол α отсчитывается против часовой стрелки от оси «+1». Модуль функции:

$$|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1. \quad (2.12)$$

Проекция функции $e^{j\alpha}$ на ось «+1» равна $\cos \alpha$, а на ось «+j» – $\sin \alpha$.

Если вместо $e^{j\alpha}$ взять функцию $I_m e^{j\alpha}$, а угол $\alpha = \omega t + \psi$, т. е. изменяющийся прямо пропорционально времени, получаем:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m \cos(\omega t + \psi) + j I_m \sin(\omega t + \psi). \quad (2.13)$$

Первое слагаемое представляет собой действительную часть выражения $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$, а второе слагаемое, это коэффициент при ее мнимой части, который обозначается:

$$I_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im} I_m e^{j(\omega t + \psi)} = i, \quad (2.14)$$

и представляет проекцию вектора $I_m e^{j(\omega t + \psi)}$ на ось «+j» (рисунок 2.5).

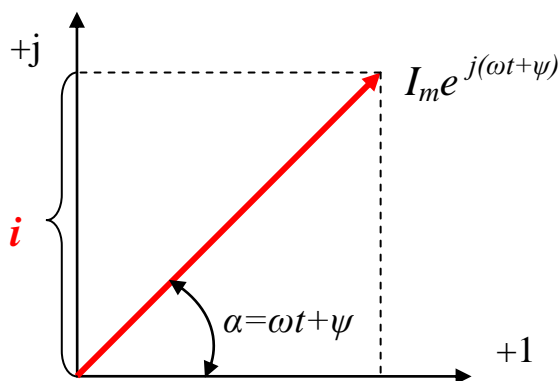


Рисунок 2.4 –Изображение вектора тока на комплексной плоскости

На комплексной плоскости вектора синусоидально изменяющихся во времени величин принято изображать для момента времени $\omega t = 0$, тогда

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m e^{j\psi} = \dot{I}_m, \quad (2.15)$$

где \dot{I}_m – комплексная величина, модуль которой равен амплитуде, а угол, под которым вектор \dot{I}_m проведен к оси «+1» комплексной плоскости, равен начальной фазе. Таким образом, величина \dot{I}_m – комплексная амплитуда мгновенного значения тока i .

Метод расчета электрических цепей, основанный на изображении синусоидальных функций времени комплексными числами называется методом комплексных амплитуд или комплексным методом расчета.

Комплексную амплитуду \dot{I}_m можно записать в полярной, показательной, тригонометрической и алгебраической формах:

$$\dot{I}_m = I_m \angle \psi = I_m e^{j\psi} = I_m (\cos \psi + j \sin \psi) = I_m' + j I_m'' \quad (2.16)$$

При графическом определении суммарного тока на комплексной плоскости изображают заданные токи. Геометрическая сумма векторов \dot{I}_{1m} и \dot{I}_{2m} дает комплексную амплитуду суммарного тока $I_m e^{j\psi} = \dot{I}_m$. Амплитуда тока I_m определяется длиной суммарного вектора, а начальная фаза ψ – углом, образованным этим вектором с действительной осью «+1». Взаимное расположение векторов при их вращении вокруг начала координат не должно изменяться. Для определения разности двух токов необходимо произвести вычитание векторов. Проекция вектора \dot{I}_m на ось «+j» равна мгновенной величине

суммарного тока, а угол, образованный этим вектором с осью «+1», является его начальной фазой.

При аналитическом определении принимается, что вектора – это комплексные амплитуды, и поэтому суммарный вектор – это сумма комплексных амплитуд $\dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} = \dot{I}_m$. Чтобы произвести суммирование комплексных чисел, их надо представить в алгебраической форме:

$$\dot{I}_{1m} = I'_{1m} + jI''_{1m}, \quad \dot{I}_{2m} = I'_{2m} + jI''_{2m} \quad (2.17)$$

После выполнения суммирования находим, что амплитуду суммарного тока

$$I_m = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2}. \quad (2.18)$$

Начальный угол суммарного тока ψ определяем через тангенс угла:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{I''_m}{I'_m}. \quad (2.19)$$

2.4 Закон Ома в комплексной форме для цепей синусоидального тока

Составными элементами цепей синусоидального тока являются активное сопротивление, индуктивность и емкость. Термин **сопротивление** для цепей синусоидального тока не полный, т. к. сопротивление переменному току оказывают не только элементы цепи, в которых выделяется энергия в виде тепла (активные сопротивления), но и элементы, в которых энергия запасается в электрическом и магнитном полях. Такие элементы называются реактивными сопротивлениями и ими обладают индуктивность и емкость.

Синусоидальный ток в активном сопротивлении

Рассмотрим случай, когда начальные фазы отличаются от нуля. Ток и напряжение определены формулами

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u = RI_m \sin(\omega t + \psi_u) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (2.20)$$

а начальные фазы тока и напряжения равны $\psi_i = \psi_u$, т. е. ток и напряжение совпадают по фазе.

В комплексном виде ток и напряжение на резистивном элементе:

$$\dot{I} = I_m e^{j\psi_i} \quad \text{и} \quad \dot{U} = U_m e^{j\psi_u} \quad (2.21)$$

т. к. начальные фазы $\psi_i = \psi_u$ равны, то закон Ома для действующих величин в комплексной форме для резистивного элемента будет:

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} \quad (2.22)$$

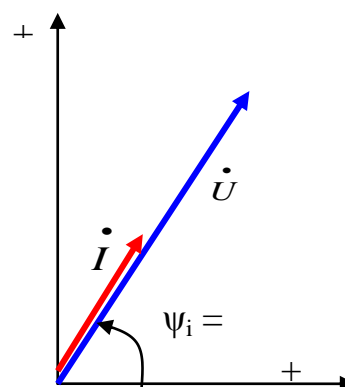
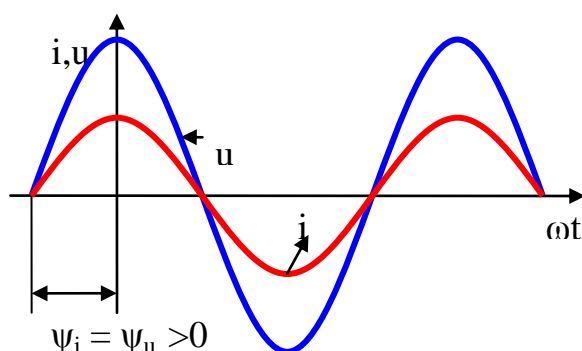


Рисунок 2.5 – Изменение мгновенных значений тока и напряжения на активном сопротивлении и векторная диаграмма при наличии начальной фазы

Индуктивность в цепи синусоидального тока

Любая обмотка (катушка) обладает индуктивностью L и активным сопротивлением R . На схеме замещения катушку представляют в виде последовательно соединенных индуктивности и сопротивления.

Выделим из схемы одну индуктивность, удалив активное сопротивление. Если в индуктивном элементе течет ток:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (2.23)$$

то в катушке наводится ЭДС самоиндукции и появляется напряжение:

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (2.24)$$

При этом амплитуды тока и напряжения соотносятся как:

$$U_m = \omega L \cdot I_m, \quad (2.25)$$

где величина $\omega L = x_L$ – индуктивное сопротивление [Ом].

Разность фаз показывает, что ток отстает по фазе от напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$.

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2} > 0, \quad (2.26)$$

Комплексные величины тока и напряжения равны:

$$\dot{I} = I_m e^{j\psi_i} \quad \text{и} \quad \dot{U} = U_m e^{j\psi_u} \quad (2.27)$$

Закон Ома в комплексной форме для индуктивного элемента

$$\dot{U} = j\omega L \cdot \dot{I} = jx_L \cdot \dot{I}, \quad (2.28)$$

где $j\omega L = jx_L$ – комплексное сопротивление индуктивного элемента.

Если начальный угол тока равен нулю, то графики мгновенных значений и векторная диаграмма выглядят следующим образом (рисунок 2.7). Но для реальной катушки индуктивности падение напряжения равно сумме напряжений на индуктивности ($\dot{U} = j\omega L \cdot \dot{I}$) и на активном сопротивлении ($\dot{I} \cdot R = \dot{U}$). Тогда суммарный вектор

напряжения \dot{U} будет опережать ток на угол $(90^\circ - \delta)$. Причем $\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{\omega L} = \frac{1}{Q}$, где Q – добротность катушки.

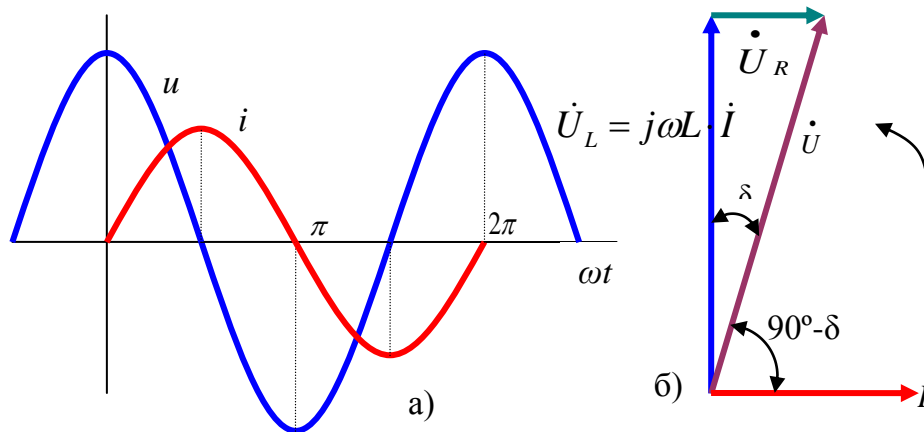


Рисунок 2.6 – Изменение мгновенных значений тока и напряжения на индуктивном элементе и векторная диаграмма при начальном угле тока $\psi_i = 0$

Конденсатор в цепи синусоидального тока

Если приложенное к конденсатору напряжение не меняется во времени, то заряды на его обкладках неизменны и ток через конденсатор не проходит ($i = \frac{dq}{dt} = 0$). При изменении напряжения по синусоидальному закону

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad (2.29)$$

по этому же закону будет изменяться и заряд q конденсатора, который будет периодически перезаряжаться. Периодическая перезарядка конденсатора сопровождается протеканием через него зарядного тока:

$$i = \frac{dq}{dt} = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2.30)$$

Отсюда видно, что ток на конденсаторе опережает по фазе напряжение на 90° , т. е. разность фаз между током и напряжением

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2} < 0. \quad (2.31)$$

Амплитуды тока и напряжения связаны соотношением:

$$I_m = \omega C U_m, \quad (2.32)$$

разделив которые на $\sqrt{2}$, получим соотношение для действующих значений:

$$U = \frac{1}{\omega C} \cdot I, \quad (2.33)$$

где $\frac{1}{\omega C} = x_c$ – емкостное сопротивление [Ом].

Закон Ома в комплексной форме записи:

$$\dot{U} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = -jX_c \dot{I}, \quad (2.34)$$

где $\frac{1}{j\omega C} = -jX_c$ – комплексное емкостное сопротивление.

При прохождении синусоидального тока через конденсатор предполагается, что диэлектрик, разделяющий его пластины, является идеальным. Однако в реальном диэлектрике всегда имеются потери энергии, связанные с вязким трением при повороте

дипольных молекул, а также наличием небольшой проводимости. Эти потери относительно малы, но если их требуется учесть, то составляют схему замещения, где параллельно емкости включают активное сопротивление, потери в котором имитируют потери энергии в реальном диэлектрике.

Тогда суммарный ток через конденсатор равен геометрической сумме двух токов: \dot{I}_1 – через емкость и \dot{I}_2 – через активное сопротивление.

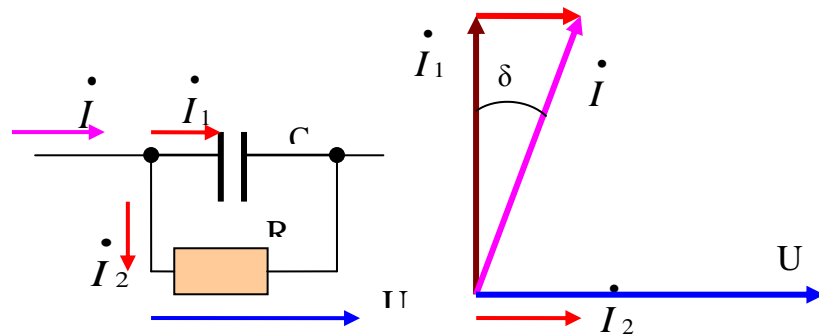


Рисунок 2.8 – Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) конденсатора, заполненного диэлектриком

В конденсаторе с диэлектриком ток опережает напряжение на угол $(90^\circ - \delta)$, где δ называется углом диэлектрических потерь. Для реальных конденсаторов он выражается через $\text{tg}\delta$ и указывается в таблицах.

2.5 Активная, реактивная и полная мощности

Активная мощность P – это энергия, которая выделяется в единицу времени в виде теплоты на участке цепи с сопротивлением R

$$P = U \cdot I \cos \varphi = I^2 R. \text{ [Вт].} \quad (2.49)$$

Реактивная мощность – это энергия, которой обмениваются генератор и приемник. Под реактивной мощностью Q понимают:

$$Q = UI \sin \varphi. \text{ [Вар]} \quad (2.50)$$

Если $\sin \varphi > 0$, то $Q > 0$ и наоборот – $\sin \varphi < 0$, то $Q < 0$

Полная мощность

$$S = U \cdot I \text{ [ВА].} \quad (2.51)$$

Графически связь между мощностями представляют в виде треугольника мощности, у которого два катета P и Q и гипотенуза S .

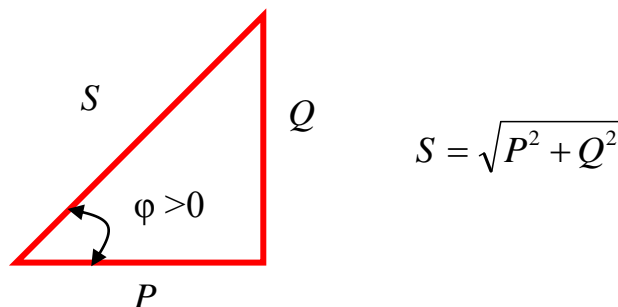


Рисунок 2.8 – Треугольник мощностей

Косинус угла сдвига фаз $\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{P}{S}$ называется **коэффициентом мощности**. Он показывает, какую долю полной мощности составляет активная мощность, а какая доля электроэнергии преобразуется в другие виды энергии. Когда $\cos \varphi = 1$, то это означает, что активная мощность равна полной или сопротивление потребителя только активное $Z = R$.

Коэффициент мощности важный эксплуатационный параметр электроприемников. Так как

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}, \quad (2.52)$$

то чем выше $\cos \varphi$, тем при меньшем значении тока в цепи происходит преобразование электроэнергии в другие виды энергии, что приводит к уменьшению потерь электроэнергии, ее экономии и снижению стоимости устройств электропередачи.

Повышение коэффициента мощности

Во многих электротехнических устройствах преобладает индуктивная составляющая реактивного тока, т.е. большой положительный угол сдвига фаз φ между напряжением и током, что ухудшает коэффициент мощности. Низкое значение $\cos \varphi$ приводит к неполному использованию технических и электротехнологических систем, которые загружаются реактивной (индуктивной) составляющей тока, что приводит к увеличению потерь энергии.

Для увеличения $\cos \varphi$ параллельно электротехническому устройству включают батарею конденсаторов. Емкостный (реактивный) ток компенсирует индуктивный ток.

Баланс мощности в цепи синусоидального тока

Баланс мощности заключается в том, что:

1. Алгебраическая сумма активных мощностей всех источников энергии равна арифметической сумме мощностей всех резистивных элементов

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_R \quad (2.53)$$

2. Алгебраическая сумма реактивных мощностей источников энергии равна разности между арифметическими суммами реактивных мощностей индуктивных элементов и емкостных элементов

$$\sum Q_{\text{ист}} = \sum Q_L - \sum Q_C \quad (2.54)$$

Баланс мощностей можно выразить и в комплексной форме: алгебраическая сумма комплексных мощностей источников энергии равна алгебраической сумме комплексных мощностей потребителей энергии

$$\sum \tilde{S}_{\text{ист}} = \sum \tilde{S}_{\text{потр}} \quad \text{или} \quad \sum \dot{U}_{\text{ист}} I_{\text{ист}} = \sum \dot{U}_{\text{потр}} I_{\text{потр}} \quad (2.55)$$

Знаки алгебраических слагаемых источников энергии выбираются по правилу для активных мощностей: знак «+» если направления действия ЭДС совпадает с направлением действия тока и «-», если не совпадают.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие токи называются переменным и постоянным?
- 2) Перечислить величины, характеризующие переменный синусоидальный ток.
- 3) Что называется действующим значением переменного синусоидального тока?
- 4) Что называется средним значением переменного синусоидального тока?
- 5) Чему равно полное сопротивление цепи переменного тока?
- 6) Что такое активная и реактивная мощность?

ЛЕКЦИЯ 3. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель лекции: Представление о нелинейных электрических и магнитных цепях, методах их расчета. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений и характеристики нелинейных индуктивных и емкостных элементов.

3.1 Основные понятия нелинейных электрических и магнитных цепей

Нелинейные цепи содержат элементы, которые не могут быть описаны при помощи постоянных коэффициентов, а характеристики являются нелинейными функциями одной или нескольких переменных. В общем случае это нелинейные вольтамперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики, которые зависят от скорости изменения переменных, то есть выражаются функциями двух или большего числа переменных.

Отличаются одна от другой и характеристики магнитопровода, снятые при разных частотах, даже для феррита, структура которого обеспечивает отсутствие влияния вихревых токов, с изменением частоты тока изменяется зависимость между индукцией B и напряженностью H или между потоком Φ и током i . При рассмотрении нелинейных электрических и магнитных цепей существенно различаются методы подхода и характер решаемых задач.

Нелинейные элементы электрических цепей обычно представляют собой известные резистивные или емкостные устройства, характеристики которых заданы на основании экспериментально полученных зависимостей.

Нелинейные элементы магнитных цепей не всегда имеют заранее заданные вебер-амперные характеристики. Обычно они синтезируются и рассчитываются на основе известных характеристик стали или других материалов, из которых созданы магнитопроводы. Расчет магнитных цепей основывается на известных зависимостях между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля $B=f(H)$ – в общем случае векторными величинами.

Таким образом, расчет нелинейной электрической цепи является задачей теории цепей, в то время как расчет магнитной цепи обычно включает в себя понятия теории электромагнитного поля.

3.2. Классификация нелинейных элементов

Цепь называется нелинейной, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент. Особенностью нелинейных цепей является: к ним не применяется метод наложения; в отличие от линейных стационарных цепей, отклик на синусоидальное действие будет несинусоидальным; ВАХ является нелинейной, т. е. сопротивление (активное, индуктивное или емкостное) нелинейного элемента меняется при изменении тока и напряжения:

$$Z_H = f(i, u) \quad (3.1)$$

Все нелинейные элементы, с которыми приходится иметь дело в электротехнике и радиотехнике, можно разделить на нелинейные сопротивления, нелинейные индуктивности и нелинейные емкости. В свою очередь, нелинейные элементы в каждой из этих групп делятся на два класса:

1. Неуправляемые нелинейные элементы, которые можно представить в виде двухполюсника, ток через который зависит только от величины напряжения, приложенного к его зажимам. Неуправляемый элемент характеризуется только одной ВАХ (полупроводниковые диоды, лампы накаливания, электрическая дуга, тиритовые сопротивления).

2. Управляемые нелинейные элементы (обычно многополюсники). Ток в главной цепи такого элемента зависит не только от напряжения, приложенного к главной цепи, но

и от управляющих факторов, которые могут быть электрическими и неэлектрическими. Управляемые нелинейные элементы характеризуются семейством вольтамперных характеристик (транзисторы, тиристоры, терморезисторы и др.).

По виду ВАХ нелинейные элементы можно разделяются на нелинейные элементы с симметричной и несимметричной ВАХ. Деление электрических цепей на линейные и нелинейные условно. Дело в том, что все реальные элементы электрических цепей в силу физических процессов, происходящих в них, всегда обладают некоторой нелинейностью. Поэтому элемент цепи может считаться линейным или нелинейным в зависимости от степени нелинейности и той задачи, которая ставится при рассмотрении данной цепи.

Наиболее многочисленными и широко применяемыми нелинейными элементами (НЭ) являются нелинейные активные сопротивления (НС).

3.3 Статическое и дифференциальное сопротивление НЭ

Особенностью НЭ является то, что сопротивление нелинейного активного элемента имеет различную величину для постоянного и переменного тока, т. е. каждая точка ВАХ определяет статическое и дифференциальное сопротивление нелинейного элемента. **Статическое сопротивление** характеризует поведение НС в режиме неизменного тока и равно:

$$R_{cm} = \operatorname{tg} \alpha * \frac{m_U}{m_I} \quad (3.2)$$

При переходе от одной точки к другой величина статического сопротивления изменяется.

Сопротивление переменному току называется **дифференциальным сопротивлением**. Оно меняется с изменением тока или напряжения, но остается неизменным на линейных участках характеристики и равно

$$R_d = \operatorname{tg} \beta * \frac{m_U}{m_I} \quad (3.3)$$

Это сопротивление характеризует поведение НС при малых отклонениях от предыдущего состояния, т. е. приращение напряжения связано с приращением тока $dU = R_d * dI$

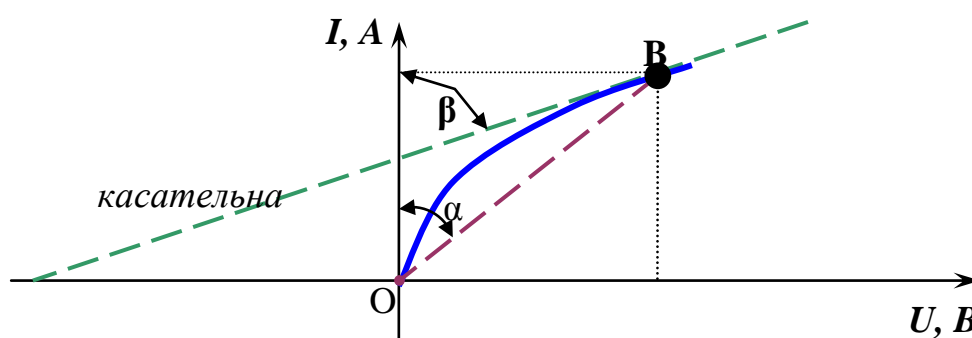


Рисунок 3.1 – Определение статического и дифференциального сопротивления нелинейного сопротивления

Если ВАХ нелинейного сопротивления имеет падающий участок, т. е. участок, на котором увеличению напряжения на ΔU соответствует убывание тока ΔI , то дифференциальное сопротивление на этом участке отрицательно физически отрицательное сопротивление означает то, что нелинейный элемент не поглощает электрическую энергию, а отдает ее в цепь за счет источников электрической энергии, которые, как правило, всегда являются составной частью нелинейных цепей.

3.4. Методы расчета нелинейных электрических цепей

С линейной частью цепи, содержащей НЭ, можно осуществлять преобразования, рассмотренные для цепей постоянного и переменного тока, которые необходимы только в том случае, чтобы облегчают расчет всей цепи с НЭ. Приемлемые методы расчета линейной части нелинейной электрической цепи: метод двух узлов, замена нескольких параллельных ветвей одной эквивалентной и метод эквивалентного генератора.

Многообразие методов расчета нелинейных электрических цепей можно свести в три группы:

а) **графические методы**, в виде геометрических построений на основе заданных характеристик;

б) **аналитические методы**, основанные на том, что характеристика нелинейного элемента выражается приближенной аналитической функцией;

в) **численные методы**, основаны на приближенных способах решения алгебраических и дифференциальных уравнений.

В практике расчета нелинейных цепей используются и комбинированные методы, например, графоаналитические.

Например, случай включения нелинейного двухполюсника в линейную цепь, которую относительно выводов этого двухполюсника представим линейным активным двухполюсником (рисунок 3.2). Заменяем активный двухполюсник эквивалентным источником с внешней характеристикой

$$U = E_{\text{ЭК}} - R_{\text{ЭК}} \cdot I \quad \text{или} \quad I = \frac{E_{\text{ЭК}} - U}{R_{\text{ЭК}}} \quad (3.4)$$

Точка пересечения **А** внешней характеристики активного двухполюсника и ВАХ нелинейного двухполюсника определяет рабочий режим цепи (рисунок 3.3). Характеристика называется **нагрузочной характеристикой** активного двухполюсника, а графоаналитический метод расчета нелинейной цепи с ее применением – **методом нагрузочной характеристики**.

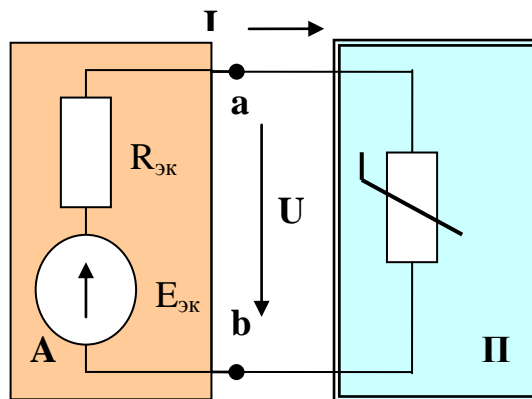


Рисунок 3.2 – Включение нелинейного двухполюсника

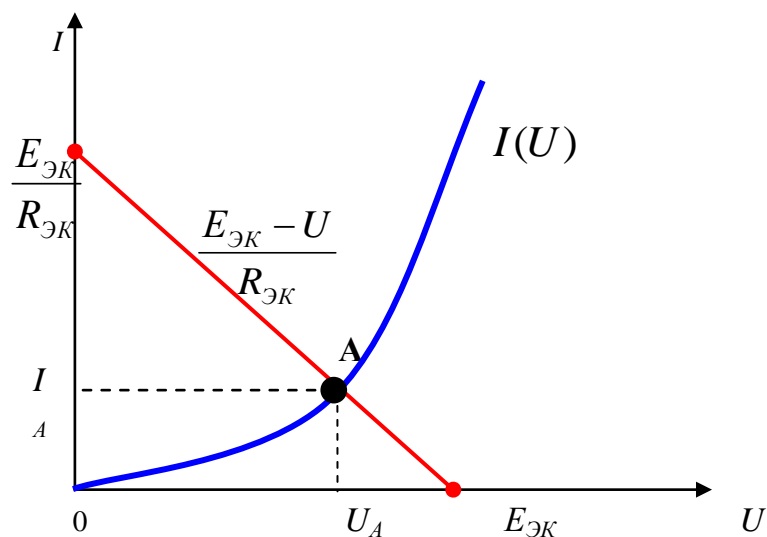


Рисунок 3.3 – Определение рабочего режима цепи

Метод нагрузочной характеристики пригоден и в случаях, когда нелинейная часть цепи содержит последовательное или параллельное соединение нелинейных двухполюсников с известными ВАХ. Для этого необходимо в первом случае сложить ВАХ нелинейных элементов по напряжению, а во втором – по току. Определив рабочую точку результирующей ВАХ методом нагрузочной характеристики, далее определяем ток и напряжение каждого нелинейного двухполюсника.

Рассмотрим **графический метод расчета**. При графическом методе расчета электрических цепей ВАХ нелинейных элементов должны быть заданы в графической или табличной форме. На схемах рисунков 3.4 и 3.5 последовательно и параллельно соединены два нелинейных элемента (НЭ1 и НЭ2) и изображены их ВАХ.

Для построения ВАХ последовательной цепи необходимо задаться значениями тока, по характеристикам отдельных элементов определить на них напряжения и суммировать эти напряжения. При параллельном соединении нелинейных элементов используя ВАХ НЭ и задаваясь значениями напряжения, складывают ординаты, соответствующие токам в НЭ, и находят ток во всей цепи. По нескольким точкам проводят полную характеристику цепи.

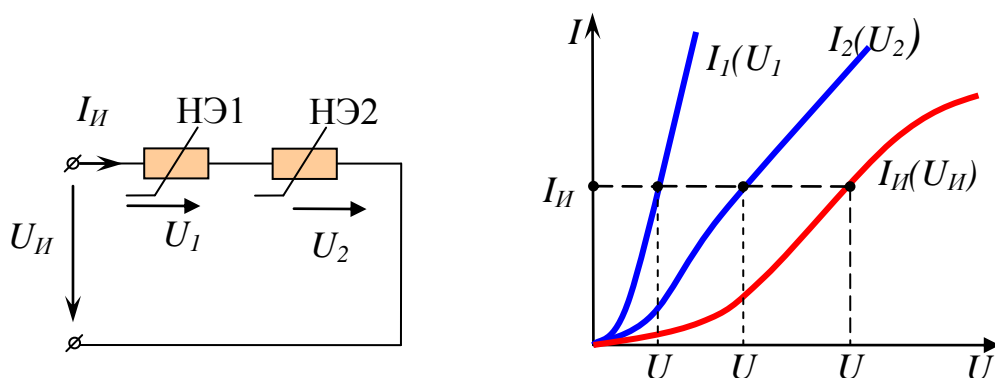


Рисунок 3.4 – Построение ВАХ цепи с последовательно соединенными НС

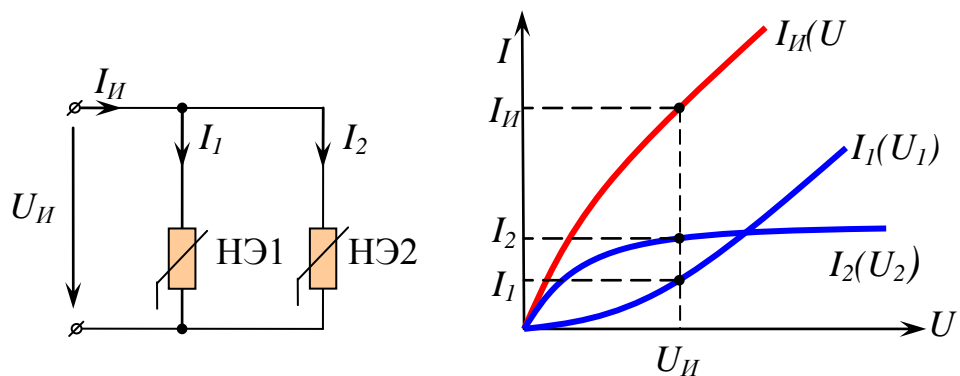


Рисунок 3.5 – Построение ВАХ цепи с параллельно соединенными НС

3.5 Нелинейные индуктивные и емкостные сопротивления

Под нелинейными индуктивными сопротивлениями (нелинейными индуктивностями), понимают индуктивные катушки с обмотками, намотанными на замкнутые сердечники из ферромагнитного материала, для которых зависимость магнитного потока в сердечнике от протекающего по обмотке тока нелинейна. Индуктивное сопротивление таких катушек зависит от величины переменного тока. Индуктивную катушку со стальным сердечником называют дросселем со стальным сердечником.

На электрических схемах нелинейную индуктивность изображают в виде замкнутого сердечника с обмоткой. Сердечники нелинейных индуктивностей двух типов: пакетные и спиральные. Пакетные сердечники состоят из тонких пластин ферромагнитного материала, а спиральные – из тонкой ферромагнитной ленты. Пластины и витки сердечников изолируют эмалевым лаком для уменьшения потерь энергии от вихревых токов.

Основной нелинейный эффект индуктивного элемента – нелинейность между индукцией \mathbf{B} и напряженностью \mathbf{H} , т. е. гистерезисная петля.

В обычных конденсаторах обкладки разделены веществом, диэлектрическая проницаемость которого не является функцией напряженности электрического поля. Для них кулон-вольтные характеристики линейны. В нелинейных конденсаторах (**варикондах**), пространство между обкладками вариконда заполняют сегнетоэлектриком. Для данных веществ характерен электрический гистерезис – явление отставания изменения электрического смещения \mathbf{D} от изменения напряженности поля \mathbf{E} . Кроме потерь на гистерезис в варикондах есть потери, обусловленные проводимостью сегнетоэлектрика и вязкостью процессов поляризации.

3.6 Преобразования, осуществляемые с помощью нелинейных электрических цепей

Устройства, в состав которых входят одно или несколько НС называют четырехполосниками или шестиполосниками, с помощью которых можно осуществить ряд очень преобразований: а) преобразовать переменный ток в постоянный – **выпрямители**; б) преобразовать постоянный ток в переменный – **автогенераторы** и **инверторы**; в) осуществить умножение частоты (получить на выходе четырехполосника напряжение, частота которого больше частоты входного напряжения) – **умножители частоты** или деление частоты – **делители частоты**; г) стабилизировать напряжение или ток (получить на выходе напряжение или ток, почти не изменяющийся по величине при значительном изменении величины входного напряжения – **стабилизаторы**; д) осуществить **триггерный эффект** – эффект скачкообразного изменения выходной

величины при незначительном изменении входной; ж) произвести модуляцию, при которой амплитуда (фаза или частота) высокочастотного колебания, поступающего на вход, преобразуется таким образом, что характер изменения ее повторяет характер изменения управляющего низкочастотного сигнала – **модуляторы**; з) осуществить демодуляцию (выделить из высокочастотного модулированного колебания запечатленный в нем низкочастотный управляющий сигнал – **демодуляторы** или **детекторы**; и) осуществить усиление напряжения, тока или мощности – **усилители**.

Нелинейные устройства применяют для умножения электрическим путем функций, степенного и логарифмического преобразования входного напряжения, формы входного сигнала, в электрических счетных и запоминающих устройствах, в качестве нелинейных фильтров и логических устройств.

3.7 Основные понятия магнитной цепи

Из курса физики известно, что вокруг проводника, по которому протекает ток, создается магнитное поле, перпендикулярной плоскости проводника. Направление тока в проводнике и направление линий магнитного поля определяют по «правилу буравчика». Внесенное в магнитное поле тело всегда пронизывается магнитными линиями, на расположение которых большинство тел не влияет. Исключение составляют железо и его сплавы, а также никель и кобальт, которые выделены в группу ферромагнитных материалов.

Магнитная цепь (магнитопровод) – путь, состоящий из различных ферромагнитных и неферромагнитных частей электротехнических устройств, по которому замыкается магнитный поток. В зависимости от принципа действия электротехнического устройства магнитное поле может возбуждаться постоянным магнитом или катушкой с током. Магнитные цепи можно разделить на **неразветвленные** (магнитный поток в любом сечении цепи одинаков) и **разветвленные** (магнитные потоки в отдельных сечениях цепи различны). Разветвленные магнитные цепи могут быть сложной конфигурации (в электрических двигателях, генераторах). В большинстве случаев магнитная цепь считается нелинейной. Магнитную цепь большинства электротехнических устройств можно представить состоящей из участков, в пределах которых магнитное поле однородное, т. е. с постоянной напряженностью магнитного поля H_k вдоль средней линии участка длиной l_k .

Если магнитное поле возбуждается катушкой с током I , у которой w витков, то согласно закону полного тока, МДС равна сумме произведений напряженностей магнитного поля на длины соответствующих участков для контура магнитной цепи:

$$\sum H_k \cdot l_k = I \cdot w = F, \quad (3.5)$$

где F – магнитодвижущая сила (МДС), [А].

Произведение $H_k \cdot l_k = U_{mk}$ называют также **магнитным напряжением** участка магнитной цепи.

Магнитное состояние любой точки изотропной среды определяется векторами напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B , которые совпадают друг с другом по направлению. Единица напряженности магнитного поля H [А/м]. Единица магнитной индукции B [тесла (Тл)]: $1\text{Тл} = 1\text{ Вб/м}^2 = 1\text{ В} \cdot \text{с/м}^2$. Это индукция такого однородного магнитного поля, в котором магнитный поток через поверхность площадью 1 м^2 , перпендикулярную направлению магнитных линий поля, равен одному Φ [веберу (Вб)]. В вакууме индукция и напряженность магнитного поля связаны соотношением: $B = \mu_0 H$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Для ферромагнитных материалов зависимость $B = f(H)$ нелинейная.

При расчете напряженности и индукции магнитного поля в тонкостенном тороиде принимают, что все магнитные линии имеют одинаковую длину, равную длине средней линии $2\pi r$, и напряженность определяется законом полного тока:

$$H = \frac{I \cdot \omega}{2\pi \cdot r} \quad (3.6)$$

Каждому значению напряженности H магнитного поля в тонкостенном тороиде соответствуют определенная намагниченность ферромагнитного материала и значение магнитной индукции B .

Вопросы для самоконтроля

- 1) Что представляют собой нелинейные элементы электрических цепей?
- 2) Классификация нелинейных элементов.
- 3) Сопротивление нелинейного активного элемента.
- 4) Какие существуют методы расчета нелинейных электрических цепей?
- 5) Преобразования, осуществляемые с помощью нелинейных электрических цепей.

ЛЕКЦИЯ 4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Цель лекции: Ознакомление с понятием трехфазной системы ЭДС, способами соединения фаз трехфазных источников питания и потребителей, соотношениями между фазными и линейными токами и напряжениями, способами измерения активной мощности системы.

4.1 Трехфазная система

Трехфазная система была изобретена и разработана, включая трехфазные трансформатор и асинхронный двигатель, выдающимся русским инженером М.О.Доливо-Добровольским в 1891 г. Источником трехфазного тока являлся трехфазный генератор, на статоре которого расположены три одинаковые, но смещенные в пространстве одна относительно другой на 120° обмотки: $AХ$, $ВУ$, $СZ$. Обмотки пронизываются силовыми линиями магнитного поля ротора. В простейшем случае он имеет два полюса N и S , индукция магнитного поля которых определяется в зазоре ротором и статором по синусоидальному закону. ЭДС трехфазного генератора обозначают: \dot{E}_A , отстающую от нее на 120° ЭДС – \dot{E}_B , опережающую на 120° – \dot{E}_C . Последовательность прохождения ЭДС через нулевые значения называют последовательностью фаз (рисунок 4.1).

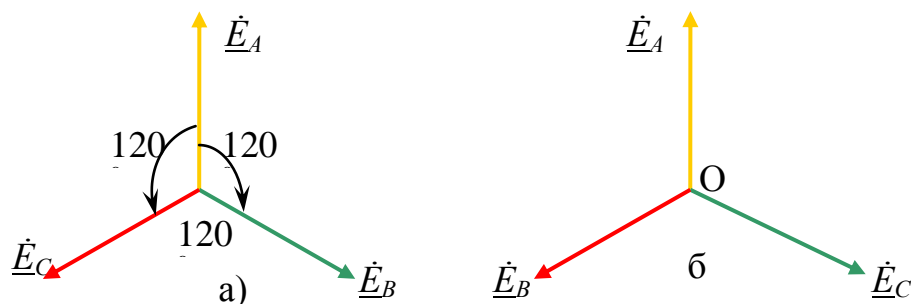


Рисунок 4.1 – Векторы симметричной системы ЭДС при прямом (а) и обратном (б) чередовании фаз

Трехфазные системы ЭДС делятся на симметричные и несимметричные. Если все три ЭДС равны по величине и сдвинуты относительно друг друга по фазе на 120° , то такая система называется симметричной (рисунок 4.1). Если ЭДС неравны по значению или сдвинуты относительно друг друга на угол, не равный 120° , то такая система ЭДС называется несимметричной.

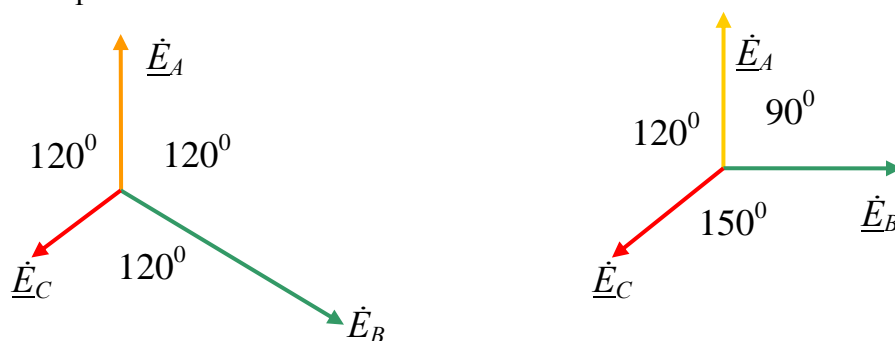


Рисунок 4.2 – Несимметричная система ЭДС

Трехфазной цепью называют совокупность трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки и соединительных проводов. Токи, протекающие по отдельным участкам трехфазных цепей, сдвинуты относительно друг друга по фазе. Под фазой трехфазной цепи понимают ее участок, по которому протекает одинаковый ток (рисунок 4.3).

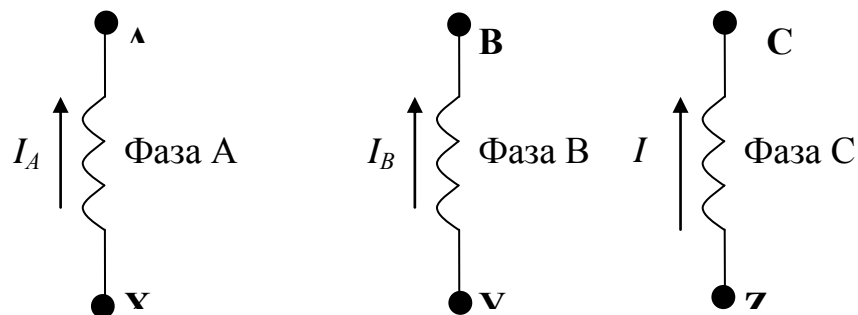


Рисунок 4.3 – Фазы трехфазной цепи

Начало и концы фазы генератора обозначают большими буквами и называют соответственно фазой A , B и C и X , Y и Z . Начала и концы фаз потребителя обозначают аналогично фазам генератора, но маленькими буквами (« a » и « x » и т. д.).

Существуют различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой, но в целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют по схемам «треугольник» или «звезда». При этом число соединительных проводов уменьшается до трех или четырех.

В случае соединения фаз обмоток генератора «звездой» концы фаз X , Y , Z соединяют в общий узел « O », который называют нейтралью или нейтральной точкой генератора (рисунок 8.4 а). При соединении фаз обмоток генератора «треугольником» в одну точку объединяют соответствующие начала и концы фаз (рисунок 4.4 б):

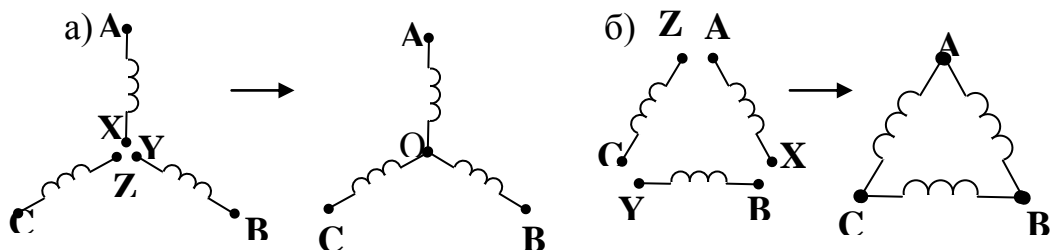


Рисунок 4.4 – Основные схемы соединения фаз обмоток генератора

На рисунке 4.5 показан способ соединения фаз генератора и приемника по схеме «звезда». Провод, соединяющий нейтральные точки генератора O и нулевую точку O' приемника, называют нейтральным проводом, а провода, идущие от концов фаз генератора к приемнику, – линейными проводами.

Напряжения между зажимами фаз генератора (A , B и C), потребителя (a , b и c) и нейтральными точками (O и O'), а также токи в фазах генератора и потребителя называют фазными токами и напряжениями.

Напряжения между линейными проводами и токи в этих проводах – линейными напряжениями и токами.

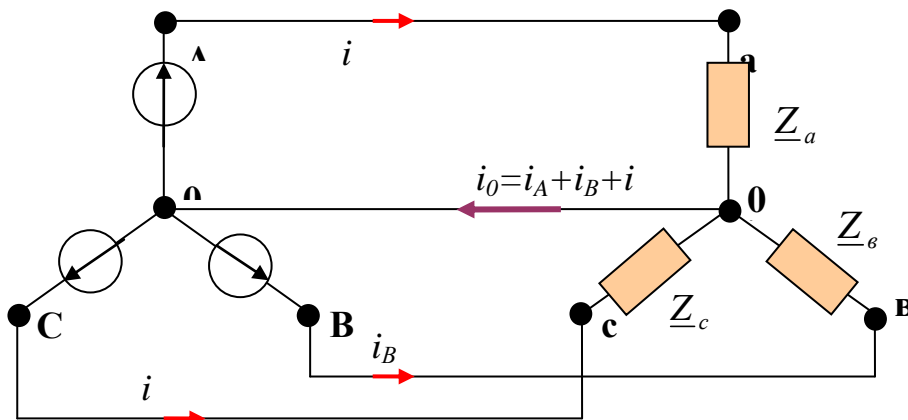


Рисунок 4.5 – Схема четырехпроводной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки по схеме «звезда»

На рисунке 8.6 показано соединение фаз генератора и нагрузки по схеме «треугольник». Геометрическая сумма ЭДС в замкнутом треугольнике равна нулю, поэтому, если к зажимам A, B, C не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

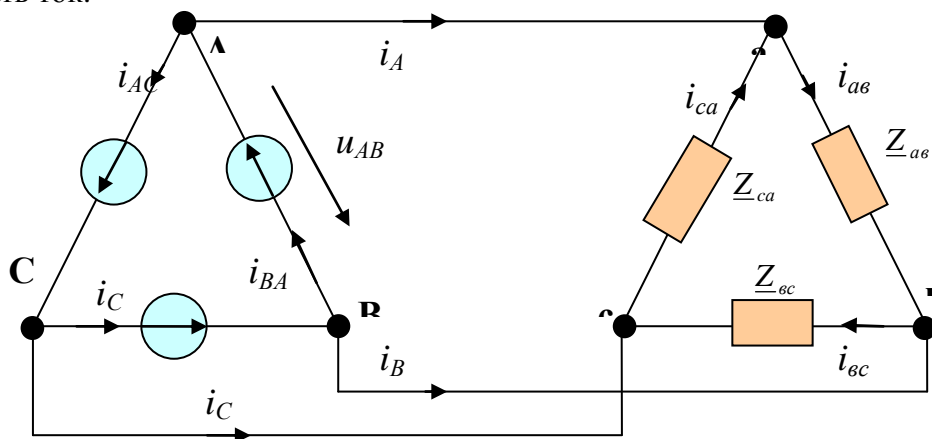


Рисунок 4.6 – Схема трехпроводной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки по схеме «треугольник»

Способы соединения генератора и приемника независимы друг от друга в том случае, если нет нейтрального провода.

4.2 Соотношение между фазными и линейными величинами

При соединении фаз по схеме «звезда» линейное напряжение по модулю в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения, что следует из рисунка 4.7.

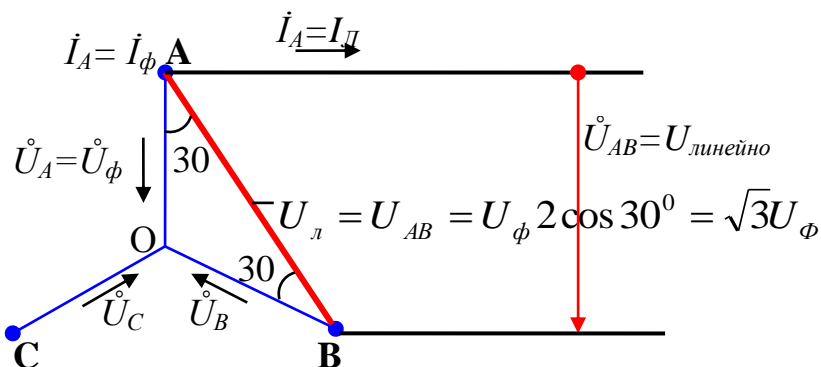


Рисунок 4.7 – Соотношение между фазными и линейными токами при соединении обмоток по схеме «звезда»

В соответствии с этим, в четырехпроводной трехфазной цепи имеются два уровня напряжения, различающиеся в $\sqrt{3}$ раз (380/220 и 220/127), что позволяет использовать приемники с различным номинальным напряжением.

Так как обмотка генератора, линейный провод и приемник, принадлежащие одной фазе, соединяются последовательно, то при соединении генератора «звездой» линейный ток равен фазному току $I_l = I_\phi$. Комплексные величины линейных и фазных токов обозначаются $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

Ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C - \dot{I}_0 = 0 \quad (4.1)$$

Таким образом, ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме фазных токов. При возникновении несимметрии токов в фазах нагрузки по нейтральному проводу протекает ток i_0 , амплитуда которого меньше амплитуды токов в линейных проводах. В соответствии с этим сечение нулевого провода принимают на ступень меньше сечения линейных проводов.

В симметричной трехфазной системе при соединении фаз по схеме «звезда» действующие фазные и линейные токи равны друг другу, а линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного. Обмотки трехфазных генераторов на электростанциях всегда соединяют «звездой», что позволяет выполнять изоляцию обмоток на фазное напряжение.

При соединении фаз по схеме «треугольник» напряжение между началом и концом фазы – это напряжение между линейными проводами.

В симметричной трехфазной системе при соединении фаз нагрузки «треугольником» фазные и линейные напряжения равны друг другу, а линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного.

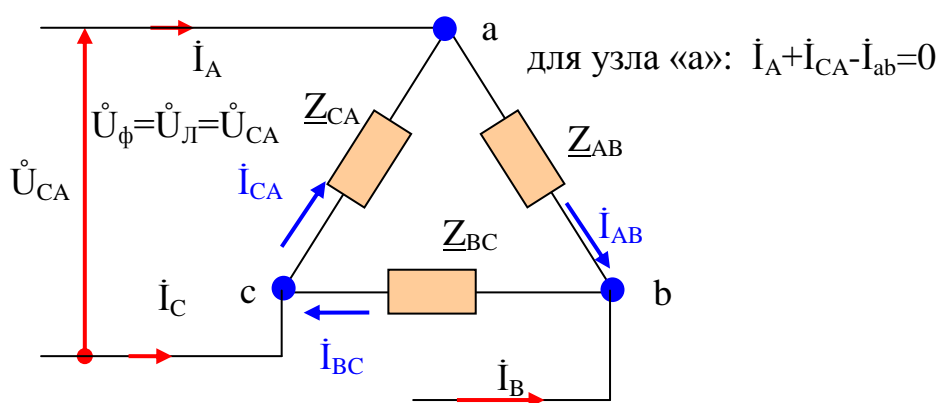


Рисунок 4.8– Соотношение между фазными и линейными токами при соединении по схеме «треугольник»

Преимуществом соединения фаз приемника «треугольником» является взаимная независимость фазных токов.

Таблица 4.1 – Соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при различном соединении фаз для симметричной трехфазной цепи

Соединение Y	Соединение Δ
$I_\phi = I_L$	$I_L = \sqrt{3}I_\phi$
$U_L = \sqrt{3}U_\phi$	$U_\phi = U_L$

4.3 Приемники, включаемые в трехфазную цепь

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть однофазными и трехфазными. К однофазным приемникам относятся осветительные и различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т.д. К трехфазным – трехфазные асинхронные двигатели и индукционные печи.

Фазы обмоток трехфазных приемников, а также однофазные приемники могут быть соединены как «звездой», так и «треугольником». При этом способ соединения обмоток генератора не влияет на способ соединения фаз потребителя. Несимметричные приемники включаются или по схеме «звезда» в четырехпроводную сеть или по схеме «треугольник» в трехпроводную.

Соединение нагрузки по схеме «звезда»

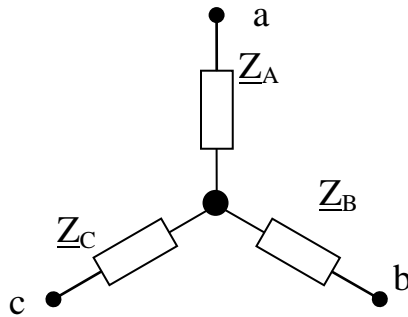


Рисунок 4.9 – Соединение фаз нагрузки «звездой»

Приемники электрической энергии называют симметричными, если равны между собой комплексные сопротивления

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = z e^{j\varphi}, \quad (4.2)$$

При этом фазные токи равны по значению $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = I_\phi$ и углы сдвига фаз между током и напряжением одинаковы:

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi. \quad (4.3)$$

Фазные токи при симметричной нагрузке образуют симметричную систему (рисунок 4.10).

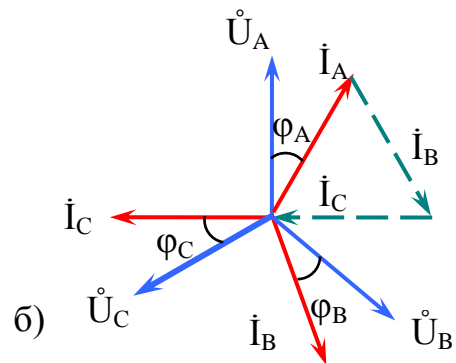
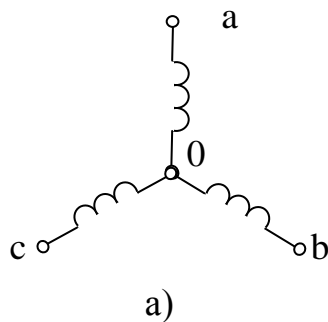


Рисунок 4.10 – Симметричная нагрузка (а) и векторная диаграмма фазных токов и напряжений (б)

В данном случае напряжение опережает ток на углы $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$. При построении векторной диаграммы, где из вектора тока \mathbf{I}_A вычитаем вектора токов фаз В и С и получаем, что ток в нейтральном проводе равен нулю. Таким образом, при симметричной нагрузке создается такой режим работы трехфазной цепи, при котором тока в нейтральном проводе нет. В этом случае переходят к трехпроводной трехфазной цепи (без нулевого провода).

Если условия симметрии не выполняются, то приемники называются несимметричными. При этом нагрузка может быть равномерной, если реактивные сопротивления равны между собой $Z_A = Z_B = Z_C$ или однородной, если $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$. Векторная диаграмма фазных напряжений и токов при несимметричной нагрузке представлена на рисунке 4.11

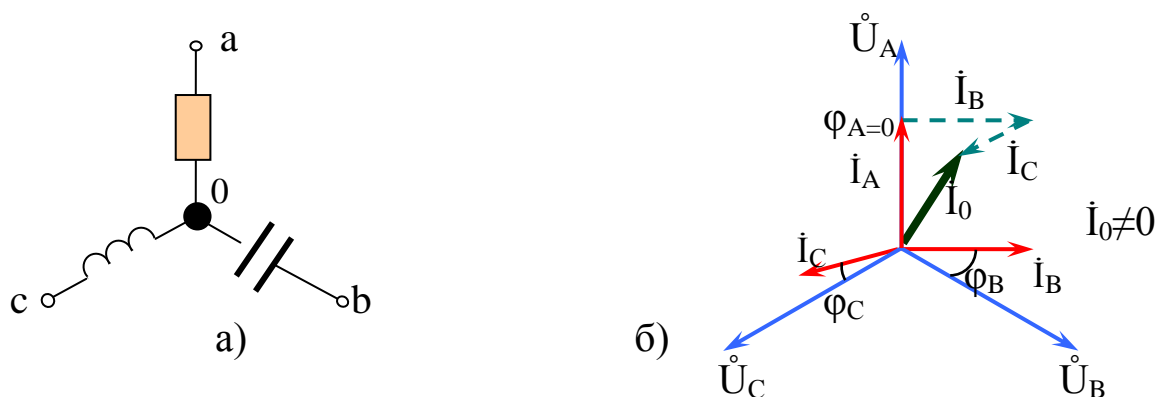


Рисунок 4.11– Несимметричная нагрузка (а) и векторная диаграмма фазных токов и напряжений (б)

В четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные приемники, режимы работы которых не зависят друг от друга, а нулевой провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника, то за счет него напряжения на каждой из фаз будут равны $\dot{U}_A = U_a = U_\phi$ соответствующим фазным напряжениям генератора по амплитуде

и по фазе. А фазные токи в каждой из фаз $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}$ будут разными.

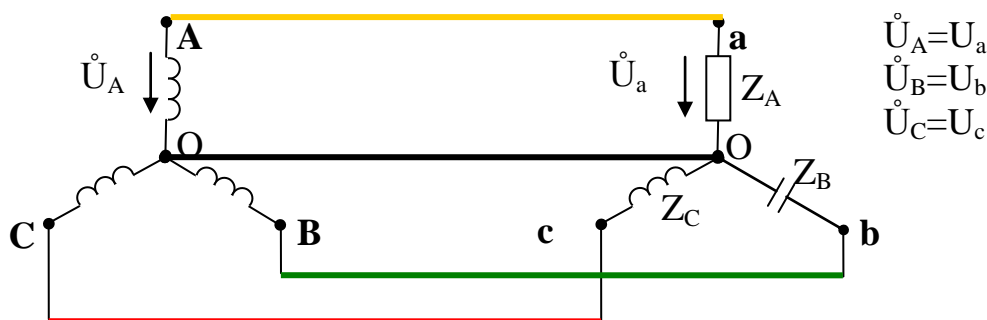


Рисунок 4.12 – Схема четырехпроводной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки по схеме «звезда»

В нейтральном проводе четырехпроводной осветительной цепи запрещена установка предохранителей или выключателей, т. к. при отключении нейтрального провода фазные напряжения становятся неравными, что может привести к выходу из строя бытовых электротехнических приборов. Если при соединении «звездой» перегорит один из магистральных предохранителей, то отключатся только потребители данной фазы.

Соединение нагрузки по схеме «треугольник». При соединении нагрузки в треугольник положительные направления для токов выбирают по часовой стрелке. Индексы у токов соответствуют выбранным положительным направлениям: первый индекс – точка, от которой ток утекает, второй – точка, к которой ток притекает. При таком соединении линейные токи не равны фазным токам нагрузки и определяются через них по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \quad (4.4)$$

Таким образом, линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ при соединении треугольником равны векторной разности фазных токов тех фаз, которые соединены с данным линейным проводом. Фазные токи $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$ при симметричной нагрузке равны по значению и сдвинуты по отношению к векторам напряжений на одинаковый угол φ .

Система линейных (фазных) напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{CA} при соединении треугольником образует замкнутый треугольник (рисунок 4.13). Так как линейные токи определяются через фазные так же, как и линейные напряжения через фазные при соединении звездой, то можно сразу построить векторы линейных токов, соединив концы векторов фазных токов. Векторы линейных токов образуют замкнутый треугольник. Линейные токи при симметричной нагрузке, соединенной треугольником, в $\sqrt{3}$ раза больше фазных токов. В общем случае, когда нагрузка несимметрична, системы фазных и линейных токов также несимметричны (рисунок 4.13 в).

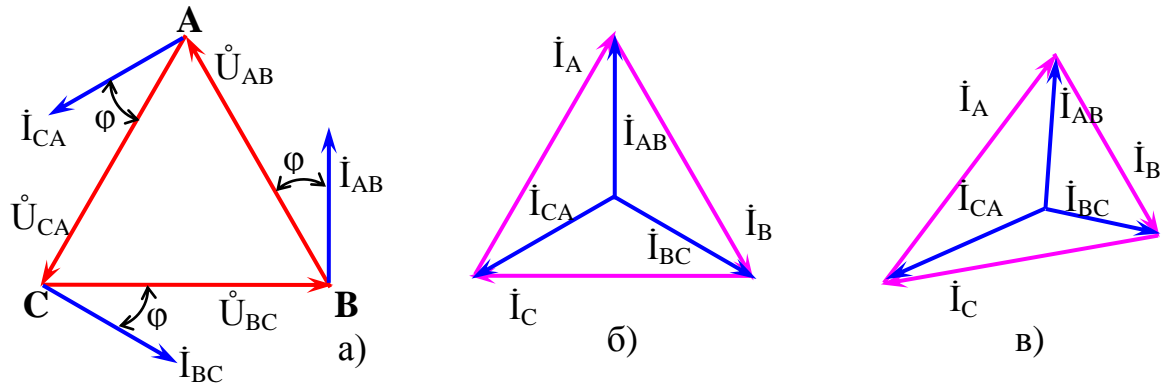


Рисунок 4.13 – Векторная диаграмма напряжений и фазных токов при соединении фаз треугольником (а) и диаграмма фазных и линейных токов при: б) симметричной нагрузке; в) несимметричной нагрузке

Преимуществом соединения приемника по схеме «треугольник» является взаимная независимость фазных токов, которые определяются как

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad (4.5)$$

а нагрузки не равны $Z_{AB} \neq Z_{BC} \neq Z_{CA}$. Токи в линейных проводах определяются через разность фазных токов (4.4) и их сумма будет равна нулю $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0$.

Если при таком соединении перегорит предохранитель в линейном проводе, то приемники в прилегающих к нему фазах окажутся включенными последовательно и напряжение на них будет равно половине линейного напряжения, напряжение на третьей фазе будет нормальным.

На рисунке 4.14 показаны схемы включения однофазных и трехфазных приемников.

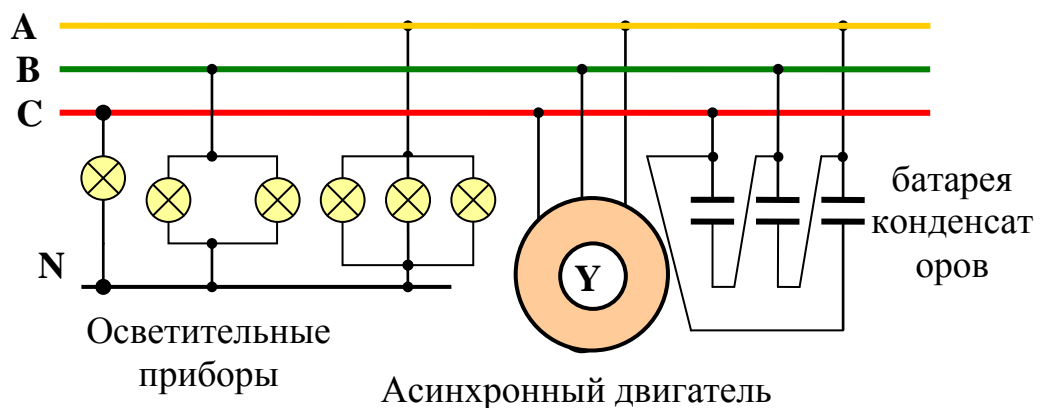


Рисунок 4.14 – Схемы включения однофазных и трехфазных потребителей

Симметричными приемниками на рисунке 4.14 являются асинхронный двигатель, обмотки которого соединены «звездой» и батарея конденсаторов, соединенная треугольником. Симметричные трехфазные приемники можно включать в трехпроводную цепь, как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник». Поэтому на щитках трехфазных электродвигателей указывается два напряжения (одно – для включения фаз звездой, другое – треугольником) и имеется шесть выводов. Например, Y-380/220-Δ: если $U_L = 380\text{В}$, то фазы обмотки двигателя включают «звездой» и $U_\phi = 220\text{В}$, т.к. $U_L = \sqrt{3} U_\phi$, если $U_L = 220\text{В}$, то фазы включают «треугольником» и $U_\phi = U_L = 220\text{В}$.

4.4 Мощность трехфазной системы

Активная мощность трехфазной системы – это сумма активных мощностей фаз нагрузки и активной мощности в сопротивлении нулевого провода. Реактивная мощность – это сумма реактивных мощностей фаз нагрузки и реактивной мощности в сопротивлении нулевого провода

$$P = P_A + P_B + P_C + P_0, \quad Q = Q_A + Q_B + Q_C + Q_0 \quad (4.6)$$

Если нагрузка равномерная (реактивные сопротивления равны между собой $Z_A = Z_B = Z_C$), то мощности $P_0 = Q_0 = 0$ в нулевом проводе равны нулю, а мощности фаз равны между собой

$$\begin{aligned} P_A &= P_B = P_C = U_\phi * I_\phi * \cos \varphi_\phi, \\ Q_A &= Q_B = Q_C = U_\phi * I_\phi * \sin \varphi_\phi \end{aligned} \quad (4.7)$$

Активная, реактивная и полная мощности симметричной трехфазной системы равны

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} U_L * I_L * \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} U_L * I_L * \sin \varphi; \\ S &= \sqrt{3} U_L * I_L \end{aligned} \quad (4.8)$$

Так как нагрузка трехфазной системы может быть симметричной и несимметричной, то и способы измерения активной мощности подразделяются в соответствии с нагрузкой фаз.

1. Для измерения активной мощности в случае несимметричной неравномерной нагрузки и наличия нулевого провода включают три ваттметра (рисунок 4.15). Активная мощность системы при таком измерении складывается из суммы показаний трех ваттметров. При отсутствии нулевого провода мощность измеряют методом двух ваттметров. В этом случае мощность системы будет равняться алгебраической сумме показаний двух ваттметров.

Метод двух ваттметров применяется как при соединении фаз приемника по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник».

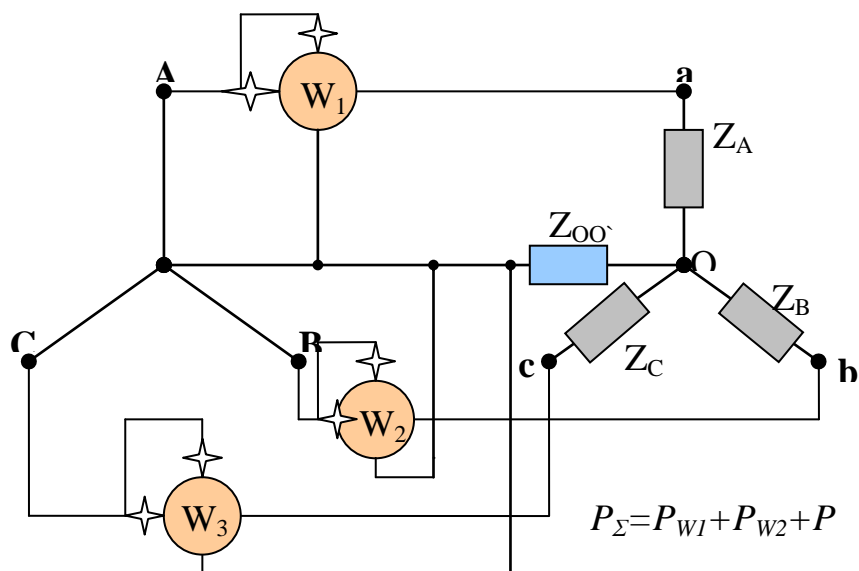


Рисунок 4.15 – Измерение активной мощности методом трех ваттметров

2. В случае симметричных приемников, соединенных как по схеме «звезда», так и «треугольник», мощности всех фаз одинаковы. Поэтому мощность измеряют только в одной фазе, а общая мощность будет равна $P_{\Sigma} = 3P_{\phi}$

Если нейтральная точка симметричного приемника недоступна, то для измерения мощности применяют ваттметры с искусственной нейтральной точкой, выполненные по схеме рисунка 4.16.

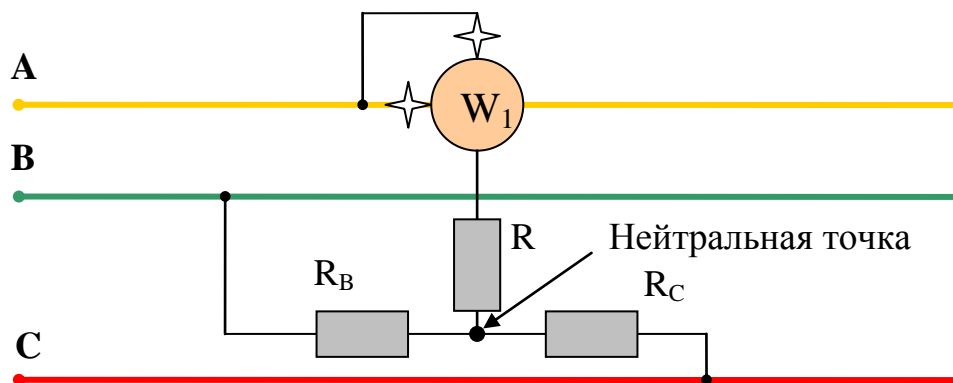


Рисунок 4.16 – Метод измерения мощности с искусственной нейтральной точкой

Вопросы для самоконтроля

- 1) Принцип получения трехфазной системы ЭДС?
- 2) Каково соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями при различных схемах подключения нагрузки?
- 3) Каково назначение нулевого провода?
- 4) Какие напряжения называются фазным и линейным?
- 5) Как найти мощность в трехфазной системе?
- 6) Для чего и как выполняется заземление?

ЛЕКЦИЯ 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Цель лекции: Ознакомление с принципами преобразования электрической энергии и принципом обратимости в электрических машинах. Классификация электрических машин. Изучение устройства, назначения и режимов работы силовых и специальных трансформаторов

5.1 Принципы преобразования электрической энергии

Электрическая машина – это электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергий. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами – генераторами, которые преобразуют механическую энергию в электрическую. В процессе потребления электроэнергии происходит ее преобразование до 70% в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электрическими машинами – электродвигателями.

В основе принципа действия электрических машин лежит **закон электромагнитной индукции**. Для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения. При работе электрической машины в любом из режимов работы (генератора или двигателя) одновременно наблюдаются индуцирование ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, и возникновение силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по нему электрического тока. Взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом направлении, то есть одна и та же машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Это свойство машин называют **обратимостью**.

Конструктивное исполнение электрических машин основано на принципе вращательного движения их подвижной части. Конструкции электрических машин отличаются большим разнообразием, но их связывает один обобщенный принцип, который состоит в следующем: неподвижная часть – **статор** и вращающаяся часть – **ротор**.

Ротор располагается в расточке статора и отделен от него воздушным зазором. Одна из частей машины снабжена элементами, возбуждающими магнитное поле (электромагнит или постоянный магнит), а другая – имеет рабочую обмотку. Обе части машины имеют сердечники, выполненные из магнито-мягкого материала и обладающие магнитным сопротивлением.

Если электрическая машина работает **в режиме генератора**, то при вращении ротора в проводнике рабочей обмотки наводится ЭДС и при подключении потребителя появляется электрический ток. При этом механическая энергия приводного двигателя преобразуется в электрическую.

При работе машины **в режиме двигателя** рабочая обмотка подключается к сети. Ток, протекающий в проводниках обмотки, взаимодействует с магнитным полем и возникающие на роторе электромагнитные силы приводят его во вращение. При этом электрическая энергия, потребляемая из сети, преобразуется в механическую, затрачиваемую на вращение механизмов.

Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным применением, так как связано с взаимным преобразованием электрической и механической энергий. Но применение электрических машин в различных отраслях техники имеет и другие цели: **электромашинные преобразователи** – для преобразования переменного тока в постоянный или тока промышленной частоты в ток более высокой частоты; **электромашинные усилители** – для усиления мощности электрических

сигналов; **синхронными компенсаторами** – электрические машины, применяемые для повышения коэффициента мощности потребителей электрической энергии; **индукционными регуляторами** – электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока

В устройствах автоматики и вычислительной техники применяют микромашины: **тахогенераторы** – для преобразования частоты вращения в электрический сигнал; **сельсины, вращающие трансформаторы** – для получения электрических сигналов, пропорционально углу поворота вала.

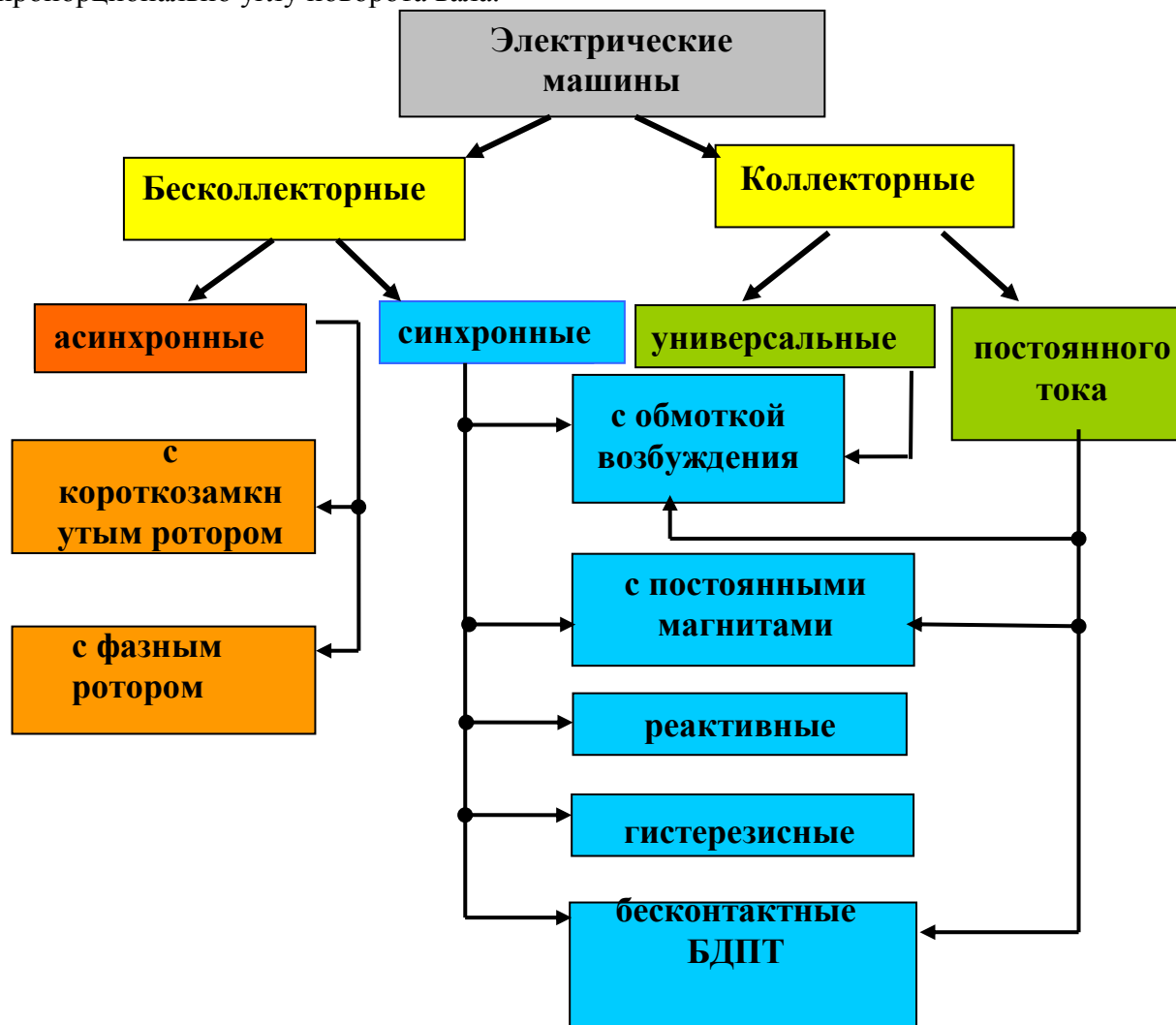


Рисунок 5.1 – Классификация электрических машин

Трансформатор не является электрической машиной, но единая природа электромагнитных процессов, возникающих при взаимодействии магнитного поля и проводника с током, позволяет изучать трансформаторы в разделе «Электрические машины».

5.2 Назначение и принцип действия трансформатора

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции первичной системы переменного тока во вторичную систему переменного тока.

Вторичная система переменного тока может отличаться от первичных любых параметров: значениями напряжения и тока; числом фаз; формой кривой напряжения (тока) или частотой.

По назначению трансформаторы подразделяются на силовые и специальные. В электротехнических установках и линиях электропередач применяются силовые трансформаторы, которые изменяют значения переменного напряжения и тока. К трансформаторам специального назначения относятся печные и сварочные трансформаторы, трансформаторы для устройств автоматики, испытательные и измерительные трансформаторы.

Простейший силовой трансформатор состоит из **магнитопровода**, выполненного из ферромагнитного материала, и двух **обмоток**, расположенных на его стержнях. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками является **активной частью** трансформатора. Остальные элементы трансформатора – неактивные (вспомогательные) части.

Магнитопровод изготавливается из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм, а обмотки из медных или алюминиевых проводов круглого или прямоугольного сечений от 0,02 до 60 мм². Первичная обмотка присоединяется к источнику переменного тока на напряжение U_1 , а ко вторичной обмотке – нагрузка потребителя \underline{Z}_H (рисунок 5.2). Обмотки не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в ее витках протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе магнитный поток Φ . Этот поток сцепляется с обеими обмотками и индуцирует в них ЭДС: в первичной обмотке ЭДС самоиндукции, а во вторичной – ЭДС взаимной индукции:

$$e_1 = -\omega_1 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right); \quad e_2 = -\omega_2 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right), \quad (5.1)$$

где ω_1 и ω_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках.

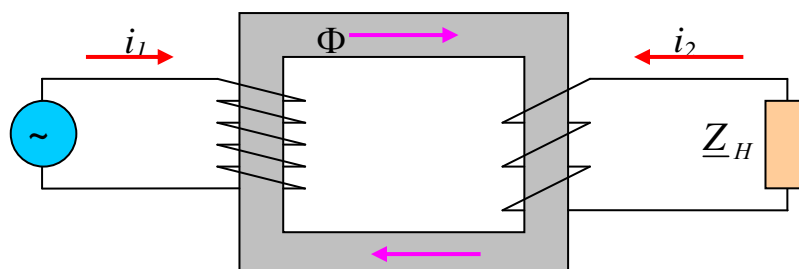


Рисунок 5.2 – Электромагнитная схема однофазного трансформатора

При подключении нагрузки \underline{Z}_H к выводам вторичной обмотки в этой цепи создается ток i_2 под действием ЭДС e_2 , и на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 .

Токи i_1 и i_2 в обмотках трансформатора помимо основного магнитного потока создают и магнитные потоки рассеяния, каждый из которых сцеплен с витками только собственной катушки, в которой он и индуцирует ЭДС рассеяния. Таким образом, в каждой из обмоток трансформатора индуцируются по две ЭДС: от основного потока Φ и ЭДС от потоков рассеяния первичной и вторичной обмотки.

ЭДС первичной обмотки E_1 , наведенная основным магнитным потоком находится в противофазе с подведенным напряжением U_1 , а т. к. индуктивное $j\dot{I}_1 \cdot X_1$ и активное $\dot{I}_1 R_1$ падения напряжений малы, поэтому $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$

Для вторичной обмотки трансформатора, замкнутой на нагрузку, уравнение напряжений имеет вид:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 * R_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_H \quad (5.2)$$

Из уравнения (5.2) следует, что напряжение на выходе нагруженного трансформатора отличается от ЭДС вторичной обмотки на величину падения напряжения во вторичной обмотке.

Действующие значения ЭДС равны:

$$E_1 = 4,44 * f * \omega_1 * \Phi_C \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44 * f * \omega_2 * \Phi_C. \quad (5.3)$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{I_2}{I_1} = n. \quad (5.4)$$

Трансформаторы обладают **свойством обратимости**: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо повышающий, либо понижающий. В «повышающих» трансформаторах $U_2 > U_1$, а в «понижающих» $U_2 < U_1$. Так как величины e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, зависят от количества витков первичной ω_1 и вторичной ω_2 обмоток, то, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют обмоткой **высокого напряжения** (ВН), а обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения – обмоткой **низшего напряжения** (НН).

Свойства трансформатора определяются его параметрами: номинальными первичным и вторичным линейным напряжением; номинальными линейными токами первичной и вторичной обмоток и полной мощностью $S_{НОМ}$, кВА: для однофазного

трансформатора $S_{НОМ} = U_{1НОМ} * I_{1НОМ}$, для трехфазного – $S_{НОМ} = \sqrt{3} U_{1НОМ} * I_{1НОМ}$.

5.3 Классификация трансформаторов

Трансформаторы классифицируются (рисунок 5.3):

По назначению – силовые общего назначения, специального назначения, импульсные, для преобразования частоты;

По виду охлаждения – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением; при этом охлаждение может быть естественное и с принудительной циркуляцией;

По числу трансформируемых фаз – однофазные и трехфазные;

По форме магнитопровода – стержневые, броневые, бронестержневые и тороидальные;

По числу обмоток на фазу – двухобмоточные (с одной первичной и одной вторичной обмотками) и многообмоточные (с несколькими первичными и вторичными обмотками).

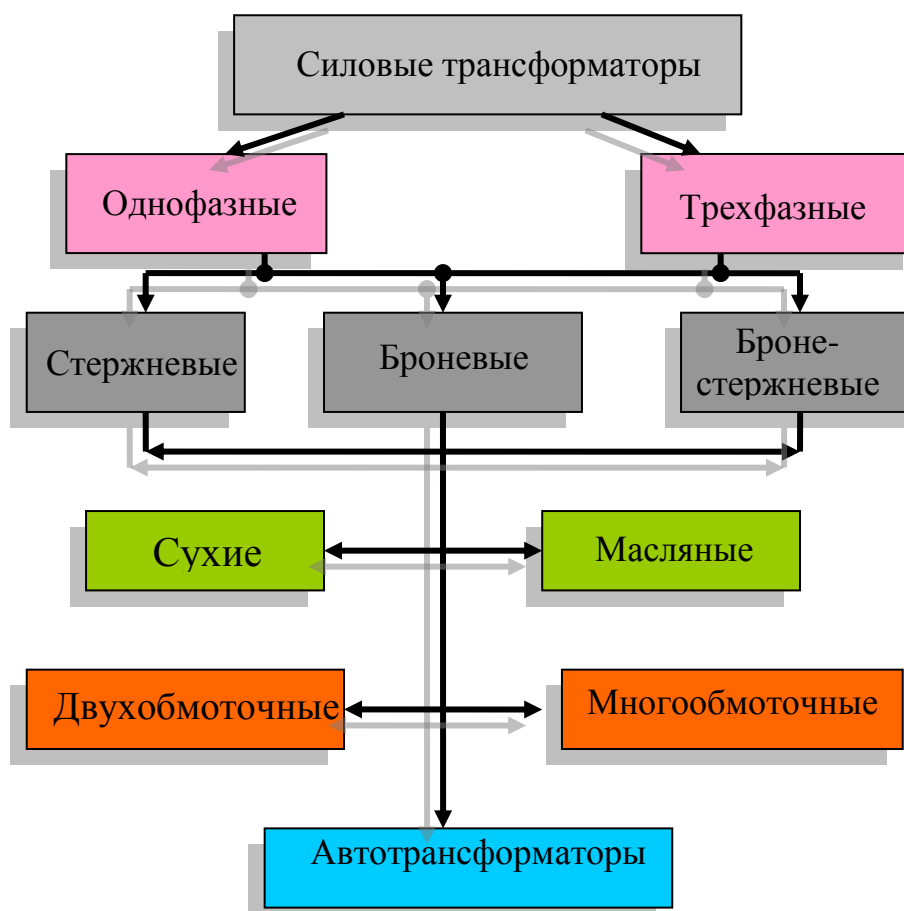


Рисунок 5.3 –Классификация силовых трансформаторов

5.4 Устройство трансформатора

Трансформатор состоит из следующих основных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и т. д. **Магнитопровод** с насаженными на его стержни обмотками является **активной частью** трансформатора и выполняет две функции: составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток и является основой для установки и крепления обмоток, отводов и переключателей.

Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию – состоит из тонких (0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (лаком). Такая конструкция служит для ослабления вихревых токов, наводимых переменным магнитным потоком и уменьшения потерь энергии.

Силовые трансформаторы выполняются в магнитопроводе трех типов: стержневого, броневоего и бронестержневого. В магнитопроводе **стержневого типа** обмотки, насаженные на стержень, охватывают его. Горизонтальные части магнитопровода называются **ярмом**. Магнитопровод трансформатора **броневоего типа** имеет один стержень с обмотками и развитое ярмо, которое прикрывает обмотки подобие «брони».

По способу соединения стержней с ярмами различают **стыковую** и **шихтованную** конструкции стержневого магнитопровода. При **стыковой** конструкции стержни и ярма собирают раздельно. Потом насаживают обмотки на стержни. Затем приставляют верхнее и нижнее ярма, проложив изолирующие прокладки между стыкующимися элементами (для ослабления вихревых токов). Такая конструкция облегчает сборку магнитопровода, но очень громоздка из-за стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка. **Шихтованная** конструкция магнитопроводов, это когда стержни и ярма собирают слоями в переплет, а слой состоит из 2-3 листов. В настоящее время пластины для сборки магнитопроводов изготавливают из холоднокатаной электротехнической стали, у которой

магнитные свойства вдоль направления прокатки листа лучше, чем поперек. Недостатком шихтованной сборки является сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

Стержни магнитопроводов во избежания распушения **опресовывают** (скрепляют). Делают это путем наложения банджа из стеклоленты или стальной проволоки. Для **опресовки ярм** и мест их сочленения со стержнями используют ярмовые балки, которые в местах, выходящих за стержни, стягивают шпильками.

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, магнитопровод и детали его крепления **заземляют**. Заземление осуществляют медными лентами, которые вставляют между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляют к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (до 1кВА) изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем **навивки**. Такие магнитопроводы изготавливают разрезными, а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

Формы сечения стержней имеют ступенчатое (для трансформаторов малой и средней мощностей) или многоступенчатое сечение (для трансформаторов большой мощности). В многоступенчатых стержнях обеспечивается лучшее использование площади круга внутри обмотки. Такая конструкция стержней позволяет при значении магнитного потока $\Phi = const$ или мощности уменьшить габариты обмотки, и следовательно, габариты всего трансформатора. Для улучшения теплоотдачи между пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5-6 мм, которые служат вентиляционными каналами. Ярмо трансформатора имеет обычно квадратное сечение.

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Обмотки масляных трансформаторов изготавливают из проводов с эмалевой и хлопчатобумажной изоляцией (круглые сечения) и из проводов, изолированных двумя слоями кабельной бумаги и хлопчатобумажной пряжей (прямоугольные сечения). В сухих трансформаторах применяют провода с нагревостойкой изоляцией из стекловолокна.

Основой обмотки является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы), которые обеспечивают обмотке механическую и электрическую прочность.

Обмотки изготавливают из медного и алюминиевого проводов. Для изготовления обмоток применяют круглые провода сечением от 0,02 до 10 мм² и прямоугольные – сечением от 6 до 60 мм².

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяются на **концентрические** и **чередующиеся**. **Концентрические** обмотки выполняют в виде цилиндров, размещенных на стержне концентрически: ближе к стержню, располагается обмотка НН (требует меньшей изоляции от стержня), а снаружи – обмотку ВН. **Чередующиеся** (дисковые) обмотки выполняют в виде отдельных секций НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке. Такие обмотки имеют более полную электромагнитную связь, но они сложнее в изготовлении и применяются в трансформаторах специального назначения.

Концентрические обмотки в конструктивном отношении разделяют на несколько типов: **цилиндрические однослойные** или **двухслойные обмотки** из провода прямоугольного сечения (используют в качестве обмоток НН на номинальный ток до 800 А); **винтовые одно- и многоходовые обмотки** – из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов; **непрерывные обмотки** – состоят из отдельных дисковых обмоток (секций), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, т.е.

выполненных «непрерывно». Если обмотка выполняется несколькими параллельными проводами, то в ней применяют **транспозицию** (перекладку) проводов. Непрерывные обмотки получили наибольшее применение в силовых трансформаторах, как в качестве обмоток НН, так и ВН.

При изготовлении трансформатора с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещают в бак, наполненный трансформаторным маслом. Трансформаторное масло, омывая обмотки и магнитопровод, отбирает от них теплоту и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака и трубы радиатора отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, т. к. электрическая прочность масла выше, чем воздуха и масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габаритные размеры и вес масляных трансформаторов меньше, чем воздушных.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при контакте с воздухом применяют расширитель, который устанавливается на крышке бака трансформатора. В трубопровод, соединяющий бак трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе перенапряжений, сопровождающихся обильным выделением газов (при межвитковом коротком замыкании), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети.

Обмотки трансформатора соединяют с внешней цепью вводами, установленными на крышке бака. В качестве вводов используют проходные фарфоровые изоляторы. Такой ввод снабжен металлическим фланцем, с помощью которого он крепится к крышке бака.

К дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор.

5.5 Режимы работы трансформаторов

Различают несколько режимов работы трансформатора: **номинальный режим работы** – при номинальных значениях напряжения $U_1 = U_{1НОМ}$ и тока $I_1 = I_{1НОМ}$ первичной обмотки трансформатора; **рабочий режим**, при котором $U_1 \approx U_{1НОМ}$, ток I_1

определяется нагрузкой трансформатора, а ток вторичной обмотки $I_{2Н} = \frac{S}{U_{2Н}}$; **режим**

холостого хода – режим ненагруженного трансформатора, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута ($I_2=0$) или подключена к приемнику с очень большим сопротивлением нагрузки (вольтметр); **режим короткого замыкания** – режим трансформатора, при котором его вторичная обмотка замкнута накоротко ($U_2=0$) или подключена к приемнику с очень малым сопротивлением нагрузки (амперметр).

Режимы холостого хода и короткого замыкания – аварийные режимы.

5.6 Потери и КПД трансформатора

В процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в самом трансформаторе на покрытие потерь, которые разделяются на электрические и магнитные.

Электрические потери P_{Σ} возникают в связи с нагревом обмоток трансформатора при прохождении по ним электрического тока. Мощность электрических потерь при проектировании трансформатора определяют:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = mI_1^2 R_1 + mI_2^2 R_2, \quad (5.5)$$

где m – число фаз в обмотках трансформатора, а для изготовленного трансформатора – опытным путем, измеряя мощность короткого замыкания $P_{кз}$.

Электрические потери называют переменными, так как их величина зависит от нагрузки трансформатора.

Магнитные потери P_M происходят главным образом в магнитопроводе трансформатора, причиной которых является систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Перемагничивание вызывает два вида магнитных потерь: от гистерезиса P_G , которые связаны с затратой энергии на уничтожение остаточного магнетизма в ферромагнитном материале магнитопровода и от вихревых токов $P_{В.Т.}$, наводимые переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода.

Для снижения потерь магнитопровод выполняют из магнито-мягкого ферромагнитного материала, шихтованным в виде пакетов из тонких пластин электротехнической стали, изолированных пленкой лака.

Магнитные потери от гистерезиса прямо пропорциональны частоте перемагничивания магнитопровода, то есть частоте переменного тока, а магнитные потери от вихревых токов пропорциональны квадрату этой частоты. Суммарные магнитные потери принято считать равными

$$P_M = f(f^{1,3}). \quad (5.6)$$

При неизменном первичном напряжении магнитные потери постоянны, то есть не зависят от нагрузки трансформатора.

Для изготовленного трансформатора магнитные потери определяют опытным путем, измеряя мощность холостого хода при $U_{ном}$.

Активная мощность, поступающая в нагрузку трансформатора

$$P_2 = P_1 - \sum P, \quad \text{где } \sum P = P_{\Sigma 1} + P_M + P_{\Sigma 2}, \quad (5.7)$$

суммарные потери в трансформаторе.

Коэффициент полезного действия (КПД) – отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{или} \quad \eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (5.8)$$

В общем случае КПД трансформатора зависит от режима нагрузки.

5.7 Трёхфазные трансформаторы, автотрансформаторы и измерительные трансформаторы

В линиях электропередачи используют в основном **трёхфазные силовые трансформаторы**. Магнитопровод трёхфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы.

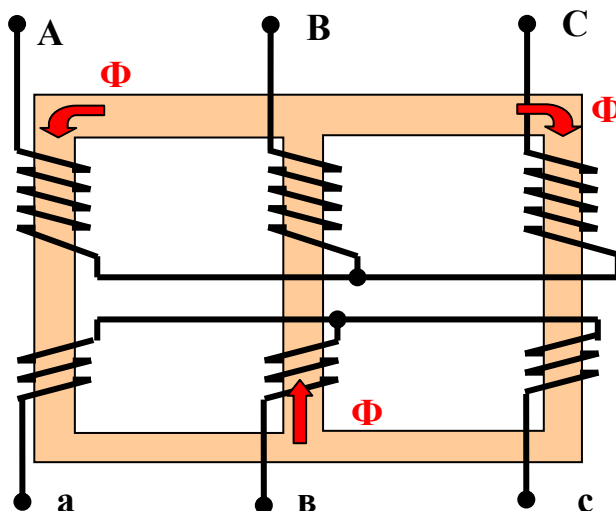


Рисунок 5.4 – Магнитная система трёхфазного трансформатора

Особенностью трёхфазного трансформатора является зависимость коэффициента трансформации линейных напряжений от способа соединения обмоток. Применяются главным образом три способа соединения обмоток трёхфазного трансформатора: соединение первичных и вторичных обмоток звездой; соединение первичных обмоток звездой, вторичных – треугольником; соединение первичных обмоток треугольником, вторичных – звездой.

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в $\sqrt{3}$ увеличить или уменьшить его коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

У автотрансформатора часть витков первичной обмотки используется в качестве вторичной обмотки, поэтому помимо магнитной связи имеется электрическая связь между первичной и вторичной цепями. В соответствии с этим энергия из первичной цепи во вторичную передаётся как с помощью магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, так и непосредственно по проводам.

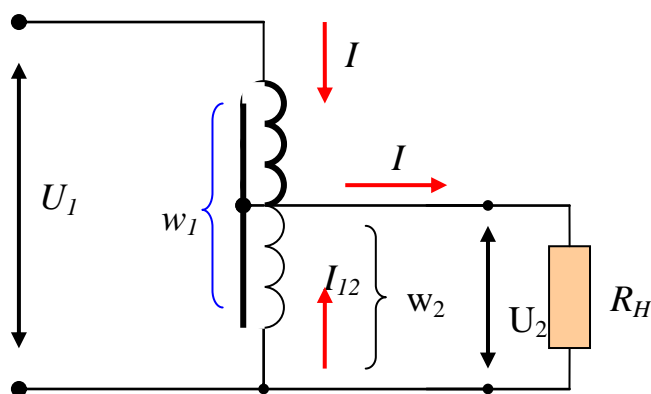


Рисунок 5.5 – Принципиальная схема автотрансформатора

Вследствие электрического соединения обмоток через часть витков, принадлежащую одновременно первичной и вторичной цепям, проходят токи I_1 и I_2 , которые направлены встречно и при небольшом коэффициенте трансформации мало отличаются друг от друга по значению. Поэтому их разность оказывается небольшой и обмотку w_2 выполняют из тонкого провода.

Автотрансформаторы применяют для пуска мощных двигателей переменного тока, регулирования напряжения в осветительных сетях, а также в других случаях, когда необходимо регулировать напряжение в небольших пределах. Преимущества автотрансформатора снижаются с увеличением коэффициента трансформации. Кроме того, только при высшем и низшем напряжениях одного порядка электрическое соединение цепей не встречает препятствий. Но автотрансформатор нельзя применять, например, для питания распределительной сети 220 В от сети высокого напряжения 6000 В. При таком автотрансформаторе не только пришлось бы рассчитать изоляцию распределительной сети на 6000 В, что увеличило бы значительно ее стоимость, но и пользоваться такой сетью опасно для жизни.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока используют для включения измерительных приборов, аппаратуры автоматического регулирования и защиты в высоковольтные цепи.

Измерительные трансформаторы напряжения (ТН) служат для включения вольтметров и обмоток напряжения измерительных приборов. Поскольку обмотки имеют большое сопротивление и потребляют маленькую мощность, можно считать, что они работают в режиме холостого хода.

ТН предназначен для понижения высокого напряжения до стандартного значения 100 или $100/\sqrt{3}$ и для отделения цепей измерения и релейной защиты от первичных цепей высокого напряжения.

В ТН один вывод вторичной обмотки и корпус трансформатора заземляются. Это делается на случай повреждения изоляции, а также для того, чтобы замкнуть на землю цепь тока (пунктирная замкнутая линия), наличие которого снижает точность измерений прибора.

В зависимости от величины напряжения ТН изготавливают с двумя видами охлаждения: до напряжения 6 кВ – сухие с естественным охлаждением, а выше 6 кВ – масляные. По типу изоляции: сухие, масляные и с литой изоляцией. По конструкции различают трехфазные и однофазные ТН. Трехфазные ТН применяются при напряжениях до 18 кВ, а однофазные – на любые напряжения.

В зависимости от назначения могут применяться ТН с различными схемами соединения обмоток. Например, для измерения трехмеждуфазных напряжений можно использовать два однофазных двухобмоточных трансформатора НОМ, НОС, НОЛ, соединенных по схеме открытого треугольника, а также трехфазный двухобмоточный трансформатор НТМК, обмотки которого соединены в «звезду».

Измерительные трансформаторы тока (ТТ) используют для включения амперметров и токовых катушек измерительных приборов. Эти катушки имеют очень маленькое сопротивление, поэтому трансформаторы тока практически работают в режиме короткого замыкания.

К трансформаторам тока кроме требований по точности предъявляют еще требования по устойчивости в отношении коротких замыканий, т. к. первичная обмотка ТТ находится в цепи, где возможно короткое замыкание и через ТТ включаются аппараты защиты (реле), отключающие установку в случае короткого замыкания. Поэтому ТТ должен выдерживать кратковременный ток короткого замыкания и воздействовать на аппарат защиты, который отключит аварийный участок сети.

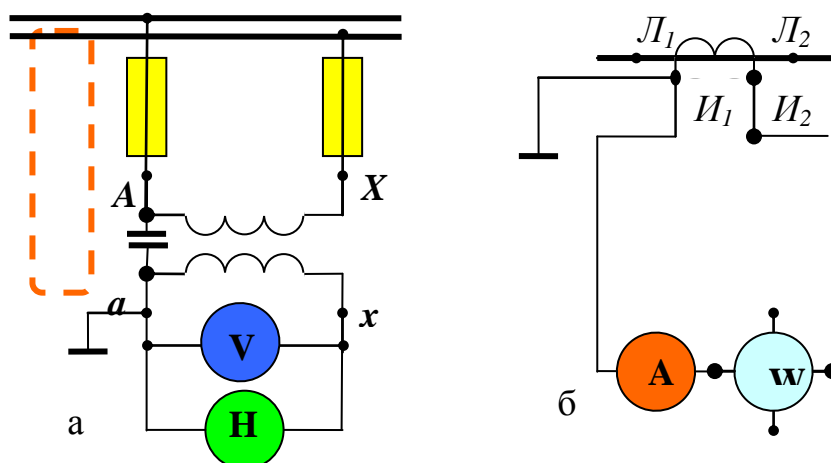


Рисунок 5.6 – Принципиальные схемы включения трансформатора напряжения (а) и трансформатора тока (б)

Показания приборов, включенных через трансформаторы напряжения или тока необходимо умножить на произведение коэффициентов трансформации этих трансформаторов.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Назначение трансформатора.
- 2) Классификация трансформаторов.

- 3) Пояснить принцип действия трансформатора.
- 4) Что такое коэффициент трансформации, как его определить?
- 5) Чем определяются потери энергии в трансформаторе?
- 6) Что такое опыт короткого замыкания?
- 7) Как можно изменить коэффициент трансформации трансформатора?

ЛЕКЦИЯ 6. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель лекции: Ознакомление с устройством, принципом действия, режимами работы, характеристиками машины с различными системами возбуждения и видами коммутации машины постоянного тока.

6.1 Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока

Электрические машины постоянного тока используются в качестве генераторов и двигателей, но наибольшее применение имеют двигатели постоянного тока. Двигатели постоянного тока используются для привода подъемных и транспортных средств, т. к. обладают хорошими пусковыми и регулировочными свойствами, а также возможностью получения частоты вращения более 3000 об/мин. Недостатками являются высокая стоимость, сложность в изготовлении и пониженная надежность, которые обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла.

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них **коллектора – механического преобразователя** переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в преобразователе связана тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, т. к. только в этом случае в машине происходит процесс электромеханического преобразования энергии. Коллектор состоит из соединенных с витками обмотки якоря изолированных между собой пластин, которые, вращаясь вместе с обмоткой якоря, поочередно соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью. Одна из щеток является положительной, а другая – отрицательной.

В генераторе за счет коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток во внешней цепи, то есть ток неизменный по направлению. Таким образом, под щеткой **A** всегда находится пластина коллектора, которая соединена с проводником, находящимся под северным полюсом, а под щеткой **B** – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток остается неизменной независимо от положения витка якоря. Пульсации тока ослабляются с увеличением числа витков и пластин коллектора.

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенную модель машины постоянного тока можно рассмотреть в качестве двигателя. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока.

В результате взаимодействия тока с магнитным полем постоянного магнита появятся электромагнитные силы, которые создадут в якоре электромагнитный момент, вращающий якорь против часовой стрелки. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого из проводников якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого, в проводниках меняется направление тока. **Назначение коллектора и щеток в двигателе** – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону другой полярности.

6.2 Устройство коллекторной машины постоянного тока

Отдельные узлы электрические машины постоянного тока, предназначенных для работы в различных отраслях, могут иметь различную конструкцию, но общая конструкция одинакова (рисунок 6.1).

Неподвижная часть машины постоянного тока называется статором, а вращающаяся – якорем.

Статор – состоит из **станины 8** и **главных полюсов 6**. Станина служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготавливают из стали –

материала, обладающего механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. По окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов **6**. **Главные полюса** предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения и состоят из сердечников **6** и полюсных катушек **7**. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник имеет **полюсный наконечник**, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники полюсов выполняют шихтованными из пластин листовой электротехнической стали толщиной 1-2 мм, которые не изолируют, т. к. окисная пленка на их поверхности достаточна для ослабления вихревых токов.

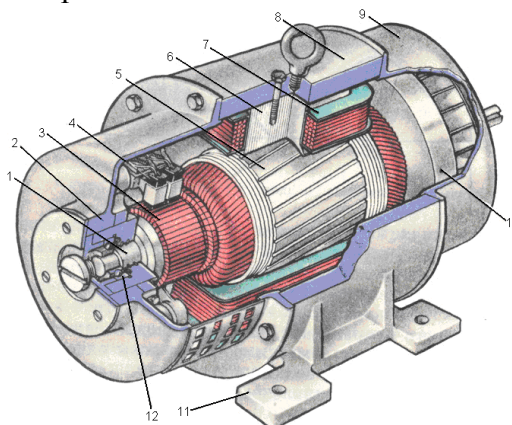


Рисунок 6.1 – Устройство машины постоянного тока

В машинах малой мощности **полюсные катушки** делают бескаркасными, то есть наматывают медный обмоточный провод непосредственно через изоляционную прокладку на сердечник полюса. В большинстве машин полюсную катушку делают каркасной, т. е. обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник.

Якорь состоит из **вала 1**, **сердечника 5** с обмоткой и **коллектора 3**.

Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из пластин электротехнической стали. Листы покрываются изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция якоря позволяет ослабить вихревые токи, которые возникают в якоре в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывается якорная обмотка. **Якорную обмотку** выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают, а накладывают на поверхность якоря бандаж из проволоки или стеклоленты.

Коллектор является сложным узлом машины постоянного тока. Основными элементами коллектора являются пластины трапецеидального сечения из твердотянутой меди. Эти пластины собирают так, что коллектор приобретает цилиндрическую форму. Различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами и на пластмассе.

Нижняя часть коллекторных пластин имеет форму «ласточкин хвост». После сборки коллектора эта часть («ласточкин хвост») оказывается зажатой между стальными шайбами, которые изолируются от коллекторных пластин миканитовыми манжетами (прокладками). Коллекторы на пластмассе применяют в машинах малой мощности, где набор медных и миканитовых пластин удерживается пластмассой, которая и образует корпус коллектора.

В процессе работы машины рабочая поверхность коллектора постепенно истирается щетками. Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью, между коллекторными пластинами фрезеруют пазы на глубину до 1,5 мм.

К выступающей части коллекторных пластин в паз закладываются проводники обмотки якоря и припаиваются.

Электрический контакт с коллектором осуществляется **щетками**, которые располагаются в щеткодержателе. Щетка снабжается гибким **тросиком** для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, которые подключаются к выводам машины. Одно из главных условий бесперебойной работы машины постоянного тока – плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором. Давление на щетку должно быть отрегулировано, т. к. сильный нажим может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим – искрение на коллекторе.

Кроме этих основных частей машина имеет два подшипниковых щита: передний **2** задний **9**. В переднем щите имеется смотровое окно с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор **10** служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

6.3 Причины, вызывающие искрение на коллекторе

При вращении машины коллекторные пластины поочередно вступают в соприкосновение со щетками. При этом переход щетки с одной пластины на другую сопровождается переключением секции обмотки из одной параллельной ветви в другую и изменением значения и направления тока в секции. Процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую называется **коммутацией**. Различают при этом два вида коммутации: **прямолинейная** коммутация, при которой ток коммутирующей секции изменяется по прямолинейному закону; **криволинейная** коммутация, когда процесс изменения направления тока затягивается во времени, а признаком является неодинаковая плотность тока под щеткой в периоде коммутации.

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины, приходящегося на одну щетку, в соответствии с допустимой плотностью тока для выбранной марки щеток.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, разделяют на механические, потенциальные и коммутационные.

Механические причины искрения – слабое давление щеток на коллектор, биение коллектора, его эллиптичность или негладкая поверхность, загрязнение поверхности коллектора, выступление миканитовой изоляции над медными пластинами, неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей, а также другие причины, вызывающие нарушение электрического контакта между щеткой и коллектором.

Потенциальные причины искрения появляются при возникновении напряжения между смежными коллекторными пластинами, превышающего допустимое значение. В этом случае искрение наиболее опасно, так как оно обычно сопровождается появлением на коллекторе электрических дуг.

Коммутационные причины искрения создаются физическими процессами, происходящими в машине при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Иногда искрение вызывается целым комплексом причин. Выяснение причин искрения следует начинать с механических, так как их обнаруживают осмотром коллектора и щеточного устройства. Труднее обнаружить и устранить коммутационные причины искрения.

При выпуске готовой машины с завода в ней настраивают **темную коммутацию**, исключаящую какое-либо искрение. Однако в процессе эксплуатации машины, по мере износа коллектора и щеток, возможно появление искрения. В некоторых случаях оно

может быть значительным и опасным, тогда машину необходимо остановить для выяснения и устранения причин искрения. Однако небольшое искрение в машинах общего назначения обычно допустимо.

Согласно ГОСТ, искрение на коллекторе оценивается степенью искрения: степень 1 – искрение отсутствует (темная коммутация); степень $1^{1/4}$ – незначительное искрение под щеткой, не вызывающее почернения коллектора появления нагара; степень $1^{1/2}$ – слабое искрение под большей частью щетки, следы почернения, которые легко устраняются путем протирания поверхности коллектора; степень 2 – искрение под всем краем щетки (приводит к появлению не устранимых следов почернения и нагара); степень 3 – значительное искрение с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к не устранимому почернению коллектора.

Если в паспорте машины не указана степень искрения, то при номинальной нагрузке она не должна превышать $1^{1/2}$.

6.4 Способы возбуждения машин постоянного тока

Для работы электрической машины необходимо наличие магнитного поля, которое создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Классификация машин постоянного тока определяется **способом включения обмотки возбуждения**:

1. Машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рисунок 6.2.а).

2. Машины параллельного возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рисунок 6.2 б).

3. Машины последовательного возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рисунок 6.2в).

4. Машины смешанного возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения – параллельная и последовательная (рисунок 6.2 г).

5. Машины с возбуждением постоянными магнитами, когда вместо обмотки возбуждения включен постоянный магнит.

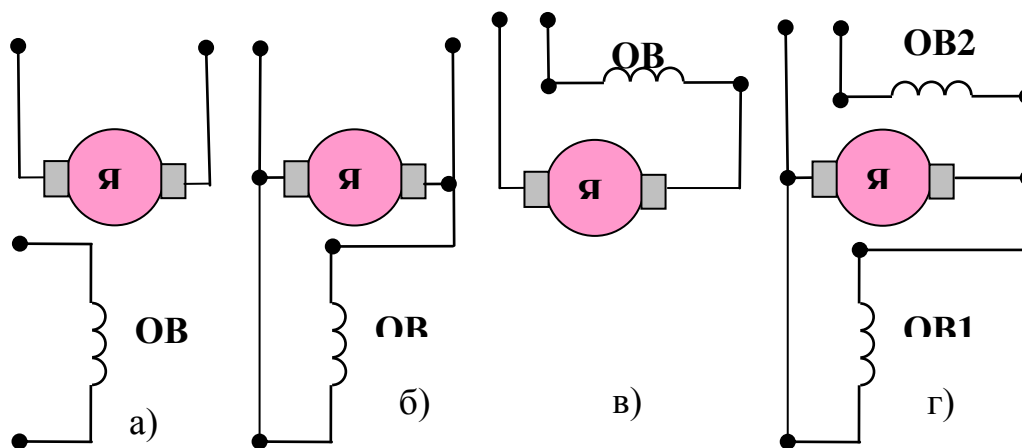


Рисунок 6.2 – Способы возбуждения машин постоянного тока

Все машины (кроме последней) – машины с **электромагнитным возбуждением**, т. к. магнитное поле в них создается электрическим током обмотки возбуждения.

6.5 Основные характеристики генераторов постоянного тока

Так все генераторы работают при неизменной частоте вращения, то и их характеристики рассматриваются при условии постоянства частоты вращения $n=const$. Основными характеристиками генераторов являются:

1. **Характеристика холостого хода** – зависимость напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода $U_{ХХ}$ от тока возбуждения I_e
2. **Нагрузочная характеристика** – зависимость напряжения на выходе генератора U при работе с нагрузкой от тока возбуждения I_e
3. **Внешняя характеристика** – зависимость напряжения на выходе генератора U от тока нагрузки I_H .
4. **Регулировочная характеристика** – зависимость тока возбуждения I_e от тока нагрузки I_H при неизменном напряжении на выходе генератора

Вид этих характеристик определяет рабочие свойства генераторов.

Генератор независимого возбуждения. Схема включения генератора независимого возбуждения показана на рисунке 6.3. Реостат R , включенный в цепь возбуждения, дает возможность регулировать ток I_e в обмотке возбуждения (и основной магнитный поток машины). Обмотка возбуждения питается от источника энергии постоянного тока: аккумулятора или выпрямителя.

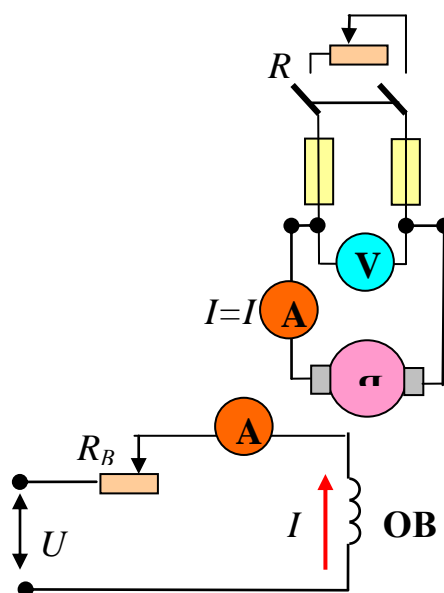


Рисунок 6.3 – Схема включения генератора независимого возбуждения

Характеристика холостого хода. При снятии характеристики генератор работает в режиме холостого хода. Установив номинальную частоту вращения и поддерживая ее неизменной, постепенно увеличивают ток в обмотке возбуждения I_e от нулевого значения до значения, при котором напряжение холостого хода будет равно $U_{ХХ} = 1,15 U_{ном}$. Получают данные для построения кривой **1**. Нисходящая (кривая **2**) и восходящая (кривая **1**) ветви характеристики холостого хода образуют петлю намагничивания. Прямолинейная часть характеристики соответствует ненасыщенной магнитной системе машины. При дальнейшем увеличении тока сталь машины насыщается, и характеристика приобретает криволинейный характер. Характеристика холостого хода показана на рисунке 6.4.

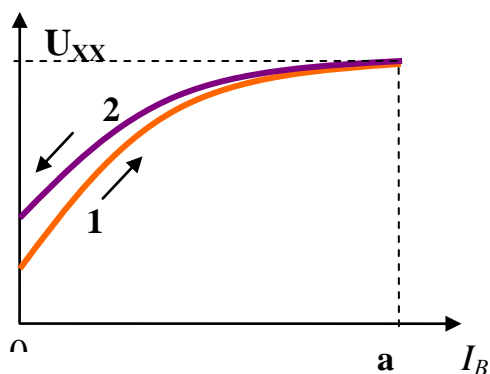


Рисунок 6.4 – Характеристики холостого хода генератора независимого возбуждения

Нагрузочная характеристика генератора – выражает зависимость напряжения на выходе генератора от тока возбуждения при неизменном токе нагрузке и частоте вращения. При указанных условиях напряжение на выводах генератора меньше ЭДС, поэтому нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода.

Внешняя характеристика генератора. Для построения внешней характеристики генератор приводят во вращение с номинальной скоростью и нагружают до номинального тока при номинальном напряжении. Сопротивления цепи возбуждения и частоту вращения в течение опыта поддерживают неизменными. При увеличении тока нагрузки напряжение на выводах генератора понижается; что объясняется размагничивающим влиянием реакции якоря и падением напряжения в цепи якоря. Наклон внешней характеристики к оси абсцисс (**жесткость внешней характеристики**) оценивается как:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{xx} - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \quad (6.1)$$

Обычно для генератора независимого возбуждения составляет $\Delta U_{ном} = 5-10\%$.

Регулировочная характеристика генератора показывает, как следует изменять ток в цепи возбуждения, чтобы при изменениях нагрузки генератора напряжение на его выводах оставалось неизменным, равным номинальному. При этом частота вращения сохраняется постоянной.

При работе генератора без нагрузки в цепи возбуждения устанавливает ток возбуждения, при котором напряжение на выводах генератора становится равным номинальному. Затем постепенно увеличивают нагрузку генератора, одновременно повышают ток возбуждения так, чтобы напряжение генератора во всем диапазоне нагрузок оставалось равным номинальному.

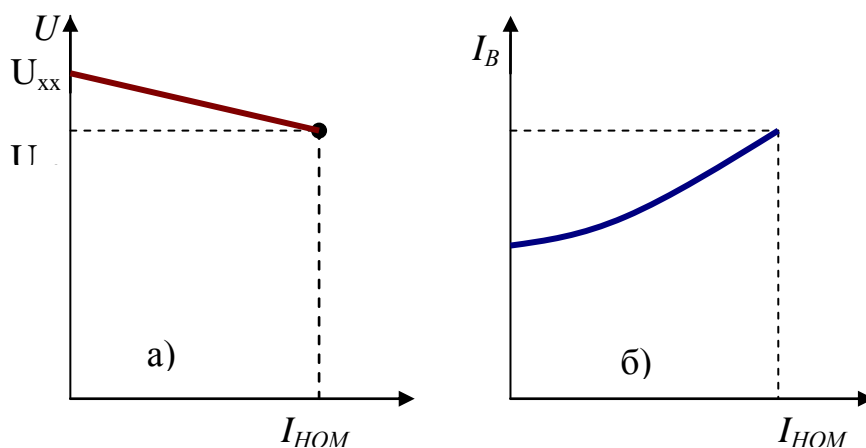


Рисунок 6.5 – Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристики

Основной недостаток генераторов независимого возбуждения – необходимость в постороннем источнике энергии постоянного тока – возбудителе. Но возможность регулирования напряжения в широких пределах, а также жесткая внешняя характеристика являются его достоинствами.

Генератор параллельного возбуждения. Принцип самовозбуждения генератора постоянного тока основан на том, что: а) магнитная система машины сохраняет длительное время небольшой магнитный поток остаточного магнетизма сердечников полюсов и станины; б) создаваемый магнитный поток должен совпадать по направлению с остаточным; в) сопротивление в цепи возбуждения не должно превосходить критического значения для машины.

Характеристика холостого хода будет аналогична показанной на рисунке 6.4, а **нагрузочная и регулировочная** характеристики генератора параллельного возбуждения практически не отличаются от соответствующих характеристик генератора независимого возбуждения.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рисунок 6.6) менее жесткая, чем у генератора независимого возбуждения. Объясняется это тем, что кроме причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря), действует и третья – уменьшение тока возбуждения, вызванное снижением напряжения от действия первых двух причин.

При постепенном уменьшении R_H ток увеличивается только до критического значения $I_{кр}$, а затем при дальнейшем уменьшении R_H ток начинает уменьшаться. Ток нагрузки при коротком замыкании $I_{кз} < I_{кр}$, т. к. с увеличением тока усиливается размагничивание генератора, машина переходит в ненасыщенное состояние, при котором небольшое уменьшение R_H вызывает резкое уменьшение ЭДС машины.

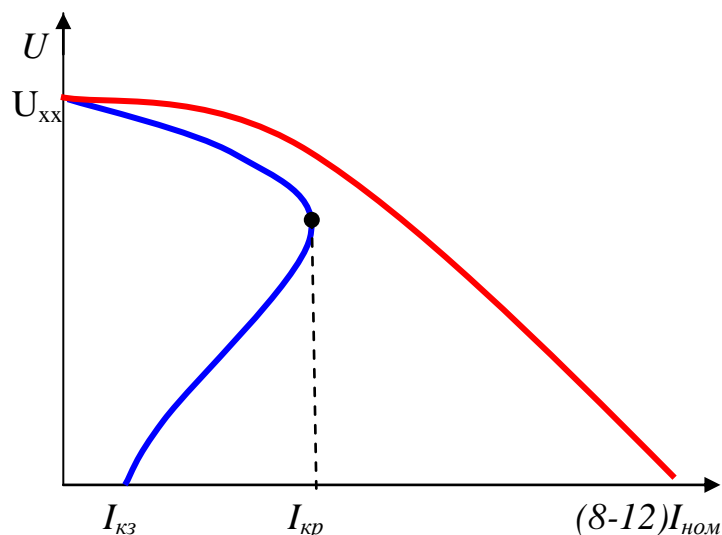


Рисунок 6.6 – Внешняя характеристика генератора параллельно возбуждения

Короткое замыкание, вызванное постепенным уменьшением сопротивления нагрузки, не опасно, но при внезапном коротком замыкании магнитная система не успевает размагнититься и ток $I_{кз}$ достигает опасных для машины значений $I_{кз} = (8-12) I_{ном}$.

При таком резком возрастании тока нагрузки на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появляется сильное искрение, переходящее в круговой огонь. Поэтому необходимо защищать генератор от перегрузки и коротких замыканий посредством плавких предохранителей или же применением релейной защиты.

Генератор смешанного возбуждения имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения. Поток возбуждения создается в основном параллельной обмоткой. Последовательная обмотка обычно включается согласно параллельной (чтобы МДС обмоток складывалась), что обеспечивает получение жесткой внешней характеристики генератора (рисунок 6.7).

В режиме холостого хода генератор имеет только параллельное возбуждение, так как $I_n = 0$. С появлением нагрузки возникает МДС последовательной обмотки возбуждения, которая, подмагничивая машину, компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в якоре. Реакция якоря – влияние МДС статора на МДС ротора. Внешняя характеристика в этом случае наиболее жесткая (рисунок 6.7, кривая 2).

Если необходимо иметь неизменным напряжение на зажимах потребителя, то число витков в последовательной обмотке увеличивают, чтобы МДС компенсировала падение напряжения у потребителя (кривая 1).

При встречном включении обмоток возбуждения напряжение генератора с ростом нагрузки уменьшается (кривая 3), что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки. Такое включение применяют только в генераторах специального назначения (в сварочных генераторах).

Генератор смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения применяют для питания силовой нагрузки, когда требуется постоянство напряжения.

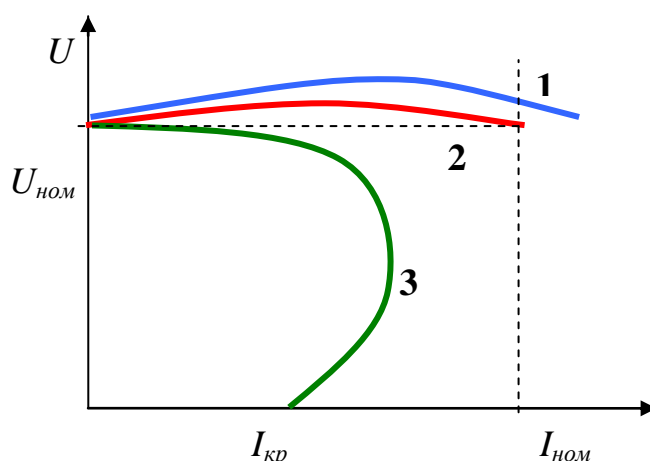


Рисунок 6.7 – Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения

6.6 Механическая и рабочая характеристики

Механическая характеристика двигателя постоянного тока – зависимость установившейся угловой скорости от момента на валу двигателя при постоянном напряжении и сопротивлении цепи якоря. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения двигателя механическая характеристика имеет вид, указанный на рисунке 6.8. Из рисунка видно, что при изменении момента M от нуля до номинального значения частота вращения меняется незначительно в пределах (3...8)%. Такая характеристика (1) называется жесткой. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения имеет вид, похожий на гиперболу (3) и называется мягкой. В двигателе смешанного возбуждения имеются две обмотки, одна из которых включается параллельно обмотке якоря, а другая – последовательно с ней. Доля каждой обмотки в создании суммарного магнитного потока машины может быть различной.

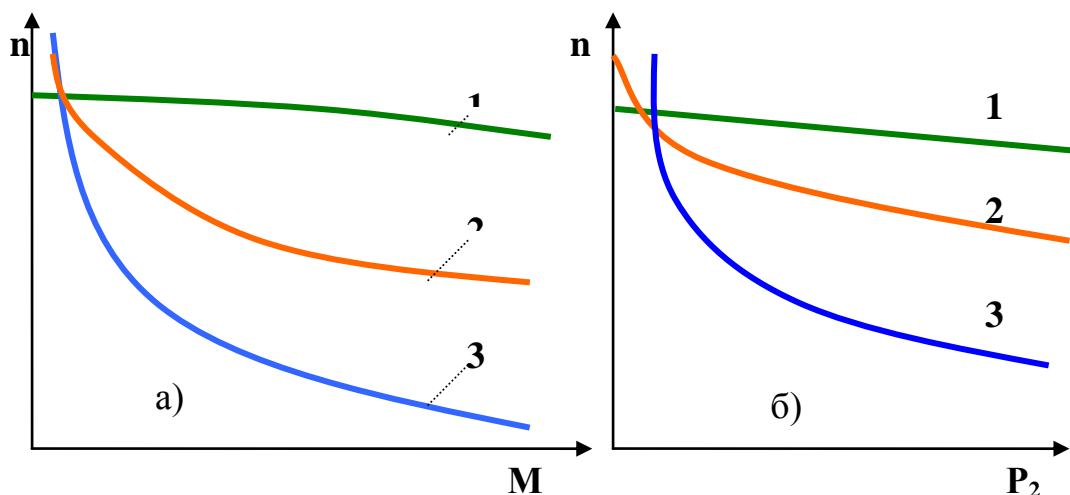


Рисунок 6.8 – Механические (а) и рабочие (б) характеристики двигателя:
 1 – параллельного; 2 – смешанного; 3 – последовательного возбуждений

При согласном включении, когда параллельная и последовательная обмотки возбуждения создают потоки, совпадающие по направлению, двигатель смешанного возбуждения имеет характеристики, занимающие промежуточное положение между характеристиками параллельного и последовательного возбуждения. Встречное включение обмоток возбуждения применяют редко, так как в этом случае при пуске двигателя резко уменьшается пусковой момент из-за снижения магнитного потока. Обычно при пуске таких двигателей последовательную обмотку возбуждения закорачивают и она не участвует в создании магнитного потока. В рабочем режиме такой двигатель может иметь абсолютно жесткую внешнюю характеристику.

Рабочие характеристики двигателя – это зависимости частоты вращения n , вращающего момента M , тока якоря I_a , потребляемой мощности P_1 и η от мощности на валу двигателя (P_2) при $U=const$ и $I_e=const$. На рисунке 6.8 б представлена зависимость $n=f(P_2)$.

6.7 Двигатели постоянного тока

Схемы возбуждения двигателей аналогичны рассмотренным для генераторов в силу обратимости машины. Наиболее распространены двигатели с последовательным и параллельным возбуждением, а двигатели со смешанным возбуждением по своим свойствам являются промежуточным между двигателями с параллельным и последовательным возбуждениями.

Двигатели с последовательным возбуждением применяются в устройствах, требующих пуска под нагрузкой, и не создают бросков тока в питающей сети по сравнению с двигателями параллельного возбуждения.

Пуск в ход двигателя постоянного тока

В момент пуска двигателя ток якоря велик и для его ограничения последовательно с обмоткой якоря вводится дополнительное сопротивление, называемое пусковым реостатом, сопротивление которого подбирают так, чтобы пусковой ток превышал номинальный только в 1,5 раза.

Различают три способа пуска двигателей постоянного тока: а) прямой пуск, при котором цепь якоря включается на полное напряжение, что возможно только у двигателей малой мощности; б) пуск с помощью пускового реостата; в) пуск при пониженном напряжении от источника с регулируемым напряжением.

6.8 Потери и КПД машин постоянного тока

При работе генератора (или двигателя) постоянного тока полезная (выходная) мощность, отдаваемая машиной, всегда меньше подводимой от первичного двигателя (или сети) за счет наличия нескольких видов потерь мощности.

Электрические потери возникают в обмотке якоря, в обмотке возбуждения, обмотке добавочных полюсов и в щеточном контакте.

Потери в стали складываются из потерь на перемагничивание (гистерезис) и вихревые токи в стальном сердечнике якоря при его вращении в постоянном магнитном поле.

Механические потери обусловлены потерями на трение в подшипниках, щеток о коллектор, потерями на вентиляцию и составляют от (1...4)%.

Добавочные потери обусловлены потерями в стали полюсных наконечников от пульсации магнитного потока при вращении зубчатого якоря, и составляют 1% от отдаваемой мощности для генераторов и 1% от потребляемой мощности для двигателей. КПД машины определяется отношением полезной мощности P_2 к потребляемой мощности P_1 и составляется: для генераторов

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum \Delta P}, \quad (6.2)$$

где UI – мощность, отдаваемая потребителю; $\sum \Delta P$ – суммарные потери.
Для двигателей

$$\eta_{\text{д}} = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{UI}, \quad (6.3)$$

где UI – мощность, потребляемая двигателем от сети.

КПД машины постоянного тока зависит от нагрузки (рисунок 6.9) и при номинальной мощности составляет от 75 до 95%.

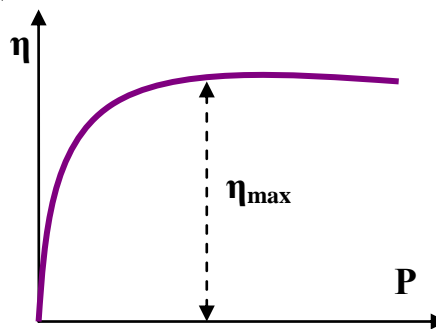


Рисунок 6.9 – Зависимость КПД машины постоянного тока от нагрузки

Вопросы для самоконтроля

- 1) Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.
- 2) Устройство коллекторной машины постоянного тока.
- 3) Причины, вызывающие искрение на коллекторе.
- 4) Способы возбуждения машин постоянного тока.
- 5) Основные характеристики генераторов постоянного тока.
Что такое механическая и рабочая характеристики?

ЛЕКЦИЯ 7. АСИНХРОННЫЕ И СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Цель лекции: Ознакомление с устройством, принципом действия, режимами работы и основными характеристиками асинхронных и синхронных машин.

7.1. Устройство асинхронных машин

Асинхронные машины являются самым распространенным видом бесколлекторных электрических машин переменного тока. Асинхронная машина – машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле статора, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор вращаются с разными скоростями.

Преобладающее применение имеют **асинхронные двигатели**, составляющие основу современного электропривода: привод устройств автоматики, бытовые электроприборы, привод крупного горного оборудования.

Асинхронные двигатели могут быть как однофазными, так и трехфазными. Кроме асинхронных двигателей, преобразующих электрическую энергию переменного тока в механическую энергию, имеются асинхронные машины, выполняющие функции **преобразователя частоты, регулятора напряжения и фазорегулятора**.

Асинхронный двигатель состоит из двух частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного **статора** и вращающегося **ротора**. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. Обмотка статора включается в сеть и является первичной, а обмотка ротора – вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками. По конструкции асинхронные двигатели разделяются на двигатели: **с короткозамкнутым ротором** и **двигатели с фазным ротором**.

Двигатели **трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**, (рисунок 7.1) имеют наиболее широкое применение. **Статор** состоит из корпуса и сердечника с трехфазной обмоткой. Каждая фазная обмотка состоит из одной или нескольких катушечных групп, которые располагаются по окружности статора на одинаковом расстоянии друг от друга. Фазные обмотки соединяются треугольником или звездой и подключаются к трехфазной сети. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава или из чугуна. Поверхность корпуса имеет продольные ребра для охлаждения двигателя. В корпусе расположен сердечник статора, имеющий шихтованную конструкцию: отштампованные листы из тонколистовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм покрыты слоем изоляционного лака, собраны в пакет и скреплены скобами или сварными швами. Такая конструкция уменьшает вихревые токи, возникающие в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора, соединенные лобовыми частями.

В расточке статора расположен **ротор**, состоящий из вала и сердечника с обмоткой, представляющей собой алюминиевые или медные стержни, расположенные в пазах сердечника ротора и замкнутые с двух сторон короткозамыкающими кольцами. Сердечник ротора также имеет шихтованную конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, а имеют на своей поверхности тонкую пленку окисла.

Другая разновидность трехфазных асинхронных двигателей – **двигатели с фазным ротором** – конструктивно отличается устройством ротора, который имеет более сложную конструкцию. На валу ротора закреплен шихтованный сердечник с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоединяют к трем контактными кольцам, на которые накладывают по две щетки, располагаемые в щеткодержателях на валу. Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами.

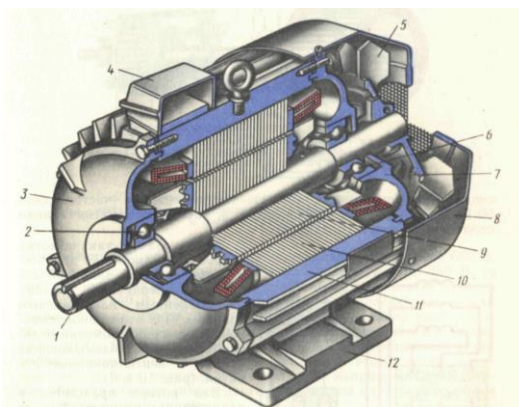


Рисунок 7.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором: 1 – вал; 2, 6 – подшипники; 3, 7 – подшипниковые щиты; 4 –коробка выводов; 5, 8 – вентилятор и его кожух; 9 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 10 – сердечник статора с обмоткой; 11– корпус; 12 – лапы

7.2 Режимы работы асинхронной машины

Характерной особенностью асинхронной машины является неравенство частот вращения магнитного поля статора n_1 и ротора n_2 , так, как только в этом случае вращающееся магнитное поле наводит в обмотке ротора ЭДС и на роторе возникает электромагнитный момент.

В соответствии с принципом обратимости асинхронные машины могут работать в двигательном, генераторном режимах и режиме электромагнитного торможения.

Двигательный режим. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой ротора, наводит в ней ЭДС. При этом в стержнях обмотки ротора появляются токи.

В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем на роторе возникают электромагнитные силы. Эти силы создают электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор приходит во вращение с частотой

$$n_2 < n_1, \quad (7.1)$$

где n_1 – частота вращающегося поля статора; n_2 – частота вращения ротора.

Если вал асинхронного двигателя механически соединить с валом какого-либо механизма, то вращающий момент двигателя M , преодолев противодействующий момент, приведет его во вращение. Таким образом, **электрическая мощность P_1** поступающая из сети, преобразуется в **механическую мощность P_2** и передается исполнительному механизму.

Важным параметром является **скольжение** – величина, характеризующая разность частот вращения ротора и вращающегося поля статора:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (7.2)$$

Скольжение выражают в долях единицы или в процентах.

При включении асинхронного двигателя в сеть в начальный момент времени ротор под влиянием сил инерции неподвижен ($n_2=0$) и скольжение при этом равно единице. В режиме холостого хода ротор вращается с частотой немного меньшей синхронной частоты вращения ($n_2 \approx n_1$) и скольжение практически не отличается от нуля. С увеличением нагрузочного момента на валу асинхронного двигателя частота вращения ротора n_2 уменьшается. То есть скольжение асинхронного двигателя зависит от механической нагрузки и может изменяться в диапазоне $0 < s \leq 1$. Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют номинальным скольжением $s_{ном}$. Для двигателей общего назначения $s_{ном} = 1 \div 8 \%$, при этом для двигателей большой мощности $s_{ном} = 1 \%$, а для двигателей малой мощности $s_{ном} = 8 \%$.

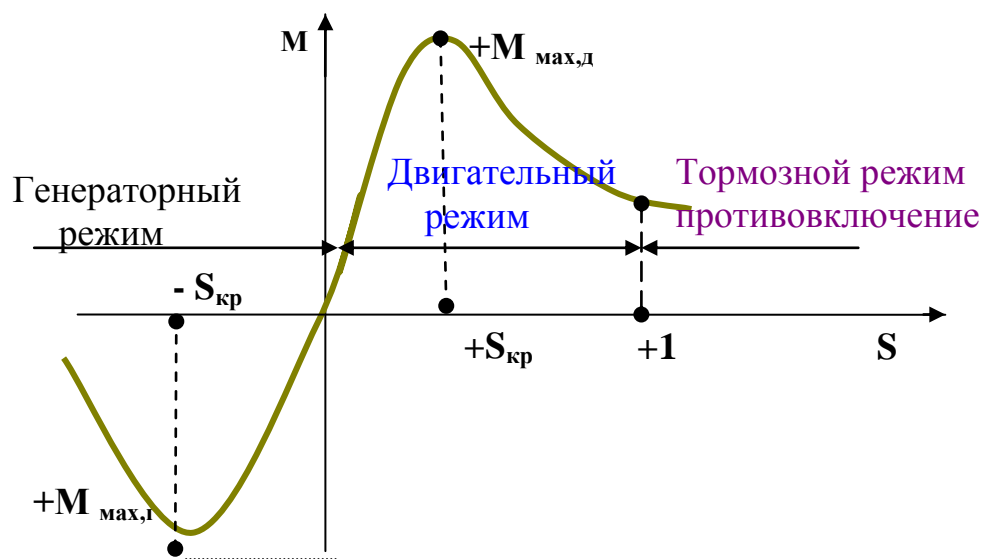


Рисунок 7.2 – Режимы работы асинхронной машины

Генераторный режим. Если обмотку статора включить в сеть, а ротор асинхронной машины приводным двигателем вращать в направлении вращения магнитного поля статора с частотой $n_2 > n_1$, то скольжение станет отрицательным, а ЭДС в обмотке ротора изменит свое направление. Электромагнитный момент на роторе также изменит свое направление, т. е. будет направлен встречно вращающемуся магнитному полю статора. В этом случае механическая мощность приводного двигателя будет преобразована в электрическую мощность P_2 .

Особенность асинхронного генератора в том, что вращающееся магнитное поле в нем создается реактивной мощностью Q трехфазной сети, в которую включен генератор и куда он отдает вырабатываемую активную мощность P_2 . Следовательно, для работы асинхронного генератора необходим источник переменного тока, при подключении к которому происходит возбуждение генератора (возбуждается вращающееся магнитное поле).

Режим торможения противовключением. Если у работающего трехфазного асинхронного двигателя поменять местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов, то вращающееся поле статора изменит направление вращения на обратное. Но ротор асинхронной машины под действием сил инерции будет продолжать вращение в прежнем направлении, т. е. ротор и поле статора асинхронной машины будет вращаться в противоположных направлениях. Электромагнитный момент машины будет оказывать на ротор тормозящее действие.

7.3 Потери и КПД асинхронного двигателя

Преобразование электрической энергии в механическую в двигателе связано с потерями энергии, поэтому полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше потребляемой мощности P_1 на величину потерь

$$P_2 = P_1 - \Sigma P \quad (7.3)$$

Потери разделяются на основные и добавочные. Основные потери включают в себя **магнитные, электрические и механические.**

Магнитные потери P_M в асинхронном двигателе вызваны потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи, происходящими в сердечнике ротора и статора при его перемагничивании. Величина магнитных потерь пропорциональна частоте перемагничивания

$$P_M = f^\beta, \quad \beta = 1,3 \div 1,5. \quad (7.4)$$

Частота перемагничивания сердечника статора равна $f = 50$ Гц, соответственно, магнитные потери в сердечнике статора значительны, а частота перемагничивания сердечника ротора

при номинальном скольжении составляет $f=50 \cdot s = (2...4)Гц$ и магнитные потери в сердечнике ротора малы, которые на практике не учитывают.

Электрические потери вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами:

$$P_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 r_1 \text{ и } P_{\varepsilon 2} = m_2 I_2^2 r_2, \quad (7.5)$$

где r_1 и r_2 – сопротивления обмоток фаз статора и ротора; m – число фаз.

В асинхронных двигателях с фазным ротором дополнительно имеются электрические потери в щеточном контакте.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию. Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора

$$P_{МЕХ} \equiv n_2^2 \quad (7.6)$$

В двигателях с фазным ротором механические потери происходят еще и за счет трения между щетками и контактными кольцами ротора.

Добавочные потери включают в себя все виды трудноучитываемых потерь, вызванных пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. В соответствии с ГОСТом добавочные потери асинхронных двигателей принимают равными 0,5% от подводимой к двигателю мощности P_1 .

Таким образом, часть подводимой к двигателю мощности затрачивается в статоре на магнитные P_M и электрические потери $P_{\varepsilon 1}$. Оставшаяся электромагнитная мощность $P_{ЭМ}$ передается на ротор, где расходуется на электрические потери $P_{\varepsilon 2}$ и преобразуется в полную механическую мощность. Часть этой мощности идет на покрытие механических и добавочных потерь, а оставшаяся мощность P_2 – полезная мощность двигателя.

Электрические потери в обмотках являются переменными потерями, так как их величина зависит от нагрузки двигателя, то есть от значений токов в обмотках статора и ротора. Переменными являются и добавочные потери. Магнитные и механические потери практически не зависят от нагрузки.

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя определяется

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} * 100\% \quad (7.7)$$

С изменениями нагрузки КПД меняет свою величину: в режиме холостого хода КПД равен нулю, а с ростом нагрузки КПД увеличивается, достигая максимума при нагрузке равной $(0,7 \div 0,8)P_{ном}$.

КПД трехфазных асинхронных двигателей общего назначения при номинальной нагрузке составляет: для двигателей мощностью от 1 до 10 кВт $\eta = 75 \div 88 \%$, а для двигателей мощностью более 10 кВт $\eta = 90 \div 94 \%$.

Коэффициент полезного действия один из основных параметров асинхронного двигателя, который определяет его энергетические свойства — экономичность в процессе эксплуатации. Кроме того, КПД двигателя, а точнее величина потерь в нем, регламентирует температуру нагрева его основных частей и в первую очередь обмотки статора. По этой причине двигатели с низким КПД (при одинаковых условиях охлаждения) работают при более высокой температуре нагрева обмотки статора, что ведет к снижению их надежности и долговечности.

7.4 Электромагнитный момент и механическая характеристика асинхронного двигателя

Электромагнитный момент создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный момент M пропорционален электромагнитной мощности и определяется по формуле

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\omega_0}, \text{ а } \omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}, \quad (7.8)$$

– угловая синхронная скорость вращения.

Зависимость момента от скольжения – **механическая характеристика** асинхронной машины. Механическая характеристика имеет максимум.

На рисунке 7.2 показана механическая характеристика асинхронной машины, где указаны зоны, соответствующие различным режимам работы:

Для анализа работы асинхронного двигателя удобнее воспользоваться механической характеристикой $M = f(s)$, представленной на рисунке 7.3.

При включении двигателя в электрическую сеть, магнитное поле статора, не обладая инерцией, сразу же начинает вращение с синхронной частотой n_1 , в то же время ротор двигателя под влиянием сил инерции в начальный момент пуска остается неподвижным ($n_2 = 0$) и скольжение $s = 1$.

Выражение пускового момента асинхронного двигателя:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{3 \cdot R_2 \cdot I_{2\text{пуск}}^2}{\omega_0}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (7.9)$$

Под действием этого момента начинается вращение ротора двигателя, при этом скольжение уменьшается, а вращающий момент возрастает в соответствии с характеристикой $M = f(s)$. При критическом скольжении $s_{кр}$ момент достигает максимального значения M_{max} . С дальнейшим нарастанием частоты вращения момент M начинает убывать, пока не достигнет установившегося значения.

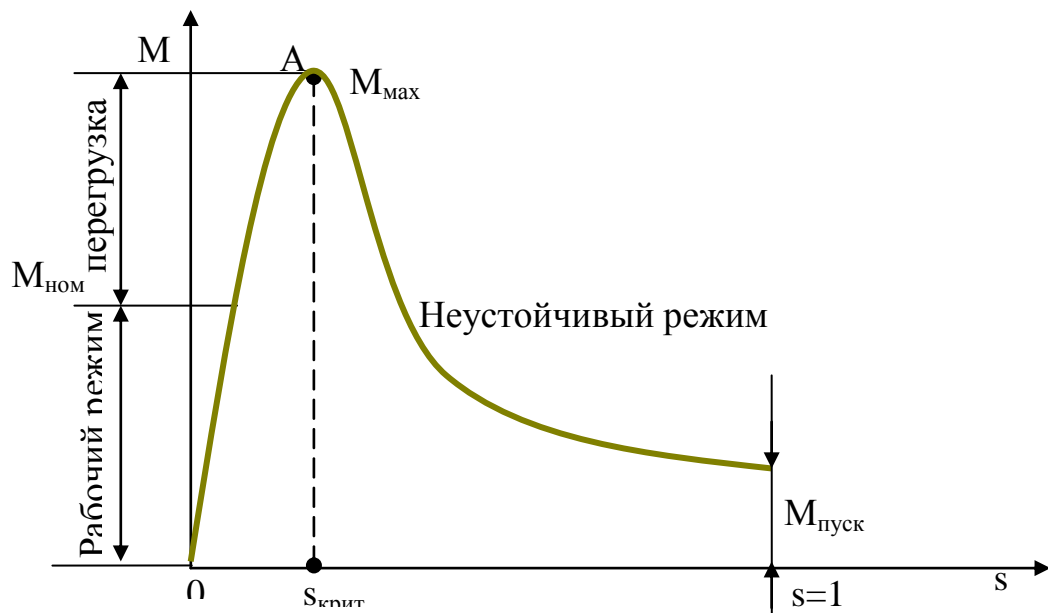


Рисунок 7.3 – Зависимость электромагнитного момента АД от скольжения

Из анализа механической характеристики следует, что **устойчивая работа** асинхронного двигателя возможна при скольжениях меньше критического ($s < s_{кр}$), то есть на участке ОА механической характеристики. Работа асинхронного двигателя становится **неустойчивой** при скольжениях $s \geq s_{кр}$. Так, если электромагнитный момент двигателя $M=M_{\text{max}}$, а скольжение $s=s_{кр}$, то даже незначительное увеличение

нагрузочного момента, вызвав увеличение скольжения s приведет к уменьшению момента M . За этим последует дальнейшее увеличение скольжения до $s = 1$, то есть пока ротор не остановится. При достижении электромагнитным моментом максимального значения наступает **предел устойчивой работы** асинхронного двигателя.

Для надёжной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы он обладал перегрузочной способностью. Перегрузочная способность определяется отношением максимального момента M_{\max} к номинальному моменту $M_{\text{ном}}$ и составляет для двигателей общего назначения

$$\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 1,7 \div 2,5 \quad (7.10)$$

Работа двигателя при скольжении $s < s_{\text{кр}}$, т. е. на рабочем участке механической характеристики, является наиболее экономичной, так как она соответствует малым значениям скольжения, а, следовательно, меньшим значениям электрических потерь в обмотке ротора.

7.5 Пуск асинхронных двигателей

Пуск асинхронного двигателя сопровождается переходным процессом, обусловленным переходом ротора, и механически связанных с ним частей исполнительного механизма, из состояния покоя в состояние равномерного вращения, когда вращающий момент двигателя уравнивается суммой противодействующих моментов, действующих на ротор двигателя.

Пусковые свойства двигателя определяются значениями пускового тока I_n пускового момента M_n .

Двигатель, обладающий хорошими пусковыми свойствами, развивает значительный пусковой момент при сравнительно небольшом пусковом токе. Однако получение такого сочетания пусковых параметров в асинхронном двигателе сопряжено с определенными трудностями, а иногда оказывается невозможным. Пусковой ток может превышать номинальный в 5-7 раз, что неблагоприятно влияет на работу как самого двигателя, так и других потребителей за счет снижения напряжения сети, что уменьшает пусковой момент и увеличивает время пуска. Для улучшения пусковых свойств необходимо предпринять меры для увеличения пускового момента с одновременным ограничением пускового тока.

Различают несколько способов пуска асинхронных двигателей:

1. Прямой пуск – прямым включением в сеть на полное номинальное напряжение двигателя – применяется для большинства двигателей малой и средней мощности с короткозамкнутым ротором.

Этот способ пуска, отличаясь простотой, имеет существенный недостаток: в момент подключения двигателя к сети в обмотке статора возникает большой пусковой ток, в 5-7 раз превышающий номинальный ток двигателя. При небольшой инерционности исполнительного механизма частота вращения двигателя быстро достигает установившегося значения и пусковой ток спадает, не вызывая перегрева обмотки статора. Но такой значительный бросок тока в питающей сети может вызвать падение напряжения.

2. Пуск при пониженном напряжении – применяется для двигателей с короткозамкнутым ротором при отсутствии нагрузки на его валу. Для понижения напряжения при пуске обмотки статора переключают из схемы соединения «треугольник» на схему соединения «звезда», что приводит к уменьшению напряжения на обмотке в $\sqrt{3}$ раз. При этом пусковой ток и вращающий момент уменьшаются в три раза.

Универсальным является способ пуска понижением подводимого к двигателю напряжения посредством дросселей, а также пуск двигателя через автотрансформатор. В

последнем случае пусковой ток двигателя, измеренный на выходе автотрансформатора, уменьшается на коэффициент трансформации автотрансформатора.

3. **Пуск с помощью пускового реостата**, включенного в цепь ротора, применяется только для двигателей с фазным ротором. Трехфазный пусковой реостат, включенный по схеме «звезда» включают последовательно с обмоткой ротора через щетки и кольца, в результате сопротивление цепи ротора увеличивается, а пусковой ток уменьшается. Изменение сопротивления пускового реостата обеспечивает разгон двигателя при максимальных моментах, что важно при пуске двигателя под нагрузкой.

Недостатками пусковых свойств двигателей с фазным ротором являются сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции.

Кроме пусковых значений тока и момента пусковые свойства двигателей оцениваются еще и такими показателями: продолжительность и плавность пуска; сложность пусковой операции и экономичность (стоимость и надежность пусковой аппаратуры).

7.6 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рисунок 7.4) представляют собой зависимости: частоты вращения n_2 , КПД, полезного момента M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при постоянстве питающего напряжения $U_1 = const$ и частоты $f_1 = const$. При этом зависимость $n_2 = f(P_2)$ называется **скоростной характеристикой**.

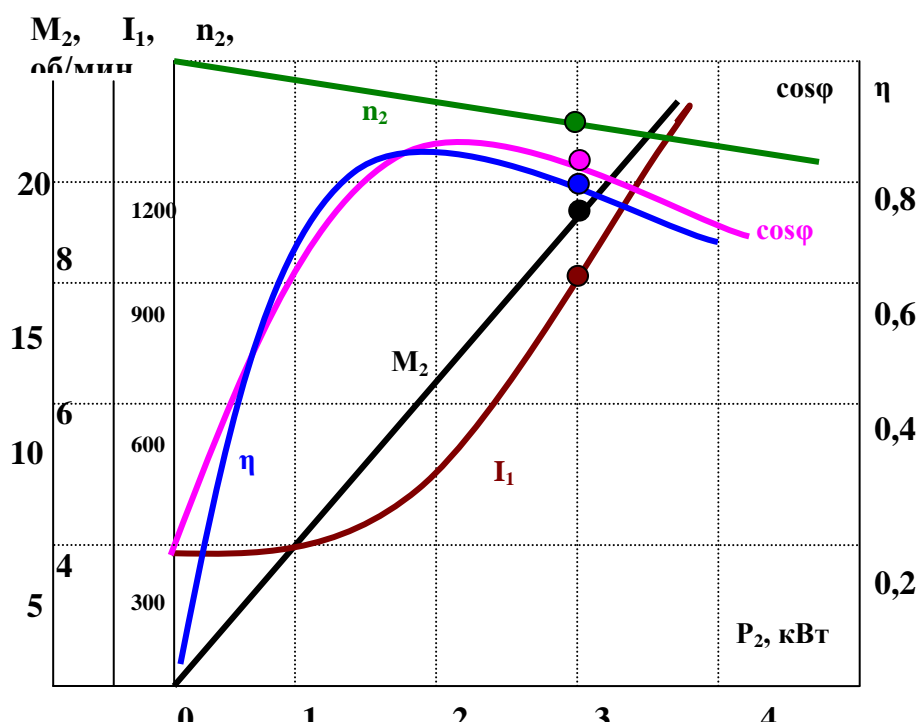


Рисунок 7.4 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод. **Метод непосредственной нагрузки** заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки. Этот метод применяется для двигателей мощностью не более 10—15 кВт. Универсальный **косвенный метод**, применение которого не ограничивается мощностью двигателя. Метод заключается в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронных двигателей аналогичны таким же опытам трансформаторов. Но имеют особенности, обусловленные наличием у двигателя вращающейся части – ротора.

7.7 Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Частоту вращения ротора асинхронного двигателя можно регулировать изменением скольжения, частоты тока или числа полюсов в обмотке статора.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения возможно изменением подводимого к обмотке статора напряжения или активного сопротивления обмотки ротора. Регулировка частоты вращения изменением скольжения происходит только в нагруженном двигателе.

Изменение подводимого напряжения. Увеличение подводимого к двигателю напряжения вызывает рост частоты вращения. Однако диапазон регулирования частоты вращения получается небольшим, так как с превышением номинального напряжения возникает опасность перегрева двигателя, вызванного резким увеличением электрических и магнитных потерь. А с уменьшением напряжения двигатель утрачивает перегрузочную способность, которая пропорциональна квадрату напряжения сети.

Подводимое к двигателю напряжение изменяют или регулировочным автотрансформатором или реакторами, включаемыми в разрыв линейных проводов.

Узкий диапазон регулирования и неэкономичность (необходимость в дополнительных устройствах) ограничивают область применения этого способа регулирования частоты вращения.

Изменение активного сопротивления в цепи ротора. Этот способ регулирования частоты вращения возможен только в двигателях с фазным ротором. Изменение активного сопротивления цепи ротора достигается включением в цепь ротора регулировочного реостата, подобного пусковому реостату, но рассчитанного на длительный режим работы.

В зависимости от конструкции регулировочного реостата этот способ регулирования частоты вращения может быть плавным или ступенчатым. Способ обеспечивает регулирование частоты вращения только в сторону уменьшения синхронной частоты вращения.

Изменение частоты тока в статоре. Этот способ регулирования, называемый «частотное регулирование», основан на изменении синхронной частоты вращения $n_1 = f_1 60/p$. Для осуществления этого способа регулирования необходим источник питания двигателя переменным током с регулируемой частотой, в качестве которого применяются электромашинные или полупроводниковые преобразователи частоты. Чтобы регулировать частоту вращения, достаточно изменить частоту тока f_1 , которая влияет на максимальный момент. Поэтому для сохранения перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя на требуемом уровне одновременно с изменением частоты f_1 необходимо изменять и напряжение питания.

Частотное регулирование двигателей позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне.

Изменение числа полюсов обмотки статора. Этот способ регулирования частоты вращения дает ступенчатую регулировку. Так, при $f_1 = 50 \text{ Гц}$ и $p = 1 \div 5$ пар полюсов можно получить следующие синхронные частоты вращения: 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/мин.

Изменять число полюсов в обмотке статора можно или укладкой на статоре двух обмоток с разным числом полюсов, или укладкой на статоре одной обмотки, конструкция которой позволяет путем переключения катушечных групп получать различное число полюсов. Последний способ получил наибольшее распространение.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов на статоре применяют исключительно в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, т. к.

число полюсов в обмотке этого ротора всегда равно числу полюсов статора и для изменения частоты вращения достаточно изменить число полюсов в обмотке статора.

7.8 Устройство синхронной машины

Для синхронных машин характерно, что ротор в установившемся режиме вращается с угловой скоростью вращающегося магнитного поля, создаваемого токами в фазных обмотках статора. Это достигается тем, что ротор синхронной машины представляет собой электромагнит с числом пар полюсов, равным числу пар полюсов вращающегося магнитного поля. Взаимодействие вращающегося магнитного поля и полюсов ротора обеспечивает постоянную угловую скорость последнего независимо от момента на валу. Это свойство позволяет использовать синхронные машины в качестве двигателей для привода механизмов с постоянной угловой скоростью. Распространенность синхронных двигателей не так широка, как асинхронных, но, например, в металлургии, их использование становится необходимым. Единичная мощность синхронного двигателя в приводах большой мощности достигает нескольких десятков мегаватт. Основной областью применения синхронных машин является использование в качестве промышленных генераторов для выработки электрической энергии на электростанциях. Единичная мощность современных электрогенераторов достигает 1500 МВА.

Основными частями синхронной машины являются статор и ротор, причем **статор** не отличается от статора асинхронной машины. Обмотка статора обычно соединяется звездой. **Ротор** имеет обмотку возбуждения, которая через контактные кольца и щетки питается постоянным током от возбудителя или от сети переменного тока через выпрямитель. Возбудитель – генератор постоянного тока, установленный на валу ротора.

Принцип действия генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Приводным двигателем ротор приводится во вращение с частотой n_1 . При вращении ротора, запитанного от возбудителя, магнитный поток тоже вращается и пересекает обмотки статора, в которых индуцируется симметричная трехфазная система ЭДС.

Ротор должен вращаться с частотой вращения поля, следовательно, его синхронная частота вращения равна

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{p} [\text{об} / \text{мин}] \quad (7.11)$$

Частота переменного тока стандартизирована, поэтому для ее получения необходимо обеспечить постоянную, независимую от нагрузки скорость вращения. С этой целью первичные двигатели на электрических станциях оборудуются автоматическими регуляторами скорости.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: **явнополюсную и неявнополюсную** (рисунок 7.5).

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: **паровые турбины; гидравлические турбины и двигатели внутреннего сгорания (дизели).**

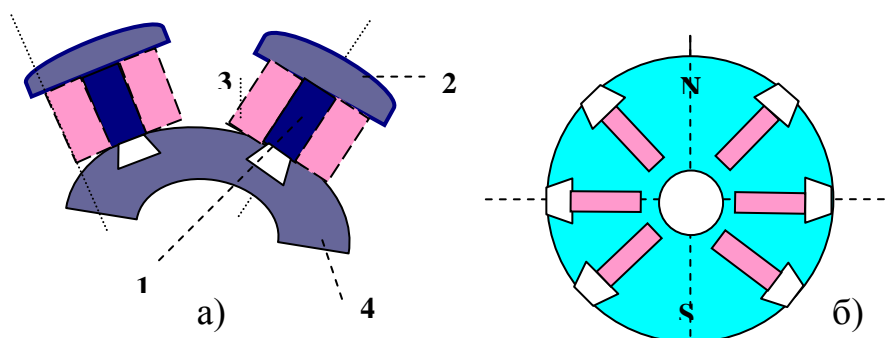


Рисунок 7.5– Конструкция роторов синхронных машин:
а) явнополюсный; б) неявнополюсный

Если приводным двигателем является **гидравлическая турбина**, то синхронный генератор называют **гидрогенератором**. Гидравлическая турбина вращается медленно (60 об/мин) и роторы гидрогенераторов выполняют многополюсными с явнополюсной конструкцией.

Паровая турбина работает при частоте вращения (1500-3000) об/мин, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый **турбогенератором**, является быстроходной синхронной машиной. Роторы этих генераторов выполняют двухполюсными или четырехполюсными. В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы, поэтому по условиям механической прочности применяют **неявнополюсный ротор**. Сердечник неявнополюсного ротора изготовляют в виде цельной стальной поковки или же делают сборным. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает 2/3 его поверхности, а 1/3 поверхности – полюсы.

Дизель-генераторы работают с частотой вращения 600-1500 об/мин и выполняются с явнополюсным ротором. Используются в сельском хозяйстве, на транспорте в качестве основного, резервного и аварийного источника электрической энергии.

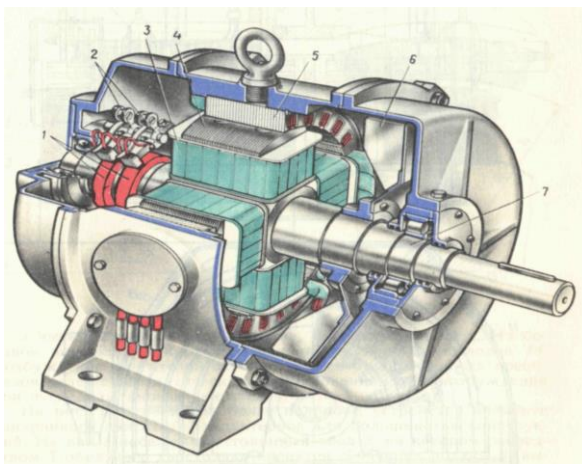


Рисунок 7.6 – Синхронный генератор (дизель-генератор):
1 – контактные кольца; 2- щеткодержатели; 3- полюсная катушка ротора;
4- полюсный наконечник; 5- сердечник статора; 6- вентилятор; 7- вал

Большую группу синхронных машин составляют **синхронные двигатели**, которые обычно изготовляются мощностью до нескольких тысяч киловатт и предназначены для привода мощных вентиляторов, мельниц, насосов и других устройств, не требующих регулирования частоты вращения. Синхронные двигатели конструктивно не отличаются от синхронных генераторов.

7.9 Возбуждение синхронных машин

Независимо от режима работы любая синхронная машина нуждается в процессе **возбуждения** – наведения в ней магнитного поля.

Основным способом возбуждения синхронных машин является **электромагнитное возбуждение**, которое состоит в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения. С помощью приводного двигателя ротор генератора приводится во вращение. При прохождении по обмотке постоянного тока возникает МДС возбуждения, которая наводит в магнитной системе машины магнитное поле. Магнитное поле ротора, вращаясь и сцепляясь с обмоткой статора, наводит в ней ЭДС. Существуют два способа электромагнитного возбуждения: **контактный** и **бесконтактный**. Контактный способ возбуждения состоит в том, что для питания обмотки возбуждения применялись специальные генераторы постоянного тока, называемые возбудителями. При этом ток в обмотку возбуждения поступает через контактные кольца и щетки. В генераторах с **бесконтактной системой** электромагнитного возбуждения генератор не имеет контактных колец. В качестве возбудителя применяют генератор переменного тока, у которого обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения – на статоре. В результате обе обмотки оказываются вращающимися, и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток. На выходе обмотки якоря включают полупроводниковый преобразователь, т. к. обмотку возбуждения нужно питать постоянным током.

В синхронных генераторах получил распространение принцип **самовозбуждения**, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора через понижающий трансформатор и посредством выпрямительного полупроводникового преобразователя преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины.

В современных синхронных двигателях для возбуждения применяют тиристорные возбудительные устройства, включаемые в сеть переменного тока и осуществляющие автоматическое управление током возбуждения во всевозможных режимах работы двигателя, в том числе и переходных. Такой способ возбуждения является наиболее надежным и экономичным.

В синхронных машинах малой мощности применяется принцип **возбуждения постоянными магнитами**, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ позволяет избавиться от обмотки возбуждения, что делает конструкцию машины проще, экономичнее и надежнее. Но из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов применение данного возбуждения ограничено машинами малой мощности.

7.10 Параллельная работа синхронных генераторов

На электрических станциях обычно устанавливают несколько синхронных генераторов, включенных параллельно для совместной работы. Применение нескольких генераторов вместо одного суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного электроснабжения в случае аварии или отключения одного для ремонта.

При включении синхронного генератора в сеть на параллельную работу необходимо соблюдать следующие условия: ЭДС генератора E_0 в момент подключения его к сети должна быть равной и противоположной по фазе напряжению сети $\dot{E}_0 = -\dot{U}_C$; частота ЭДС генератора должна быть равной частоте напряжения сети $f_G = f_C$ и порядок следования фаз на выводах генератора должен быть таким же, что и на зажимах сети.

Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее всем указанным условиям, называют **синхронизацией**. Несоблюдение условий приводит к появлению в обмотке статора уравнивающих токов, высокое значение которых может привести к аварии. Включить генератор в сеть с параллельно работающими генераторами можно способами **точной синхронизации** или **самосинхронизации**.

Суть способа **точной синхронизации** в том, что перед включением генератора в сеть, его приводят в состояние, удовлетворяющее всем перечисленным условиям. Момент соблюдения этих условий (момент синхронизации) определяют прибором, который называется **синхроскопом**. По конструкции синхроскопы делятся на **ламповые** и **стрелочные**. При включении ламп момент синхронизации будет соответствовать одновременному погасанию всех ламп. В этот момент и следует замкнуть рубильник, подключающий генератор к сети.

При **самосинхронизации** ротор невозбужденного генератора приводят во вращение первичным двигателем до частоты вращения, отличающейся от синхронной частоты не более чем на 2-5%. Затем генератор подключают к сети. В момент подключения генератора к сети в обмотке статора возникает бросок тока, величина которого превышает номинальное значение. Следующим этапом подключают обмотку возбуждения к источнику постоянного тока и синхронный генератор под действием электромагнитного момента, действующего в его роторе, **втягивается в синхронизм**, то есть частота вращения ротора становится синхронной. При этом ток на статоре быстро уменьшается. Способом самосинхронизации включают на параллельную работу синхронные генераторы мощностью до 500 МВт.

7.11 Потери и КПД синхронных машин

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии. Все виды потерь в синхронной машине разделяются на основные и добавочные. Основные потери слагаются, в свою очередь, из **электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, магнитных и механических потерь**.

Электрические потери в обмотке статора определяются

$$P_{\Sigma} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (7.12)$$

где r_1 – активное сопротивление одной фазы обмотки статора.

Потери на возбуждение зависят от типа возбудителя и определяются как:

$$P_B = I_b^2 r_b + \Delta U_{щ} I_b, \quad (7.13)$$

где $\Delta U_{щ} = 2$ В – падение напряжения в щеточном контакте.

Магнитные потери происходят в сердечнике статора, который подвергается перемагничиванию вращающимся магнитным полем. Эти потери состоят из потерь на гистерезис и потерь от вихревых токов:

$$P_M = P_{\Gamma} + P_{B.T.} \quad (7.14)$$

Механические потери равны сумме потерь на трение в подшипниках и вентиляцию.

Добавочные потери в синхронных машинах делятся на два вида: пульсационные потери в полюсных наконечниках ротора и потери при нагрузке. Добавочные **пульсационные** потери P_n в полюсных наконечниках вызваны пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости внутренней поверхности статора. Добавочные **потери при нагрузке** $P_{доб}$ определяются в процентах ($\approx 0,5\%$) от подводимой мощности двигателей или от полезной мощности генераторов.

Суммарные потери в синхронной машине

$$\sum P = (P_{\Sigma 1} + P_B + P_{M1} + P_{\Pi} + P_{мех} + P_{доб}). \quad (7.15)$$

Коэффициент полезного действия для синхронного генератора

$$\eta_g = 1 - \frac{\sum P}{(P_{ном} + \sum P)}, \quad (7.16)$$

где $P_{ном}$ – активная мощность, отбираемая от генератора при его номинальной нагрузке.

Коэффициент полезного действия для синхронного двигателя

$$\eta_d = 1 - \frac{\sum P}{P_{ном}}. \quad (7.17)$$

7.12 Пуск трехфазного синхронного двигателя

Если обмотка возбуждения неподвижного ротора синхронного двигателя подключена к источнику постоянного тока, то она создает основной магнитный поток, который определяет полярность полюсов ротора (рисунок 7.7). При включении обмотки статора его трехфазная система токов создает вращающийся магнитный поток, частота вращения которого определяется формулой 7.11. При числе пар полюсов $p=1$ и $f=50$ Гц частота вращения будет равна $n=3000$ об/мин. При такой частоте вращения каждую 0,01с меняется полярность статора по осевой линии неподвижного ротора, сила притяжения сменяется силой отталкивания, средний вращающий момент равен нулю и ротор не успеет тронуться с места. Отсутствие пускового момента является большим недостатком синхронных двигателей.

Основными способами пуска в ход синхронных двигателей являются **асинхронный пуск** и **пуск с помощью разгонного двигателя**.

Для осуществления **асинхронного пуска** на роторе синхронного двигателя располагают специальную пусковую обмотку, которая является короткозамкнутой. При подключении обмотки статора к сети создается вращающийся магнитный поток статора. Короткозамкнутая обмотка ротора в результате взаимодействия с вращающимся потоком статора создает асинхронный вращающийся момент, под действием которого ротор трогается с места и разгоняется до частоты вращения, близкой к синхронной частоте. После этого обмотку возбуждения переключают на источник постоянного тока, и полюсы ротора приобретают собственную полярность.

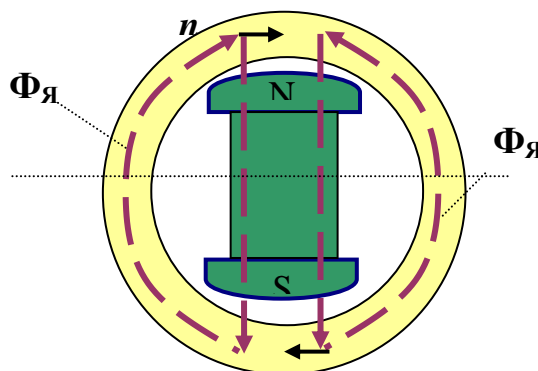


Рисунок 7.7 – Основной магнитный поток синхронного двигателя

При незначительном различии в частотах вращения полюсов статора и ротора разноименные полюсы притягиваются друг к другу, а одноименные – отталкиваются. В результате ротор получает ускорение и после нескольких качаний ротора его частота вращения достигает синхронной и двигатель «втягивается в синхронизм».

Пуск **с помощью разгонного двигателя** осуществляют только при холостом ходе двигателя. При этом его ротор приводят во вращение разгонным двигателем (асинхронным или постоянного тока). Мощность разгонного двигателя небольшая, необходимая для вращения ротора синхронного двигателя.

С помощью синхроскопа проверяют выполнение условий параллельной работы синхронных машин, и когда они выполнены, статор синхронного двигателя подключают к

сети. После этого разгонный двигатель отключают, а синхронный – вращается с синхронной частотой.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Устройство асинхронных машин.
- 2) Режимы работы асинхронной машины.
- 3) Потери и КПД асинхронного двигателя.
- 4) Пуск асинхронных двигателей.
- 5) Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.
- 6) Устройство синхронной машины.

ЛЕКЦИЯ 8. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель лекции: Ознакомление с основными полупроводниковыми элементами электронных устройств (диодами, транзисторами, тиристорами, интегральными микросхемами), индикаторными и фотоэлектрическими приборами: их устройством, назначением и областями применения.

8.1 Электронно-дырочный переход и его свойства

В полупроводниковых приборах используются специфические явления, происходящие на границе раздела между полупроводниками с различными типами проводимости, полупроводниками и диэлектриками, полупроводниками и металлами.

Электронно-дырочный переход – тонкий слой между двумя частями полупроводникового кристалла, в котором одна часть имеет **электронную**, а другая – **дырочную электропроводность**. Технологический процесс создания электронно-дырочного перехода может быть: сплавление, диффузия и эпитаксия. По конструкции электронно-дырочные переходы могут быть симметричными и несимметричными, резкими и плавными, плоскостными и точечными и др. Однако для всех типов переходов **основным свойством** является **несимметричная электропроводность**, при которой в одном направлении кристалл пропускает ток, а в другом – не пропускает.

Вольтамперная характеристика *p-n*-перехода (рисунок 8.1 в) представляет собой зависимость тока через переход при изменении на нем значения и полярности приложенного напряжения. Если приложенное напряжение снижает потенциальный барьер, то оно называется прямым, а если повышает его – обратным. Обратный ток в *p-n*-переходе вызывается неосновными носителями и является током проводимости, он остается постоянным при изменении обратного напряжения на переходе. При прямом смещении *p-n*-перехода полный ток равен разности диффузионного тока, обусловленного инжекцией основных носителей заряда и тока проводимости.

8.2 Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – прибор, который имеет два вывода и содержит один *p-n*-переход. Все полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: выпрямительные и специальные. **Выпрямительные** диоды предназначены для выпрямления переменного тока. В зависимости от частоты и формы переменного напряжения они делятся на высокочастотные, низкочастотные и импульсные. **Специальные** типы полупроводниковых диодов используют различные свойства *p-n*-переходов: явление пробоя, барьерную емкость, наличие участков с отрицательным сопротивлением и др.

Конструктивно **выпрямительные диоды** делятся на плоскостные и точечные, а по технологии изготовления на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные. **Плоскостные** диоды благодаря площади *p-n*-перехода используются для выпрямления больших токов. **Точечные** диоды имеют малую площадь перехода и, соответственно, предназначены для выпрямления малых токов. Для увеличения напряжения лавинного пробоя используются выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно включенных диодов. Выпрямительные диоды большой мощности называют **силовыми**. Материалом для таких диодов служит кремний или арсенид галлия, а германий не применяется из-за сильной температурной зависимости обратного тока.

Кремниевые сплавные диоды используются для выпрямления переменного тока с частотой до 5 кГц. Кремниевые диффузионные диоды могут работать на повышенной частоте до 100 кГц. Кремниевые эпитаксиальные диоды с металлической подложкой (барьером Шотки) могут использоваться на частотах до 500 кГц. Арсенидгаллиевые диоды способны работать в диапазоне частот до нескольких МГц.

Условное графическое обозначение полупроводникового диода приведено на рисунке 8.1, а, а его структура на рисунке 8.1, б. Электрод диода, подключенный к области P , называют **анодом**, а электрод, подключенный к области N , – **катодом**. Статическая вольтамперная характеристика диода показана на рисунке 8.1, в.

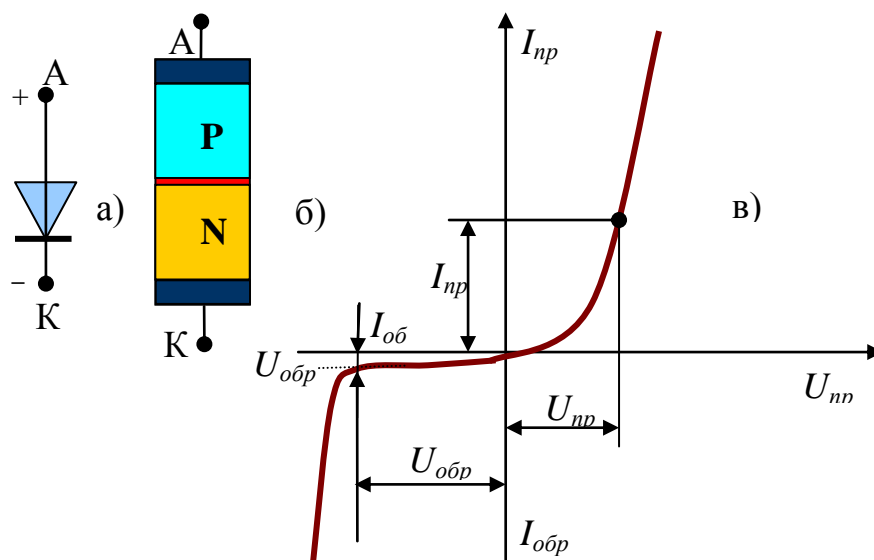


Рисунок 8.1 – Условное обозначение полупроводникового диода (а), его структура (б) и вольтамперная характеристика (в)

К областям P и N кристалла привариваются или припаиваются металлические выводы, и вся система заключается в металлический, металлокерамический, стеклянный или пластмассовый корпус.

Основные характеристики диода:

1. Предельно-допустимый прямой (выпрямленный) ток – максимальный ток, который может длительно протекать через диод.
2. Прямое падение напряжения – средняя величина падения напряжения на диоде, на который подается переменное напряжение.
3. Пороговое прямое напряжение – напряжение, при котором начинается резкое возрастание прямого тока через диод.
4. Обратный ток – это ток, проходящий через диод при обратном напряжении. В исправном диоде обратный ток во многом раз меньше прямого.
5. Напряжение пробоя диода – это предельное обратное напряжение, при котором резко возрастает обратный ток диода.

К **специальным полупроводниковым диодам** относятся приборы, в которых используются особые свойства $p-n$ -переходов: а) управляемая полупроводниковая емкость – **варикапы**; б) лавинный прибор – **стабилитроны**; в) туннельный эффект – **туннельные и обращенные диоды**; г) фотоэффект – **фотодиоды**; д) фотонная рекомбинация носителей – **светодиоды**; е) многослойные диоды – **динисторы**. Кроме перечисленных приборов, к диодам относят и некоторые типы приборов с тремя выводами, такие, как **тиристоры**.

Варикапы – полупроводниковые диоды, в которых используется барьерная емкость $p-n$ -перехода. Эта емкость зависит от приложенного к диоду обратного напряжения и с увеличением его уменьшается. В выпускаемых промышленностью варикапах значение емкости может изменяться от единиц до сотен пикофард. Варикапы находят применение в различных электронных схемах: модуляторах, перестраиваемых резонансных контурах, генераторах с электронной настройкой, параметрических усилителях и др.

Стабилитроны – полупроводниковые диоды, работающие в режиме лавинного пробоя. При обратном смещении полупроводникового диода возникает электрический лавинный пробой $p-n$ -перехода. В широком диапазоне изменения тока через диод напряжение на нем меняется незначительно, т. е. стабилитрон стабилизирует высокие напряжения ($U > 3В$). Для ограничения тока через стабилитрон последовательно с ним включают сопротивление. Если в режиме пробоя мощность, расходуемая в нем, не превышает предельно допустимую, то в таком режиме стабилитрон может работать неограниченно долго. Для стабилизации небольших значений напряжения ($U \leq 2В$) используют и прямое падение напряжения на диоде. Такие приборы называют **стабисторами**. В области прямого смещения $p-n$ -перехода напряжение на нем имеет значение $0,7...2 В$ и мало зависит от тока. Поэтому стабисторы стабилизируют напряжения в интегральных схемах.

Кроме стабилизации напряжения стабилитроны также используются для ограничения импульсов напряжения и в схемах защиты различных элементов от повышения напряжения на них.

Туннельные диоды основаны на эффекте, который заключается в туннельном прохождении тока через $p-n$ -переход. При этом ток начинает проходить через переход при напряжении, значительно меньшем контактной разности потенциалов. Достигается туннельный эффект созданием тонкого обедненного слоя $0,01 \text{ мкм}$ с напряженностью поля $7 \cdot 10^5 \text{ В/см}$. Туннельный диод благодаря наличию участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ используется в качестве ключевого тензодатчика (датчика механических напряжений и ускорений).

Обращенный диод – вырожденный туннельный диод. При использовании обращенного диода необходимо поменять местами анод и катод, так как меняются местами области выпрямления, что и обуславливает название диода – обращенный. При этом участок отрицательного сопротивления отсутствует. Обращенные диоды применяются для выпрямления на сверхвысоких частотах очень малых напряжений.

Фотодиод – диод с открытым $p-n$ -переходом. Световой поток, падающий на открытый $p-n$ -переход, приводит к появлению в одной из областей дополнительных неосновных зарядов, в результате чего увеличивается обратный ток. Поэтому фотодиод используют для преобразования светового излучения в электрический ток. Фотодиоды находят применение как приемники оптического излучения. Большинство фотодиодов работает в широком диапазоне длин волн как видимого, так и невидимого излучения.

Светоизлучающие диоды преобразуют электрическую энергию в световое излучение за счет рекомбинации электронов и дырок. В обычных диодах рекомбинация (объединение) электронов и дырок происходит с выделением тепла, т. е. без светового излучения (фононная рекомбинация). В светодиоде преобладает рекомбинация с излучением света, которая называется **фотонной**. Такое излучение бывает резонансным и лежит в узкой полосе частот. Излучение испускается через прозрачную пластину в корпусе диода.

По характеристике излучения выделены две группы: диоды с излучением в видимой области спектра, получившие название **светодиоды**; диоды с излучением в инфракрасной области спектра – **ИК-диоды**. Для изменения длины волны излучения можно менять материал, из которого изготовлен светодиод, или изменять ток. Для изготовления светодиодов используют фосфид галлия, арсенид галлия и фосфид-арсенид галлия. Светодиоды применяют в качестве световых индикаторов, а ИК-диоды – в качестве источников излучения в оптоэлектронных устройствах. Из отдельных светодиодов собирают блоки и матрицы, которые позволяют высвечивать изображения букв и цифр.

8.3 Биполярные транзисторы

К биполярным приборам относятся приборы, для работы которых принципиально наличие двух типов носителей заряда: электронов и дырок. **Биполярным транзистором** называется полупроводниковый прибор, имеющий два **взаимодействующих** между собой *p-n*-перехода. Технология изготовления биполярных транзисторов аналогична полупроводниковым диодам: сплавление, диффузия и эпитаксия. Качественное же своеобразие транзистора связано с особенностями конструкции: малым расстоянием между переходами транзистора ($l \leq 1$ мкм), которое называется толщиной базы.

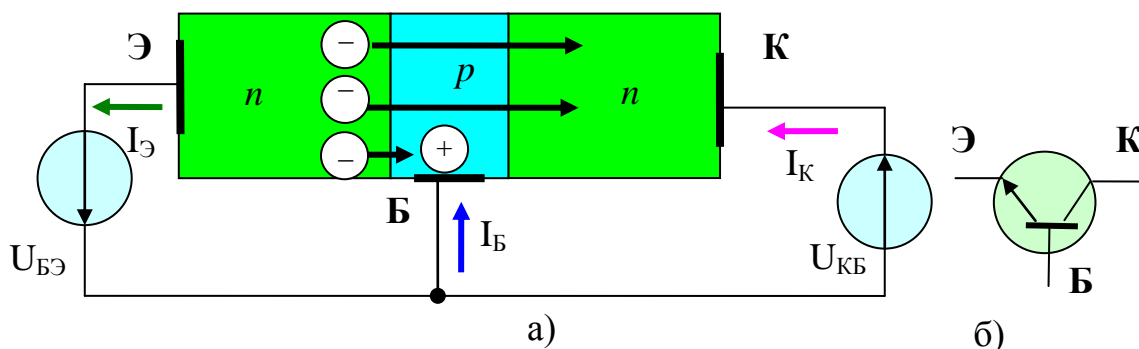


Рисунок 8.2 – Устройство *n-p-n*-транзистора (а) и его схематическое изображение (б)

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают *n-p-n*-транзисторы и *p-n-p*-транзисторы. Упрощенное устройство плоскостного *n-p-n*-транзистора и его условное обозначение приведено на рисунке 8.2. Аналогичны представления и для *p-n-p*-транзистора. Но в микроэлектронике чаще применяют *n-p-n*-транзисторы, которые имеют лучшие параметры. Для *n-p-n* структуры, левую *N*-область, которая будет инжектировать электроны в *P*-область, называют **эмиттером**. Правую *N*-область, которая в дальнейшем будет экстрагировать электроны, находящиеся в средней *P*-области, называют **коллектором**. Средняя часть структуры называется **базой**. Таким образом в трехслойной структуре имеются два электронно-дырочных перехода: **эмиттерный** – между эмиттером и базой и **коллекторный** – между базой и коллектором. В несимметричных структурах электрод базы располагается ближе к эмиттеру, а ширина базы зависит от частотного диапазона и с повышением частоты уменьшается.

Работа транзистора основана на управлении **токами электродов**. В зависимости от полярности приложенных к его переходам напряжений, различают режимы: линейный (усилительный), насыщения, отсечки и инверсный.

В линейном режиме – эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. **В инверсном режиме** коллекторный переход – в прямом, а эмиттерный – в обратных направлениях. **В режиме насыщения** оба перехода смещены в прямом направлении, а **в режиме отсечки** – в обратном. В линейном режиме *n-p-n*-транзистора электроны, основные носители тока в эмиттере, **инжектируются** через открытый эмиттерный переход в область базы. В базе часть этих электронов **рекомбинирует** с ее основными носителями заряда (дырками), а часть диффундирует обратно в эмиттер. Так как база в транзисторе выполняется тонкой, то основная часть электронов, инжектированных эмиттером, достигает коллекторного перехода. Сильное электрическое поле обратного смещенного коллекторного перехода захватывает электроны (они неосновные носители в базу, и поэтому для них переход открыт), и пронесит их в коллектор. Ток коллектора, таким образом, практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери на рекомбинацию в базе, которая и образует ток базы $I_{Б} = I_{Э} - I_{К}$. Коэффициент, связывающий ток эмиттера и ток коллектора $I_{К} = \alpha I_{Э}$

называется коэффициентом передачи тока эмиттера. Численное значение коэффициента $\alpha=(0,9\dots0,999)$, и чем он больше, тем эффективнее транзистор передает ток. Этот коэффициент мало зависит от напряжения коллектор-база и база-эмиттер. Поэтому в диапазоне рабочих напряжений ток коллектора пропорционален току базы $I_K = \beta I_B$, и

коэффициент пропорциональности равен $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = (10\dots1000)$. Таким образом,

изменяя малый ток базы, можно управлять большим током коллектора, т. е. биполярный транзистор является прибором, **управляемый током базы**.

Включение транзистора, когда входная и выходная цепи имеют общую точку – эмиттер, является наиболее распространенной и называется **включением с общим эмиттером (ОЭ)** – рисунок 8.3. Для усиления сигнала применяются также схемы включения биполярных транзисторов с **общим коллектором (ОК)** и **общей базой (ОБ)**.

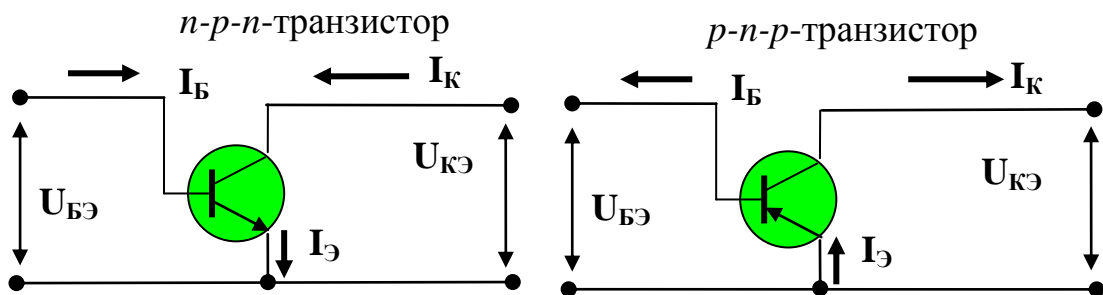


Рисунок 8.3 – Схемное включение транзистора с общим эмиттером

Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными

показателями: коэффициентом усиления по току $\left(\frac{I_{вых}}{I_{вх}} \right)$; входным и выходным

сопротивлениями $\left(R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}; R_{вых} = \frac{U_{вых}}{I_{вых}} \right)$. Рассмотрим сравнительные

характеристики схем включения биполярного транзистора:

1. Схема включения с **общей базой (ОБ)**: а) коэффициент усиления по току

$\alpha = \left(\frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_K}{I_E} \right) < 1$, поэтому схема не усиливает ток, а усиливает напряжение; б)

входное сопротивление мало, т. к. входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора;

в) для питания данной схемы необходимо два источника напряжения;

г) достоинства схемы с ОБ: хорошие температурные и частотные свойства.

2. Схема включения с **общим эмиттером (ОЭ)**: а) т. к. $I_{вых} = I_K, I_{вх} = I_B$

получаем большой коэффициент усиления по току $\beta = \frac{I_K}{I_B} \gg 1$;

б) т. к. $U_{вх} = U_{БЭ}$, а $U_{вых} = U_{КЭ}$, большое входное сопротивление $R_{вх} = \frac{U_{БЭ}}{I_B}$; в)

выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного; г) к недостаткам можно отнести худшие температурные и частотные свойства по сравнению со схемой с ОБ.

3. Схема включения с **общим коллектором (ОК)**: а) $I_{вых} = I_{Э}$, $I_{ex} = I_{Б}$, а $U_{ex} = U_{БК}$, а $U_{вых} = U_{КЭ}$, то схема не усиливает напряжение, а усиливает ток $\beta = \frac{I_{Э}}{I_{Б}} > 1$; б) обладает большим входным и малым выходным сопротивлениями; в) данную схему называют «эмиттерный повторитель».

Транзистор по схеме с **общим эмиттером (ОЭ)** описывается семействами выходных и входных характеристик. **Входные характеристики** – зависимости тока базы от напряжения между базой и эмиттером (рисунок 8.4 б): $I_{Б} = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$. **Выходной** или коллекторной ВАХ транзистора называется зависимость коллекторного тока от напряжения между коллектором и эмиттером, снятая при неизменном токе базы $I_{Б} = \text{const}$. Семейство выходных ВАХ транзистора приведено на рисунке 8.4 а, откуда видно, что ВАХ является нелинейной и состоит из нескольких участков.

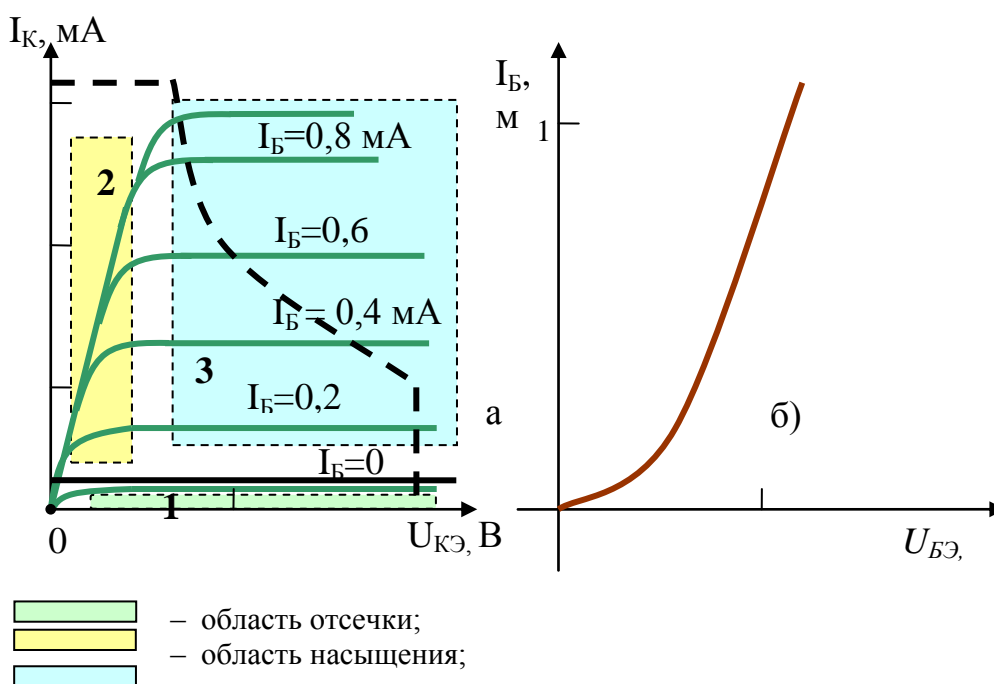


Рисунок 8.4 – Выходные (а) и входные (б) характеристики транзистора

На **пологом участке** выходной характеристики ток коллектора практически не зависит от напряжения $U_{КЭ}$, т. е. транзистор работает в **линейном** (усилительном) **режиме**, когда на эмиттерном переходе действует прямое напряжение, а на коллекторном – обратное. На этом участке транзистор характеризуется как прибор со свойствами **управляемого источника тока**, т. е. источника тока $I_{К}$, значение которого можно изменять путем изменения $I_{Б}$. **Крутой участок** выходных характеристик характеризуется потерей транзистором усилительных свойств, эта часть характеристик используется в импульсной технике при реализации **ключевого режима** транзистора.

Два ключевых режима транзистора – **режимы насыщения и отсечки** – позволяют использовать транзистор как замкнутый или разомкнутый ключ. **Транзисторные ключи** находят применение в различных электронных устройствах: измерительных усилителях для коммутации сигналов, в силовых преобразователях частоты и др. Во всех этих применениях транзистор **попеременно** переводится из режима **насыщения** в режим **отсечки** и обратно. В связи с этим важным является скорость переключения такого ключа, которая характеризуется временем переключения или частотой коммутации.

В инверсном режиме коллектор и эмиттер меняются местами, и роль коллектора выполняет эмиттер. Инверсный режим используется в двунаправленных ключах, когда транзистор симметричный и его усиление практически не изменяется при замене коллектора и эмиттера. В таких транзисторах области коллектора и эмиттера имеют одинаковые свойства и геометрические размеры, поэтому любая из них может работать как эмиттер или коллектор. Если транзистор несимметричный, то в инверсном режиме падает усиление транзистора.

Достоинство биполярных транзисторов – высокое быстродействие при больших токах коллектора, что находит применение в электронной технике. Так как биполярные транзисторы управляются током, то они потребляют достаточно большую мощность от входной цепи, что препятствует их использованию при подключении к маломощным источникам входного сигнала. Токи в транзисторе сильно зависят от температуры окружающей среды, что является общим недостатком полупроводниковых приборов.

8.4 Полевые транзисторы

Униполярный (полевой) транзистор – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока производится изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Оба названия транзистора отражают его особенности: прохождение тока в канале обусловлено одним типом зарядов – **униполярный**; управление током канала осуществляется электрическим полем – **полевой**.

Электроды, подключенные к каналу, называются **стоком** и **истоком**, а металлический (управляющий) электрод, создающий эффект поля – **затвором**. **Истоком** служит тот электрод, из которого в канал поступают основные носители заряда, **стоком** – тот, через который эти носители уходят из канала. Напряжение управления, которое создает поле в канале, прикладывается между затвором и истоком ($U_{ЗИ}$). В зависимости от выполнения затвора униполярные транзисторы делятся на две группы: с **управляющим p-n-переходом** и с **изолированным затвором** (или МДП-транзистор).

Функциональное назначение полевого транзистора такое же, что и биполярного. Различают три схемы включения полевого транзистора: с общим истоком (**ОИ**), общим стоком (**ОС**) и общим затвором (**ОЗ**). Наиболее распространены схемы включения транзистора с **общим истоком (ОИ)**.

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом – полупроводниковый прибор, в котором проводимостью канала можно управлять, подавая напряжение на закрытый p-n-переход. Структура полевого транзистора с управляющим p-n-переходом приведена на рисунке 8.5. Слой с проводимостью n-типа называется **каналом** и он имеет два вывода во внешнюю цепь: **С** – **сток** и **И** – **исток**. Слои с проводимостью p-типа, окружающие канал, соединены между собой, а вывод во внешнюю цепь называется **затвором З**, который служит для регулирования поперечного сечения канала.

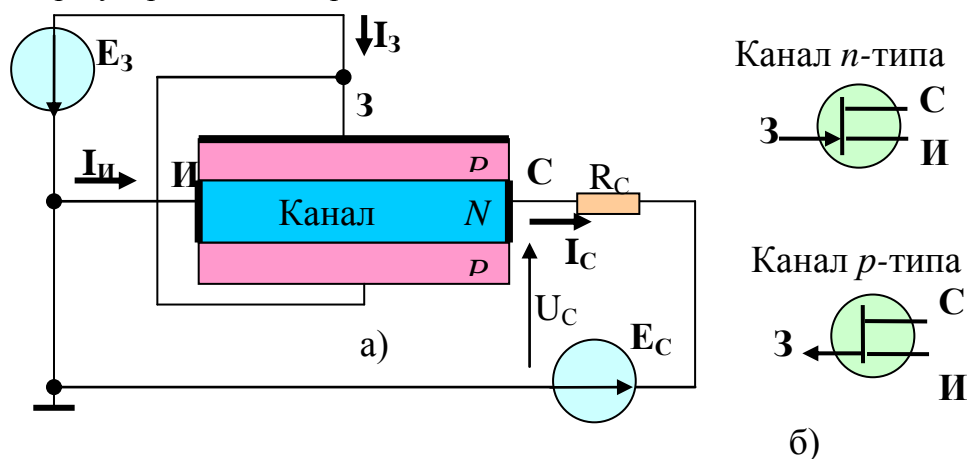


Рисунок 8.5 – Устройство полевого транзистор с управляющим

p-n переходом (а) и его схематическое изображение (б)

В транзисторе с каналом *n*-типа носителями заряда являются электроны, которые движутся вдоль канала от истока к стоку, образуя ток стока I_C . Между затвором и истоком приложено напряжение, запирающее *p-n*-переход, образованный *n*-областью канала и *p*-областью затвора. Напряжение, приложенное между стоком и истоком $U_{СИ}$ вызывает появление неравномерного обедненного слоя, который увеличивается в направлении от истока к стоку, т. е. сечение канала вблизи стока уменьшается. Если одновременно подать напряжения $U_{СИ} > 0$, а $U_{ЗИ} < 0$, то толщина обедненного слоя, а, следовательно, и сечение канала будут определяться суммой этих напряжений. Когда суммарное напряжение достигнет напряжения запирания

$$U_{СИ} + |U_{ЗИ}| = U_{зап}, \quad (8.1)$$

ширина канала уменьшится, а его сопротивление канала возрастет. При определенном значении $U_{ЗИ}$, которое называется **напряжением отсечки**, ток стока практически не протекает.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора (рисунок 8.6), имеют два участка: **крутой** и **пологий**. Пологий участок используется при работе транзистора в усилительных устройствах, а крутой участок – при работе в ключевых режимах. Полевой транзистор с управляющим *p-n*- переходом обеспечивает усиление по мощности, току и напряжению.

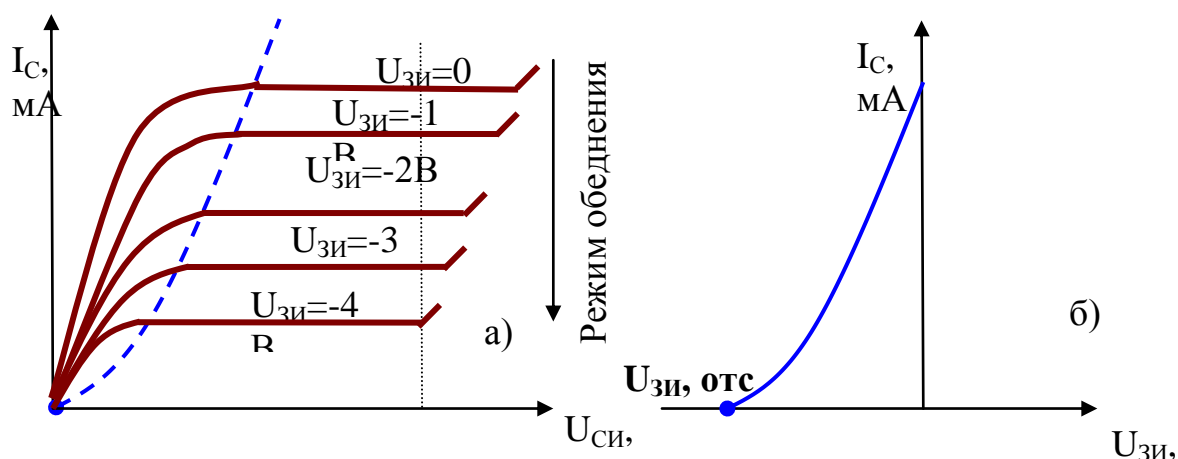


Рисунок 8.6 – Стоковые (а) и стоко-затворные (б) характеристики полевого транзистора

Полевой транзистор с изолированным затвором – транзистор, электрод затвора которого изолирован от полупроводникового канала слоем диэлектрика из двуокиси кремния SiO_2 . Поэтому наряду с термином МДП-транзистор (металл-диэлектрик-полупроводник) используется термин, отражающий его структуру: МОП-транзистор (металл-окисел-полупроводник).

Электроды **стока** и **истока** располагаются по обе стороны **затвора** и имеют контакт с полупроводниковым каналом (рисунок 8.7 а). Подложка (**П**) соединяется с истоком внутри прибора или по внешней цепи.

Полупроводниковый канал может быть **обеднен** или **обогащен** носителями зарядов. При обедненном канале электрическое поле затвора повышает его проводимость, и он называется **индуцированным**. Если канал обогащен носителями зарядов, то – **встроенным**, а электрическое поле затвора приводит к обеднению канала носителями зарядов. Таким образом, полевые МДП-транзисторы могут быть с **индуцированным** или **встроенным каналом**.

Рассмотрим принцип действия МДП-транзистора со встроенным каналом N -типа. Его **стоковые (выходные) характеристики** $I_C = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = const$ приведены на рисунке 8.8 а. В отсутствии управляющего напряжения $U_{ЗИ} = 0$ через канал между N -областями протекает ток стока I_C . С увеличением напряжения источника $U_{СИ}$ p - n -переход между подложкой и каналом смещается в обратном направлении, приводя к преимущественному расширению двойного электрического слоя вблизи стока и сужению канала, проводящего ток. По мере роста $U_{СИ}$ увеличивается сопротивление канала, рост тока стока I_C замедляется (при полном перекрытии p - n -переходом сечения канала ток стока практически не изменяется с ростом $U_{СИ}$). В этом режиме процессы аналогичны происходящим в полевых транзисторах с управляющим p - n -переходом.

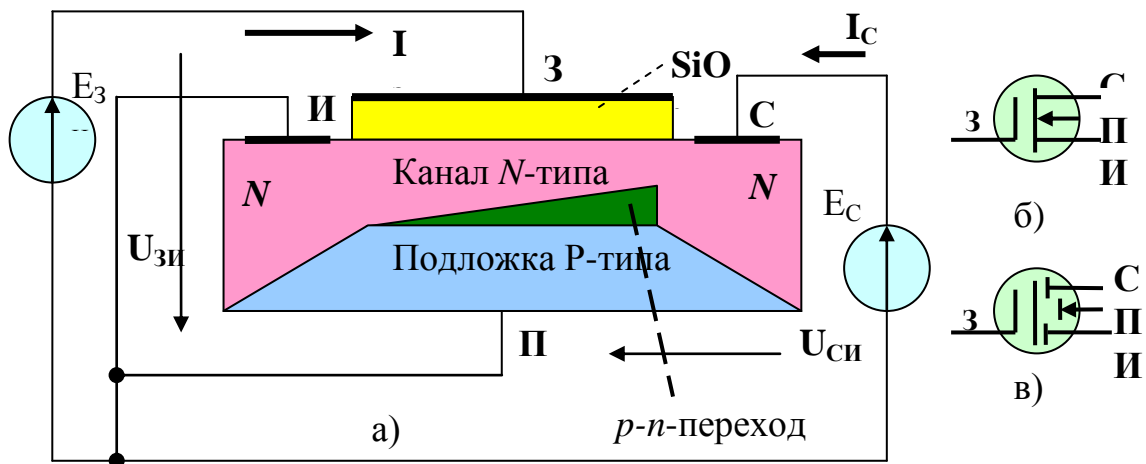


Рисунок 8.7 – Устройство полевого транзистора с изолированным затвором (а) и его схемное изображение: (б) – со встроенным каналом; (в) с индуцированным каналом

При приложении к затвору напряжения $U_{ЗИ} > 0$ электрическое поле притягивает электроны из подложки, которые скапливаются в области канала, сопротивление канала снижается и ток стока I_C растет. Этот режим называется **режимом обогащения**. При $U_{ЗИ} < 0$ на затворе электрическое поле выталкивает электроны из канала в подложку, сопротивление канала увеличивается и ток I_C падает. Этот режим носит название **режим обеднения**.

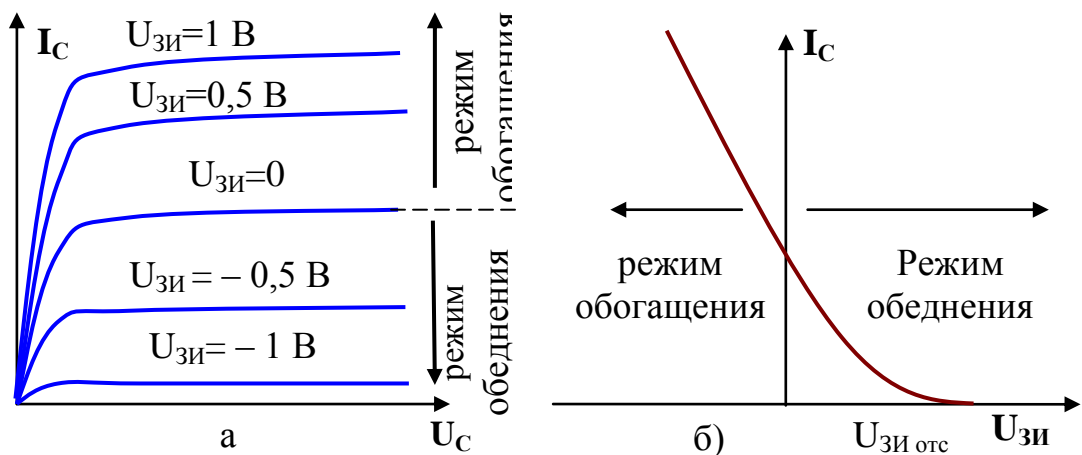


Рисунок 8.8 – Стоковые (а) и стоко-затворные (б) характеристики

МДП-транзистора со встроенным каналом

В МДП-транзисторах с **индуцированным каналом** специальный канал между областями стока и истока не создается и при напряжении $U_{3И}=0$ выходной ток отсутствует. Такой прибор может работать только в режиме обогащения, когда поле затвора притягивает носители заряда, которые и создают проводящий канал между **стоком** и **истоком**. При напряжении на затворе меньшем напряжения отсечки, ток стока I_C практически отсутствует.

Достоинство полевых транзисторов – технологичность при производстве интегральных микросхем, недостаток – невысокое быстродействие.

8.5 Тиристоры

Тиристор – полупроводниковый прибор с четырёхслойной структурой *p-n-p-n*-типа, обладающий двумя устойчивыми состояниями: включен или выключен, имеющий три или более *p-n*-переходов. Тиристор по своему принципу работы – прибор ключевого действия: во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, в выключенном – разомкнутому ключу. Тиристоры, не имеющие специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния цепи, называются **неуправляемыми** (динисторами) и используются в слаботочных импульсных устройствах. Тиристоры с управляющим электродом называют **управляемыми** или просто тиристорами и являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые также называют устройствами преобразовательной техники.

Полупроводниковый прибор с четырехслойной структурой моделируется комбинацией двух обычных транзисторов с различными типами проводимости (рисунок 8.9): транзистора *VT1* со структурой *p-n-p* и транзистора *VT2* со структурой *n-p-n*. У транзистора *VT1* переход *J1* является эмиттерным, а переход *J2* – коллекторным; у транзистора *VT2* эмиттерным служит переход *J3*, а коллекторным – *J2*. Таким образом, оба транзистора имеют **общий коллекторный переход *J2***, а база каждого транзистора питается коллекторным током другого транзистора.

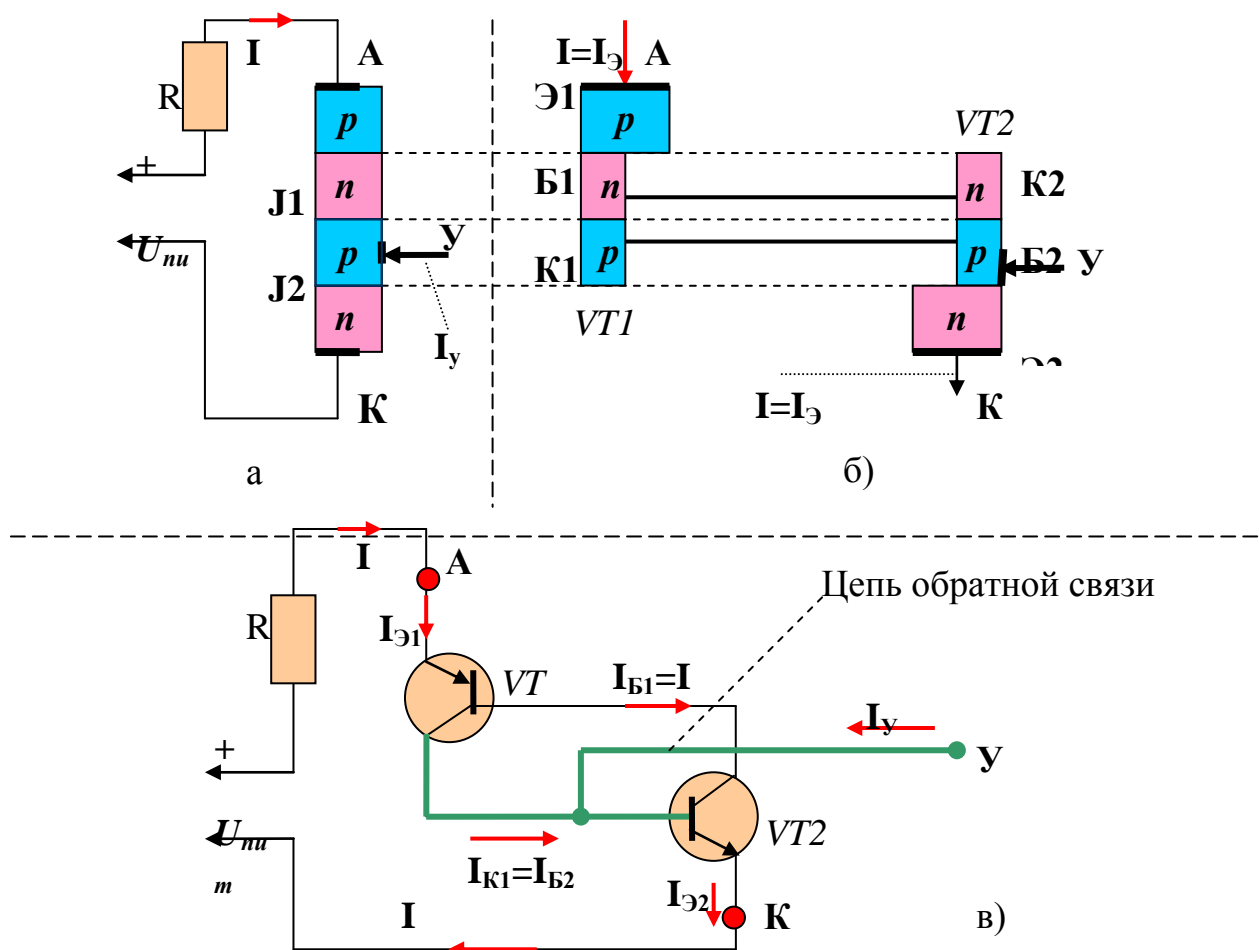


Рисунок 8.9 – Схематическое устройство полупроводникового прибора с четырехслойной структурой (а) и представление его в виде двухтранзисторной схемы (б, в)

Тиристор (динистор) имеет нелинейную разрывную ВАХ (рисунок 8.10). Область вольтамперной характеристики при положительных анодных напряжениях образует прямую ветвь, а при отрицательных – обратную. На характеристике выделяются четыре участка, каждый из которых соответствует особому состоянию четырехслойной полупроводниковой структуры:

1 участок – соответствует **закрытому состоянию** динистора. На этом участке через динистор протекает небольшой ток I_{3C} прибора в закрытом состоянии. В пределах участка увеличение анодного напряжения мало влияет на ток, пока не будет достигнуто напряжение (**точка а** характеристики), при котором наступает лавинообразный процесс нарастания тока, и динистор переключается в открытое состояние. Прямое напряжение, соответствующее точке «а» характеристики, называется напряжением переключения ($U_{ПР К}$), а ток – током переключения $I_{ПР К}$. **Участок 2** – переключения в открытое состояние, когда незначительное увеличение тока сопровождается быстрым уменьшением напряжения на аноде. Сопротивление динистора в пределах участка становится отрицательным. **Участок 3** соответствует **открытому состоянию** прибора. Динистор сохраняет открытое состояние, пока прямой ток $I_{ПР}$ будет больше минимального значения удерживающего тока $I_{уд}$ (**точка б** на характеристике). При снижении тока до значения $I_{ПР} < I_{уд}$ – динистор возвращается скачком в закрытое состояние.

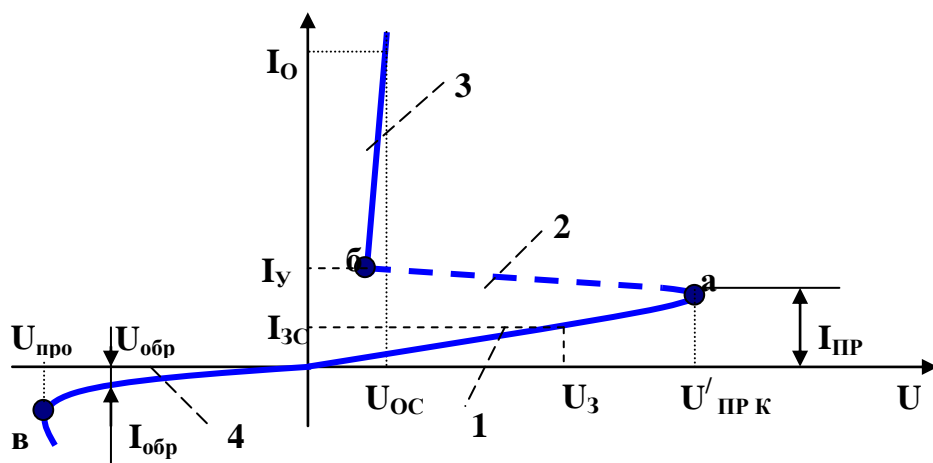


Рисунок 8.10 – Статическая вольтамперная характеристика динистора

Динистор может находиться в двух устойчивых состояниях: **участки 1 и 2**. Рабочая точка на **участке 2** характеристики находиться не может. На семействе статических вольтамперных характеристик управляемого тиристора изменяемым параметром семейства является значение тока I_y в цепи управляющего электрода. Выключить открытый тиристор можно, сделав прямой ток меньше удерживающего тока I_y . В цепях постоянного тока это осуществляется пропусканием через открытый тиристор короткого импульса обратного тока, превышающего прямой. Для этой цели используется специальное коммутирующее устройство. Тиристор, работающий в цепях переменного тока, запирается автоматически в момент окончания положительной полуволны основного тока. Этим и объясняется широкое применение тиристоров в устройствах переменного тока – для управления электродвигателями переменного тока, в выпрямителях и инверторах, импульсных схемах и устройствах автоматики.

8.6 Интегральные микросхемы

В зависимости от технологии изготовления **интегральные микросхемы (ИС)** могут быть полупроводниковыми, пленочными или гибридными.

Пленочная интегральная микросхема – микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены только в виде пленок проводящих и диэлектрических материалов. Вариантами пленочных микросхем являются тонкопленочные и толстопленочные микросхемы. К тонкопленочным условно относятся микросхемы с толщиной пленок менее 1 мкм, а к толстопленочным – с толщиной свыше 1 мкм.

Полупроводниковую интегральную микросхему (ИС) можно получить в объеме твердого материала или на его поверхности. В первом случае в объеме полупроводникового материала создают слои резисторов, структуры транзисторов, диодов и конденсаторов, несущие заданные электронные функции. Во втором случае все элементы интегральной схемы (кроме активных) наносят на диэлектрическую пластину (подложку) в виде поликристаллических или аморфных слоев (пленок), выполняющих заданные функции пассивных элементов. Полученную ИС при необходимости помещают в корпус с внешними выводами. Активные элементы (диоды и транзисторы) «навешивают» на пленочную схему, в результате чего получают смешанную (пленочно-дискретную) ИС, которую называют **гибридной**. Гибридная ИС (ГИС) — это гибкий, дешевый, оперативно проектируемый тип ИС, хорошо приспособленный к решению специальных частных задач. Спецификой ГИС могут быть или высокие номиналы резисторов и конденсаторов, недостижимые в полупроводниковых ИС, или прецизионность резисторов, обусловленных тем, что их номиналы можно подгонять до завершения технологического цикла и помещения ГИС в корпус, или повышенная

функциональная сложность. Одним из видов ГИС является многокристальная микросхема.

Однако наиболее распространены на практике и перспективны **полупроводниковые ИС**, так как они позволяют создавать надежные и достаточно сложные в функциональном отношении электронные устройства малых размеров при незначительной их стоимости. Характерной особенностью полупроводниковой ИС является отсутствие среди ее элементов катушки индуктивности и трансформатора. Это объясняется тем, что до сих пор не удалось использовать в твердом теле какие-либо физические явления, эквивалентные электромагнитной индукции. Поэтому при разработке ИС стараются реализовать необходимую функцию без использования индуктивностей или применяют навесные индуктивные элементы. В качестве резисторов и конденсаторов в полупроводниковых ИС используют соответственно сопротивление и зарядную емкость *p-n*-перехода, что позволяет обеспечить единый технологический цикл изготовления структур транзисторов, диодов, резисторов и конденсаторов при производстве полупроводниковых ИС.

Применение ИС вместо дискретных элементов в качестве элементной базы электронных устройств дает значительные преимущества по надежности, габаритам, стоимости и другим показателям.

В зависимости от функционального назначения интегральные микросхемы делятся на **аналоговые и цифровые**. Аналоговые ИС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Частным случаем этих микросхем является микросхема с линейной характеристикой, т. е. линейная микросхема. С помощью цифровых микросхем преобразуются и обрабатываются сигналы, изменяющиеся по закону дискретной функции. Частным случаем цифровых микросхем являются логические микросхемы, выполняющие операции с двоичным кодом, которые описываются законами логической алгебры.

После появления микропроцессоров введены дополнительные термины. Микропроцессор определен как программно-управляемое устройство, которое осуществляет процесс обработки цифровой информации и управления этим процессом. Это устройство изготовлено на основе одной или нескольких больших интегральных схем (БИС). **Микропроцессорной** называется **микросхема**, выполняющая функцию микропроцессора или его часть. Совокупность этих и других микросхем, совместимых по архитектуре, конструктивному исполнению и электрическим параметрам, называется микропроцессорным комплексом. Классификация интегральных схем содержит и такие понятия: микросхема общего назначения, заказная или полузаказная. Заказная микросхема – микросхема, разработанная на основе стандартных или специально созданных элементов и узлов по функциональной схеме заказчика. Полузаказная – микросхема, разработанная на основе базовых кристаллов (в том числе матричных). Минимальный состав комплекта интегральных микросхем, необходимый для решения определенного круга аппаратных задач, называется **базовым составом**. Тип интегральной микросхемы – микросхема конкретного функционального назначения и определенного конструктивно-технологического и схемотехнического решения, имеющая свое условное обозначение. Типономинал микросхемы – микросхема конкретного типа, отличающаяся от других микросхем того же типа одним или несколькими параметрами. Группа типов микросхем – совокупность типов микросхем в пределах одной серии, имеющих аналогичное функциональное назначение и принцип действия, свойства которых описываются одинаковым составом электрических параметров.

8.7 Оптоэлектронные устройства

Оптоэлектроника – направление электроники, охватывающее вопросы использования оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации. Отличительной чертой оптоэлектроники является использование для

обработки информации оптического излучения. К оптическому излучению относится электромагнитное излучение в видимом диапазоне (с длиной волны 0,4-0,8 мкм), инфракрасном (0,8-103 мкм) и ультрафиолетовом (10-3-0,4 мкм).

Достоинства оптоэлектронных приборов: высокая скорость передачи информации, информационная емкость оптического канала, плотность записи информации в оптических ПЗУ, возможность проводить параллельную обработку информации и получать объемное голографическое изображение.

К перспективным направлениям развития оптоэлектроники можно отнести разработку оптических и оптоэлектронных микросхем, источников и приемников излучения на основе квантовых точек и ям в полупроводниковых структурах, волоконно-оптических датчиков и линий связи, голографических устройств, квантовых компьютеров и др.

Оптоэлектронный прибор (оптопара) содержит одновременно источник и приемник световой энергии. Для оптопары входным и выходным параметром является электрический сигнал. В качестве излучателя оптопары могут быть использованы инфракрасный излучающий диод, светоизлучающий диод, люминесцентный излучатель или полупроводниковый лазер. Наибольшее распространение в настоящее время получил инфракрасный излучающий диод, что объясняется простотой его структуры, управления и высоким КПД. В качестве приемника оптопары находят применение фотоэлектрические приборы: фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и др.

Оптопара позволила создать аналог разделительного трансформатора, что является актуальным в интегральной микроэлектронике. Условные обозначения оптопары, включающей различные приемники, приведены на рисунке 8.11. Для усиления и согласования выходного сигнала оптопары со стандартным уровнем напряжения, используемым для передачи и преобразования цифровых сигналов, служат оптоэлектронные ИС, в которых применяются диодная оптопара и импульсный усилитель.

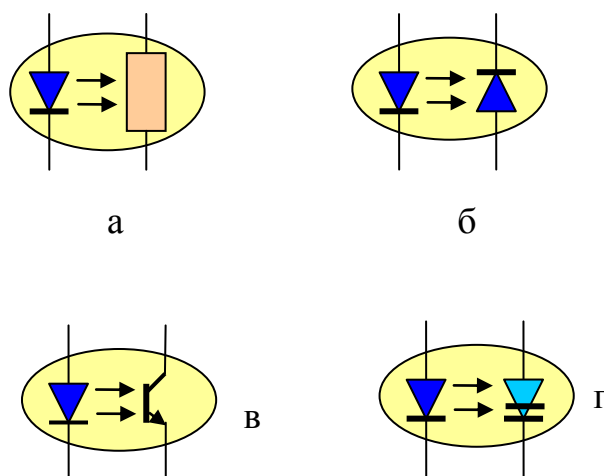


Рисунок 8.11 – Условные обозначения оптопары: а) – резистивная; б) – диодная; в) – транзисторная; г) – тиристорная

Обозначение оптронов: 1-я буква или цифра – материал излучателя (*A* или *З* – GaAs или GaAlAs); 2-я буква – *О* – оптроны; 3-я буква – тип фотоприемника: *Д* – фотодиод, *Т* – фототранзистор, *У* – фототиристор; Цифры – место в соответствующей группе. Резисторные оптроны (исторически первый тип оптронов) имеют отличающееся обозначение – **ОЭП** (оптоэлектронный прибор). Оптроны могут быть с приемниками на основе полевых фототранзисторов, МДП - фотоварикапов, однопереходных транзисторов, функциональных фоторезисторов и др.

Дифференциальные оптроны – в них один излучатель воздействует на два идентичных фотоприемника. Подобие входных характеристик двух каналов позволяет

использовать их для передачи нескольких аналоговых сигналов: первый канал для непосредственной передачи, второй канал для цепи обратной связи – корректировки температурных, деградационных и других изменений мощности излучения. Регенеративные оптроны отличаются наличием обратной связи между излучающими и фотоприемными элементами и используются как переключатели, усилители, генераторы.

Выделяют два типа оптронов с открытым оптическим каналом: **оптопрерыватели**, которые реагируют на попадание в оптический канал непрозрачных предметов и прерывают (или изменяют) световой поток, падающий на приемник; **отражательные оптроны**, которые регистрируют световой поток, отраженный от исследуемой поверхности.

Оптоэлектронные микросхемы содержат одну или несколько оптопар, согласующие элементы или ИС, объединенные в один корпус по гибридной технологии. Выделяют три группы оптоэлектронных микросхем:

1. Переключательные оптоэлектронные микросхемы, которые имеют два статических состояния (диодный оптрон и ключевое устройство, согласованное по уровням входных и выходных сигналов со стандартными логическими элементами).

2. Линейные оптоэлектронные микросхемы, которые осуществляют аналоговые преобразования сигналов.

3. Оптоэлектронные МС релейного типа коммутируют силовые цепи, по входным параметрам согласованы с ИС.

Оптоэлектронными индикаторами являются приборы, соответствующие функциональному назначению индикатора и удовлетворяющие концепциям оптоэлектроники в части интегрируемости, технологичности, совместимости с микроэлектроникой, начали развиваться как альтернатива электронно-лучевым трубкам. По физическому принципу отображения информации выделяют индикаторы с активным и пассивным растром.

Индикаторы с активным растром используют светогенерационный эффект – преобразование электрической энергии в световое излучение (различные виды люминесценции и тепловое излучение). Индикаторы с активным растром включают в себя вакуумные накальные, газоразрядные, вакуумные люминесцентные, полупроводниковые и электролюминесцентные.

В индикаторах с пассивным растром управляющие электрические сигналы модулируют внешний световой поток (электрооптические эффекты изменение коэффициента поглощения или отражения участков растра, вращение плоскости поляризации проходящего света, изменение цвета поверхности и др.). К индикаторам с пассивным растром относятся жидкокристаллические, электрохромные, электрофоретические, электролитические, магнитомеханические, дипольные и др.

Из **волоконно-оптические кабели** распространение получили четыре конструкции:

а) повивная, в которой волоконные модули обвиваются вокруг центрального упрочняющего элемента;

б) кабели пучковой скрутки, в которых навивке подвергаются группы (пучки) модулей, предварительно уложенные в трубки;

в) кабели с профильным упрочняющим элементом, в которых волоконные модули свободно укладываются в винтообразные пазы упрочняющего элемента;

г) ленточные кабели, в которых скручиванию подвергаются ленты, содержащие несколько волокон и набранные стопой.

Первые две конструкции являются классическими, заимствованными из электротехнической практики.

Независимо от конкретной конструкции основными элементами кабеля являются: а) упрочняющие элементы, обычно полимерные, служащие для придания кабелю необходимой разрывной прочности и разгрузки волокон от растяжения; б) наружные

защитные покрытия, предохраняющие от проникновения влаги, паров вредных веществ и от внешних механических воздействий;

в) армирующие элементы, повышающие сопротивляемость кабеля механическим воздействиям; г) изолированные металлические провода, монтируемые в кабеле наряду с оптическими волокнами и обеспечивающие электропитание ретрансляторов на линии связи; д) гидрофобный наполнитель, ослабляющий вредное воздействие влаги на волокна.

8.8 Индикаторные приборы

Индикаторными приборами называют приборы, предназначенные для визуального представления информации. Важность таких приборов трудно переоценить, так как до 80% информации воспринимается человеком через органы зрения. Развитие систем программного управления, автоматического сбора и обработки информации, контрольно-измерительной аппаратуры, вычислительной техники привело к созданию множества разнообразных приборов, воспроизводящих информацию в виде, удобном для зрительного восприятия.

Электровакуумным прибором (ЭВП) называется электронный прибор, в котором проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся между электродами через вакуум или газ. Электроды, предназначенные для испускания (эмиссии) и поглощения носителей электрического заряда, называют соответственно **катодом** и **анодом**. Характер переноса заряда между катодом и анодом можно изменять введением между ними дополнительных электродов. Число используемых в ЭВП электродов и тип носителей заряда определяют конкретные свойства прибора. Область применения ЭВП в настоящее время ограничена генераторами мощных СВЧ колебаний и индикаторными приборами. Из остальных областей ЭВП практически полностью вытеснены полупроводниковыми приборами.

Явление свечения некоторых материалов при бомбардировке их направленным пучком электронов используется в ЭВП, называемых электронно-лучевыми трубками. **Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ)**, действие которых основано на формировании и управлении по интенсивности и положению одним или более электронными пучками, классифицируют по назначению и способу управления электронным пучком. В зависимости от назначения ЭЛТ подразделяют на приемные, передающие, запоминающие и др. В качестве индикаторных приборов используют приемные трубки.

По способу управления электронным пучком ЭЛТ подразделяют на трубки с электростатическим и магнитным управлением. В первых, для управления пучком электронов применяют электрическое поле, а во вторых – магнитное. Электронно-лучевые трубки с магнитным управлением получили широкое распространение в качестве устройств отображения информации – **индикаторных устройств дисплеев ЭВМ**.

Электронно-лучевые трубки с электростатическим управлением обеспечивают более высокие частотные свойства, поэтому их широко используют в качестве индикаторов электронных осциллографов.

Низковольтные индикаторы классифицируются: на активные (преобразование энергии электрического тока в световой поток) и пассивные (модуляция внешнего светового потока под действием электрического поля). К первому классу относятся вакуумные накаливаемые, полупроводниковые и вакуумные люминесцентные индикаторы, ко второму – жидкокристаллические индикаторы.

Вакуумный накаливаемый индикатор – электровакуумный прибор, внутри которого расположены элементы излучения в виде нитей накаливания. Из низковольтных приборов вакуумные накаливаемые индикаторы обладают самой высокой яркостью свечения, что позволяет эксплуатировать их в любых условиях внешнего освещения, вплоть до прямого солнечного света. Цвет свечения индикатора соломенно-желтый.

Полупроводниковый индикатор выполняют на основе светоизлучающих диодов. Используя различный исходный материал, можно получить светоизлучающие диоды с

различным цветом свечения — от красного до зеленого. Светодиодные индикаторы изготавливают как бескорпусными, так и в металлическом, металлокерамическом или пластмассовом корпусах.

Во всех конструкциях принимают специальные меры для визуального увеличения размеров индикаторов: используют фокусирующие и диффузионные линзы, прозрачные пластмассовые корпуса, создают многократные отражения от внутренних поверхностей излучающего диода. Диаметр светового пятна индикатора составляет (1,5...4) мм.

Вакуумный люминесцентный индикатор аналогично ЭЛТ использует эффект свечения люминофора при бомбардировке его потоком электронов. Вакуумные люминесцентные индикаторы в настоящее время используются в одноразрядных и многоразрядных буквенно-цифровых, матричных, мнемонических (предназначены для отображения специальных условных знаков) и шкальных индикаторах.

Вакуумные люминесцентные индикаторы нашли широкое распространение благодаря высокой яркости и возможности получения многоцветного свечения в одном баллоне, полной электрической совместимости с интегральными схемами, малой потребляемой мощности и возможности создания, гибридных вакуумно-полупроводниковых дисплеев.

Жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) работает за счет изменения оптической плотности жидкого кристалла. По способу использования внешнего освещения ЖКИ подразделяют на индикаторы, работающие на просвет и на отражение. ЖКИ состоят из двух параллельно расположенных стеклянных пластин, на внутренних поверхностях которых нанесены пленочные электроды. Межэлектродное пространство заполнено жидкокристаллическим веществом. Один из электродов выполняется в виде рисунка отображаемого знака, а второй является общим.

У **ЖКИ**, работающего **на просвет**, оба электрода прозрачны, а у **ЖКИ**, работающего **на отражение**, внутренний общий электрод имеет зеркальную поверхность. В зависимости от свойств используемых жидких кристаллов возможно получение одноцветных темных изображений на светлом фоне, светлых изображений на темном фоне или цветных изображений.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие приборы являются элементной базой электроники?
- 2) В чём отличие электронных и ионных приборов?
- 3) Какие виды токов протекают в полупроводниках, чем они вызываются?
- 4) Что называется, полупроводниковым переходом, какой переход называется прямым и обратным?
- 5) Перечислить типы полупроводниковых диодов.
- 6) Какие параметры характеризуют диоды?
- 7) Какие типы транзисторов Вы знаете?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Кононенко – Ростов н/Д. : Феникс, 2004. – 752 с.
2. Касаткин, А. С. Электротехника : учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Академия, 2003. – 544 с. (– М. : Высшая школа, 2000. – 542 с.)
3. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники.: учеб. для вузов / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. – СПб. : Энергоиздат, 2003. – 467 с.
4. Иванов, И. И. Электротехника: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – СПб. : Лань, 2005. – 496 с.
5. Лачин, В. И. Электроника. : Учеб. пособие / В. И. Лачин, Н.С. Савелов. – Ростов н/Д. : Феникс, 2005. – 704 с. (– Ростов н/Д. : Феникс, 2000. – 448с.)
6. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Горячая линия –Телеком, 2003. – 768с.

Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к конспекту лекций

по дисциплине

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

для студентов направления подготовки

Профессиональное обучение (по отраслям),

профиль «Безопасность технологических процессов и производств»,

«Информационные технологии и системы».

С о с т а в и т е л и:

Петров Александр Геннадьевич

Шелемей Евгений Николаевич

Печатается в авторской редакции.

Компьютерная верстка и оригинал-макет автора.

Подписано в печать _____

Формат 60x84¹/₁₆. Бумага типограф. Гарнитура

Times Печать офсетная. Усл. печ. л., Уч.-изд. л. _____

Тираж 100 экз. Изд. №_____. Заказ №_____. Цена договорная.

Издательство Луганского
государственного университета
имени Владимира Даля

*Свидетельство о государственной регистрации
издательства МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015г.*

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а

Телефон: 8 (0642) 41-34-12, **факс:** 8 (0642) 41-31-60

E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com **http:** [//izdat.dahluniver.ru](http://izdat.dahluniver.ru)